

UNIVERSITÉ DE NICE – SOPHIA ANTIPOlis

U.F.R. des Sciences et Techniques des Activités Physiques et Sportives
Laboratoire « Motricité Humaine, Education, Santé »

THÈSE

En vue de l'obtention du grade de

Docteur de l'Université de Nice – Sophia Antipolis

École doctorale : Sciences du Mouvement Humain

Discipline : Sciences et Techniques des Activités Physiques et Sportives

Spécialité : Physiologie

LES STRATEGIES D'ALLURE DANS LA PERFORMANCE SPORTIVE DE HAUT NIVEAU : ANALYSE DES VARIABILITES ET EXPOSE DES PHENOMENES EXPLICATIFS

Présentée et soutenue publiquement par

Yann LE MEUR

le 16 décembre 2010

Devant le jury composé de

Rapporteurs

Charles Yannick GUEZENNEC Professeur Agrégé du Service de Santé des Armées – Centre National de Rugby (Marcoussis)

Iñigo MUJICA Professeur associé – Université du Pays Basque

Examinateurs

Jeanick BRISSWALTER Professeur des Universités, Université de Nice – Sophia Antipolis

Guillaume MILLET Professeur des Universités, Université de Saint-Etienne

Jean-François TOUSSAINT Professeur des Universités – PH, IRMES (INSEP) – Paris V – Hôpital de l'Hôtel Dieu

Directeur

Christophe HAUSSWIRTH Chercheur, HDR, INSEP

Co-directeur

Thierry BERNARD Maître de Conférences Universitaire, HDR, Université du Sud Toulon-Var

REMERCIEMENTS

L'ensemble des travaux de recherche présentés dans ce manuscrit a été réalisé au laboratoire « Motricité Humaine, Education, Santé » de l'UFR des Sciences et Techniques des Activités Physiques et Sportives de l'Université de Nice – Sophia Antipolis ainsi qu'au service Recherche de l'Institut National du Sport, de l'Expertise et de la Performance (Paris), de septembre 2007 à décembre 2010. Ces études ont été supportées par une collaboration avec la Fédération Française de Triathlon. Je tiens par conséquent à remercier sincèrement l'ensemble de ceux qui, de près ou de loin, ont contribué à la réalisation de ces travaux.

Mes remerciements s'adressent en particulier à :

Christophe HAUSSWIRTH, évidemment, sans qui ce travail n'aurait pu être accompli et mené avec autant d'envie. Difficile de résumer en quelques lignes cinq ans, des voyages sur 3 continents, 6 épreuves de Coupe du Monde, 12 études, 510 tests et j'en passe... J'ai conscience d'avoir eu la chance de vivre une thèse un peu « à part » et je te remercie de m'avoir encadré avec tant de ferveur depuis 2005, alors que ma situation professionnelle rendait les choses forcément compliquées. Je crois que le plus excitant reste de se dire que tout cela ne marque finalement que le point de départ d'un chemin qui s'annonce long.

Thierry BERNARD, mon co-directeur, pour m'avoir suivi lors de cette aventure et pour sa passion pour ce domaine dans lequel nous avons la chance de travailler.

Aux Professeurs **Charles Yannick GUEZENNEC** et **Iñigo MUJICA** pour avoir accepté de donner de votre temps afin d'expertiser ce travail avec tant d'attention. Vos conseils et votre expérience dans la recherche appliquée à la performance à haut niveau me seront précieux. Recevez ici ma sincère gratitude et mes remerciements.

Au professeur **Jeanick BRISSWALTER** pour être parvenu à rassembler un jury de cette qualité et avoir su trouver la bonne date pour cet événement forcément particulier.

Aux Professeurs **Guillaume MILLET** et **Jean-François TOUSSAINT** de me faire l'honneur de participer à ce jury de thèse en qualité d'examineurs.

A l'ensemble des membres de l'équipe du service Recherche de l'INSEP (anciens ou présents). Je pense plus particulièrement à Sylvain DOREL pour sa grande rigueur scientifique mais surtout pour les nombreux souvenirs laissés par ces 5 années ; à Antoine COUTURIER pour ses messages téléphoniques et son effroyable capacité à m'expliquer que tout est gérable en 3 clics sous Origin ; à Giuseppe RABITA pour ses qualités professionnelles et humaines, même si je sais que ce 16 décembre marquera un profond traumatisme pour lui. Merci à François BIEUZEN pour son humour, ses encouragements toujours sincères et pour s'être toujours interposé quand les relations devenaient trop tendues avec mon ordinateur. Merci enfin à Gaël GUILHEM de m'avoir toujours

soutenu face aux sempiternels « Passe ta thèse et après on verra ! ». Toi, au moins tu m'as toujours compris.

Aux athlètes et aux cadres de la Fédération Française de Triathlon et plus particulièrement à messieurs Franck BIGNET, Gérard HONNORAT et Philippe FATTORI. J'ai toujours eu le sentiment de pouvoir exprimer mon avis en étant entendu. Au-delà de la sincère reconnaissance que je nourris envers la FFTri, je tiens à vous remercier très chaleureusement pour votre soutien, en espérant voir prochainement encore plus de Bleu Blanc Rouge sur les podiums internationaux.

A mes anciens profs - collègues de l'Université de Marne la vallée, Valérie, Gilles et Hélène. Merci pour votre bonne humeur permanente, vos blagues souvent douteuses mais surtout d'avoir toujours veillé sur moi de la sorte.

A mes amis de longue date Noury, Dim, Guillaume, Seb, Thibault et Damien, qui ont toujours respecté mes choix et sur qui je peux toujours compter.

Un immense merci à mes partenaires de chaque instant, présents dans toutes les batailles. Je veux bien évidemment parler de mon ami Olivier Bentley, dont je suis et je resterai toujours le premier et le plus grand fan ; de Fox pour nos footings à refaire le monde et ses plats de pâtes inimitables. Merci aussi d'avoir relu cette thèse. Merci enfin à Dim « Sparrow » pour son amitié sans faille et nos fous-rires futurs à Bora Bora.

Merci aussi à Marion, Jean-Phi, Alex, Laure, Sarah, Véro et Aurélie, ainsi qu'à toutes les personnes qui m'ont soutenu durant cette période et que je n'ai pas la place d'évoquer ici.

Ces derniers mots enfin pour mes parents, ma sœur et mon beau-frère dont la confiance m'aura toujours permis d'avancer et d'assumer mes choix. J'espère que ce 16 décembre vous permettra d'entrer un peu dans « mon monde » et de comprendre mon emploi du temps parfois compliqué. J'espère que vous saurez vous sentir associés au travail présenté car vous êtes pour beaucoup dans celui-ci.

Yann.

Dans une prochaine vie, voire celle d'après...

Ce travail de thèse a fait l'objet des publications et des présentations suivantes

Publications dans des revues scientifiques internationales à comité de lecture

Hausswirth C, **Le Meur Y**, Couturier A, Bernard T & Brisswalter J. Accuracy and Repeatability of the Polar® RS800sd to Evaluate Stride Rate and Running Speed. *International Journal of Sports Medicine*. 2009; 30: 354-59.

Bernard T, Hausswirth C, **Le Meur Y**, Dorel S, Bignet F & Brisswalter J. Distribution of Power Output during the Cycling Stage of a Triathlon World Cup. *Medicine & Science in Sports & Exercise*. 2009; 41, 6: 1296-1302.

Le Meur Y, Hausswirth C, Dorel S, Bignet F, Brisswalter J & Bernard T. Influence of gender on pacing strategy adopted by elite triathletes during a competition. *European Journal of Applied Physiology*. 2009; 106:535-545.

Hausswirth C, **Le Meur Y**, Bieuzen F, Brisswalter J & Bernard T. Pacing strategy during the initial phase of the run in triathlon: influence on overall performance. *European Journal of Applied Physiology*. 2010; 108: 1115-1123.

Le Meur Y, Bernard T, Dorel S, Abbiss C, Honnorat G, Brisswalter J & Hausswirth C. Relationships between triathlon performance and pacing strategy during the run of an international competition. *International Journal of Sports Physiology and Performance*. *Sous presse*.

Le Meur Y, Bernard T, Dorel S, Brisswalter J & Hausswirth C. Why do triathletes stop during a maximal cycle-run test? A multicentric approach. *Soumis*.

Présentations dans des congrès internationaux avec actes

Le Meur Y, Hausswirth C, Brisswalter J & Bernard T. Effects of gender on pacing adopted by elite triathletes during a short distance triathlon. *European Congress of Sport Science*. Oslo, Norvège, 2009.

Bieuzen F, **Le Meur Y**, Dorel S, Brisswalter J & Hausswirth C. Does cycling affect motor coordination of the lower limbs during running to exhaustion in well-trained triathletes? *European Congress of Sport Sciences*. Oslo, Norvège, 2009.

Le Meur Y, Brisswalter J & Hausswirth C. Improving world class triathletes performance by optimizing pacing strategy in running. *International Federation of Medicine in Sport Congress*. San Juan, Porto Rico, 2010.

Autres publications et communications

Publications dans des revues scientifiques internationales à comité de lecture

Hausswirth C, Argentin S, Bieuzen F, **Le Meur Y**, Couturier A & Brisswalter J. Endurance and strength training effects on physiological and muscular parameters during prolonged cycling. *Journal of Electromyography and Kinesiology*. 2010;20(2):330-9.

Le Meur Y, Hausswirth C, Abbiss C, Baup Y & Dorel S. Performance factors in the new combined event of modern pentathlon. *Journal of Sports Sciences*. 2010;28(10):1111-1116.

Hausswirth C & **Le Meur Y**. Physiological aspects of post-exercise recovery period: is there a gender difference? *Sports Medicine. Soumis*.

Chapitres d'ouvrage

Le Meur Y, Hausswirth C, Blancon T, Mollard R, Palierne C & Sadys F. Modalités de récupérations actives et passives. In Récupération et Performance en Sport, sous la direction de C. Hausswirth, Ed. INSEP, 2010.

Couturier A, **Le Meur Y**, Huiban C, Saunier M & Ferrey FX. Massage et physiothérapie. In Récupération et Performance en Sport, sous la direction de C. Hausswirth, Ed. INSEP, 2010.

Le Meur Y & Hausswirth C. Modalities of passive and active recoveries. In Recovery and Performance in Sport, sous la direction de C. Hausswirth. Human Kinetics, à paraître.

Le Meur Y & Duffield R. Sleep, jetlag and recovery. In Recovery and Performance in Sport, sous la direction de C. Hausswirth. Human Kinetics, à paraître.

Le Meur Y & Hausswirth C. Appropriation par les STAPS des renouvellements en physiologie : l'exemple des modèles explicatifs de la fatigue. In Les STAPS face aux renouvellements théoriques contemporains, sous la direction de M. Quidu, Ed. Presses Universitaires de Nancy, à paraître.

TABLE DES MATIERES

INTRODUCTION GENERALE	1
CADRE THEORIQUE	5
1. Introduction	6
2. Les facteurs de la performance en triathlon distance Olympique	7
2.1. La consommation maximale d'oxygène	7
2.1.1. Définition	7
2.1.2. Critères de détermination de $\dot{V}O_{2\max}$	9
2.1.3. Expression de $\dot{V}O_{2\max}$ et modes de locomotion	9
2.1.4. Valeurs de $\dot{V}O_{2\max}$ rapportées chez les triathlètes	10
2.2. Les paramètres physiologiques lors d'épreuves sous-maximales	13
2.2.1. Le seuil d'accumulation de l'acide lactique	13
2.2.2. Les seuils ventilatoires	15
2.3. Le coût énergétique de la locomotion	20
2.3.1. Définition	20
2.3.2. Rendement et coût énergétique	20
2.3.3. Les différents indices du rendement en cyclisme	21
2.3.4. Définition du coût énergétique	23
2.3.5. Validité de la mesure du coût énergétique	24
2.3.6. Le coût énergétique et la performance	25
2.3.7. L'influence du <i>drafting</i> en triathlon	28
2.4. Les facteurs neuromusculaires	33
3. La modélisation des stratégies d'allure	36
3.1. Les stratégies d'allure décroissante	36
3.1.1. Les stratégies d'allure décroissante avec départ à intensité sous-maximale	36
3.1.2. Les stratégies d'allure décroissante avec départ à intensité maximale	39
3.2. Les stratégies d'allure croissante	40
3.3. Les stratégies d'allure constante	42
3.4. Les stratégies d'allure parabolique	43
3.5. Les stratégies d'allure variable	44
3.6. Les stratégies d'allure en triathlon distance Olympique	46
4. Les facteurs d'influence des stratégies d'allure	49
4.1. Les caractéristiques intrinsèques de l'activité sportive pratiquée	49

4.1.1. La durée de l'épreuve	49
4.1.2. L'influence des résistances à l'avancement.....	50
4.2. Les facteurs physiologiques.....	51
4.2.1. Les paramètres métaboliques	51
4.2.2. Les paramètres thermorégulateurs.....	55
4.2.3. Les paramètres musculaires	60
4.3. Les facteurs neurophysiologiques et perceptuels	62
4.3.1. L'état affectif et le niveau de motivation	63
4.3.2. Les feedbacks.....	68
4.3.3. Le niveau d'expérience	70
4.4. Les facteurs environnementaux	72
4.4.1. Le vent et les courants marins.....	72
4.4.2. Le profil du parcours.....	73
4.5. Les autres facteurs d'influence	75
4.5.1. Le sexe	75
4.5.2. Les facteurs anthropométriques	75
4.5.3. Les facteurs socio-culturels	77
5. Vers un modèle explicatif des stratégies d'allure.....	79
5.1. La difficulté d'effort perçue : le paramètre clé ?	79
5.1.1. La difficulté d'effort perçue, variable régulatrice de la performance lors des exercices à intensité constante	79
5.1.2. La difficulté d'effort perçue, variable régulatrice de la performance et des systèmes physiologiques lors des exercices librement gérés	81
5.2. Le modèle « Anticipation – Difficulté d'Effort Perçue – Feedbacks » (Tucker, 2009).....	83
5.2.1. Application aux exercices à intensité fixe.....	83
5.2.2. Application aux exercices librement gérés	85
5.2.3. Application aux protocoles imposant une difficulté perçue constante.....	89
5.2.4. Application au paradoxe de l'accélération finale	91
5.2.5. Application aux effets des drogues psycho-actives sur la performance	92
5.2.6. Application aux protocoles manipulant les informations fournies aux sujets.....	93
5.3. Stratégie d'allure et compréhension de la fatigue aigüe engendrée par l'exercice : intérêts et limites du modèle du Gouverneur Central (Noakes et al. 2004).....	95
5.3.1. Le modèle du Gouverneur Central	95
5.3.2. Critiques du modèle du Gouverneur Central.....	98
HYPOTHESES DE TRAVAIL & OBJECTIFS DE LA RECHERCHE	106

MATERIELS ET OUTILS UTILISES LORS DES TRAVAUX EXPERIMENTAUX	109
1. Recueil des variables cinématiques et biomécaniques	110
1.1. Mesure de la vitesse en natation (étude 2).....	110
1.2. Mesures de la vitesse, de la cadence et de la puissance de pédalage en cyclisme (études 1,2 et 5).....	110
1.2.1. En laboratoire	110
1.2.2. En compétition	111
1.3. Mesure de la vitesse en course a pied (études 2, 3, 4 et 5) et validation du système Polar RS800sd® ...	111
1.3.1. En laboratoire	111
1.3.2. En compétition	111
1.4. Mesure des temps de contact et de vol en course à pied (étude 5)	112
2. Recueil des variables métaboliques.....	112
2.1. Recueil des échanges gazeux et respiratoires (etudes 1, 2, 3 et 5)	112
2.2. Mesure de la fréquence cardiaque (études 1, 3 et 5).....	113
2.3. Mesure de la lactatémie (etudes 4 et 5).....	113
3. Recueil des variables électromyographiques (étude 5)	113
4. Recueil des variables perceptuelles.....	114
PRESENTATION DES TRAVAUX EXPERIMENTAUX	115
1. Etude n°1 : Distribution de la puissance de pédalage lors de la partie cycliste d'une épreuve de coupe du monde de triathlon (<i>publiée dans Medicine & Science in Sports & Exercise, 2009, 41 :1296-1302</i>).....	116
1.1. But de l'étude	117
1.2. Méthodes.....	117
1.2.1. Sujets	117
1.2.2. Evaluations en laboratoire.....	118
1.2.3. Evaluation lors de la compétition	119
1.3. Analyse statistique.....	120
1.4. Résultats	120
1.4.1. Vitesse, cadence, puissance de pédalage et fréquence cardiaque durant la compétition	120
1.4.2. Puissance de pédalage et fréquence cardiaque durant la compétition au regard des tests maximaux réalisés en laboratoire	122
1.5. Discussion partielle	123
2. Etude n°2 : Influence du sexe sur le choix des stratégies d'allure lors d'une épreuve internationale de triathlon (<i>publiée dans European Journal of Applied Physiology, 2009, 106 :535-545</i>).....	125
2.1. But de l'étude	126
2.2. Méthodes.....	127

2.2.1. Mesures réalisées avant la compétition	127
2.2.2. Mesures réalisées durant la compétition	127
2.3. Analyse statistique	129
2.4. Résultats	129
2.4.1. Performance globale et position	129
2.4.2. Section natation	130
2.4.3. Section cyclisme	130
2.4.4. Section course à pied	132
2.5. Discussion partielle	134
3. Etude n°3 : Influence de la stratégie d'allure adoptée lors de la phase initiatrice de la course à pied sur la performance globale en triathlon (<i>publiée dans European Journal of Applied Physiology, 2010, 108 :1115-1123</i>)	135
3.1. But de l'étude	136
3.2. Méthodes	136
3.2.1. Test maximal en course à pied	137
3.2.2. Course contrôle	137
3.2.3. Compétitions de triathlon	138
3.3. Analyse statistique	139
3.4. Résultats	140
3.4.1. Charge d'entraînement	140
3.4.2. Performances	140
3.4.3. Paramètres physiologiques	141
3.4.4. Effets de la stratégie d'allure	142
3.5. Discussion partielle	143
4. Etude n°4 : Relations entre performance et stratégie d'allure en course à pied lors d'un triathlon international (<i>publiée dans International Journal of Sports Physiology and Performance, sous presse</i>)	144
4.1. But de l'étude	145
4.2. Méthodes	146
4.2.1. Participants	146
4.2.2. Procédures	147
4.2.3. Traitement des données	147
4.3. Analyse statistique	148
4.4. Résultats	148
4.4.1. Performance globale	148

4.4.2. Vitesse de course	148
4.4.3. Variabilité de la vitesse de course	150
4.5. Discussion partielle	153
5. Etude n°5 : Evolution des paramètres métaboliques, neuromusculaires, biomécaniques et perceptuels lors d'une épreuve cyclisme-course à pied menée à l'épuisement volontaire par des triathlètes entraînés (<i>en cours d'expertise</i>)	154
5.1. But de l'étude	155
5.2. Méthodes.....	156
5.2.1. Protocole experimental.....	157
5.2.2. Traitement des données.....	161
5.3. Analyse statistique.....	161
5.4. Résultats	162
5.4.1. Performance	Erreur ! Signet non défini.
5.4.2. Paramètres physiologiques	Erreur ! Signet non défini.
5.4.3. Paramètres électromyographiques	Erreur ! Signet non défini.
5.4.4. Paramètres cinématiques.....	Erreur ! Signet non défini.
5.4.5. Raideur du membre inférieur	Erreur ! Signet non défini.
5.4.6. Difficulté d'effort perçue	Erreur ! Signet non défini.
5.5. Discussion partielle	Erreur ! Signet non défini.
DISCUSSION GENERALE ET PERSPECTIVES SCIENTIFIQUES	163
1. Décrire les stratégies d'allure en triathlon à haut niveau	164
1.1. En natation.....	165
1.2. En cyclisme.....	165
1.3. En course à pied.....	169
2. Optimiser les stratégies d'allure en triathlon à haut niveau	170
3. Comprendre les stratégies d'allure en triathlon : vers une approche multicentrique de la fatigue ?	176
4. Conclusion générale et perspectives	181
REFERENCES	183

INTRODUCTION GENERALE

« CITIUS, ALTIUS, FORTIUS »

L'accomplissement d'un exercice physique exige l'ajustement de nombreuses fonctions de l'organisme dont la sollicitation dépend de l'intensité, de la durée, de la fréquence de l'exercice ainsi que des caractéristiques spécifiques de l'activité pratiquée. L'athlète doit ainsi s'adapter aux diverses sollicitations mécaniques, physiologiques et psychoaffectives auxquelles il est confronté pour atteindre son plus haut niveau de performance. L'analyse des records du monde dans les activités cycliques - qui assurent la reproduction d'un cadre stable d'expression de la performance sportive au fil du temps (exception faite des modifications réglementaires et des progrès technologiques concernant le matériel) - révèlent à cet égard une progression des performances sportives depuis le début du vingtième siècle (Berthelot et al. 2008).

Récemment, Berthelot et al. (2008) ont effectué une étude portant sur l'évolution des performances dans les principales disciplines Olympiques en analysant 3 263 records du monde dans 158 épreuves depuis les premiers Jeux Olympiques modernes de 1896 jusqu'en 2007. Cette analyse prenant en compte les améliorations techniques, nutritionnelles, médicales et pharmacologiques a permis de tracer une courbe d'évolution des performances dans 148 épreuves Olympiques de natation, d'athlétisme, de cyclisme, de patinage de vitesse et d'haltérophilie ([Figure 1](#)).

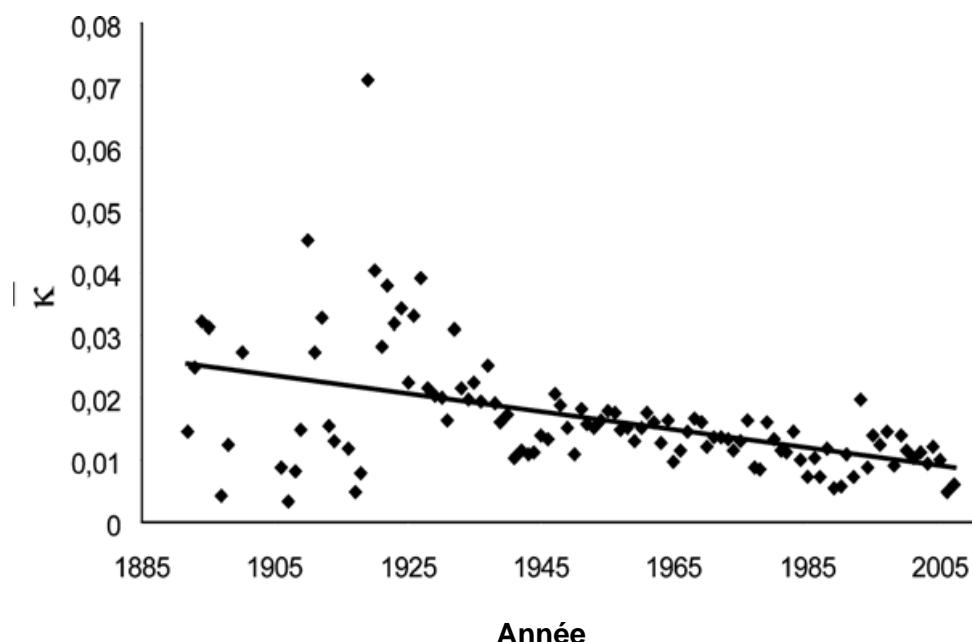


Figure 1. Evolution annuelle des améliorations des records du monde lors d'épreuves d'haltérophilie, de natation, de cyclisme, d'athlétisme et de patinage de vitesse depuis 1896 jusqu'en 2007. Le coefficient de progression (\bar{k}) a diminué de 0,024 lors de la période [1896-1915] à 0,010 lors de la période [1995-2007] (modèle de régression linéaire : $y = -1.46 \times 10^{-4} x + 0.301$, $F(1,102)=27,14$, $p < 0,001$). Cette baisse est représentative de l'augmentation de la difficulté à améliorer les records du monde. *D'après Berthelot et al. (2008).*

Cette courbe montre que la progression du record pour chaque épreuve tendrait vers une limite absolue qui serait la limite d'une espèce et non celle d'un individu singulier (Berthelot et al. 2008).

Pour ces auteurs, les records n'atteignaient que 75 % de leur valeur maximale asymptotique estimée en 1896 contre 99 % en 2007. Cette analyse a par ailleurs révélé une phase de progression soutenue jusqu'aux années 1979 avant l'apparition d'une phase de ralentissement. D'après ce modèle statistique, les limites physiologiques humaines seront atteintes dans une génération et la moitié des records mondiaux ne seront pas améliorés de plus de 0,05% d'ici 2027. Dans cette perspective, il semble que les athlètes auront de plus en plus de difficultés dans les prochaines années à relever le défi de la devise Olympique « *Citius, Altius, Fortius* » (Berthelot et al. 2008).

Berthelot et al. (2010) ont récemment prolongé cette analyse en montrant que 64% des records du monde en athlétisme n'ont pas augmenté depuis 1993, tandis que 47% des épreuves de natation ont stagné après 1990, avant d'une nouvelle phase progression débute en 2000 (Figure 2). Depuis, 100% des records du monde de cette discipline ont été battus durant la période d'autorisation des combinaisons néoprène.

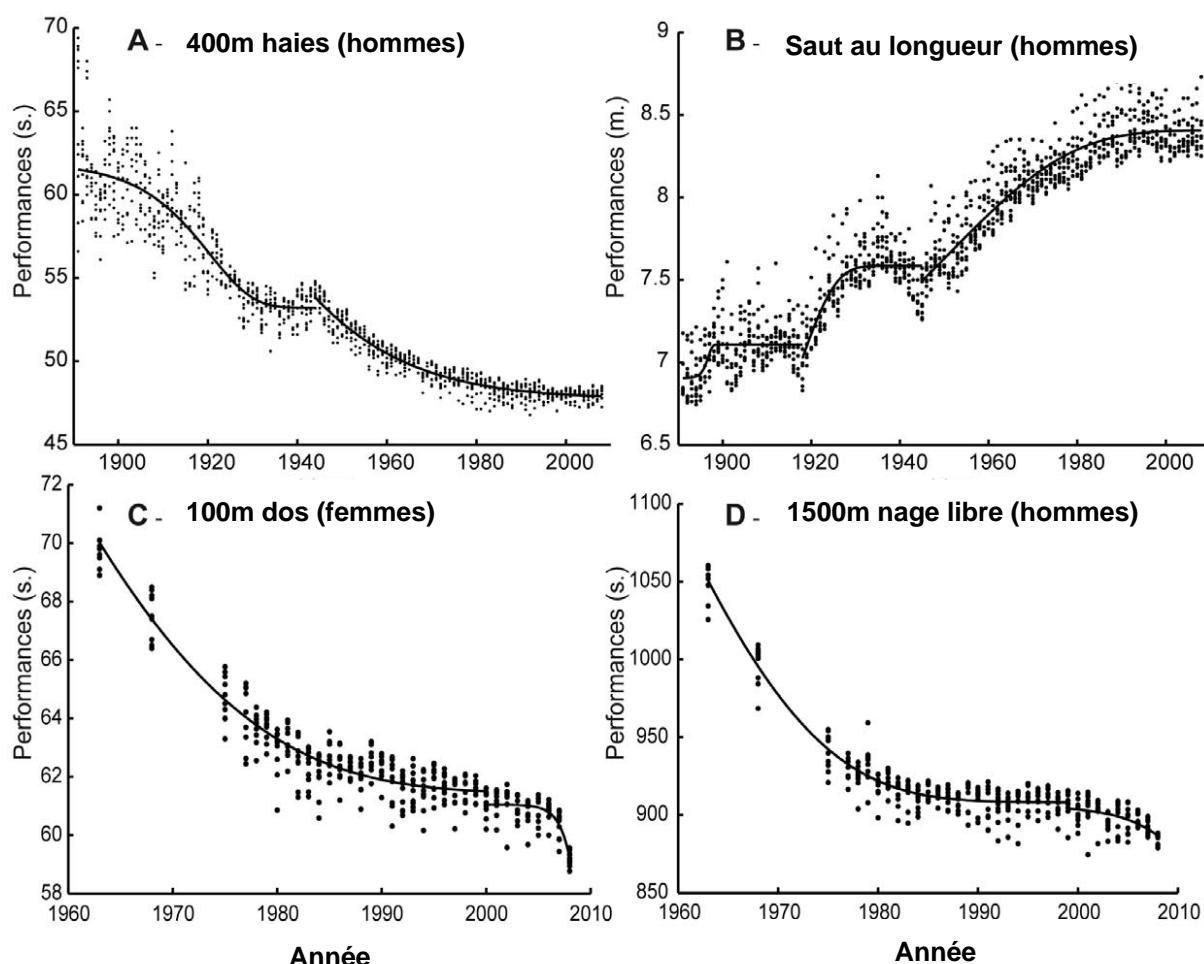


Figure 2. Modélisations de l'évolution des records du monde dans 4 disciplines olympiques (400m haies masculins et saut en longueur masculin ; 100m dos féminin et 1500m nage libre) entre 1963 et 2008. *D'après Berthelot et al. (2010).*

Si ces modélisations mathématiques montrent que les progrès technologiques peuvent contribuer à une amélioration de la performance sportive à très haut niveau, elles confirment surtout qu'il devient de plus en plus difficile d'en repousser les limites autrement que par l'intermédiaire de ce type d'innovations (Berthelot et al. 2010). A notre sens, ces résultats suggèrent aussi qu'il devient aujourd'hui incontournable de continuer à accroître notre compréhension des facteurs de la performance sportive, pour permettre aux sportifs « élite » de continuer à progresser, sans avoir à recourir à des stratégies conduisant au dopage.

Le triathlon distance Olympique, consistant en l'accomplissement de 1,5km de natation, de 40km de cyclisme et de 10km de course à pied, a suivi cette tendance. Une analyse du nombre de publications scientifiques ayant concerné cette discipline sportive révèle en effet qu'une trentaine d'études sont désormais publiées chaque année (Millet et al. 2007). Celles-ci ont principalement été fondées sur des protocoles de laboratoire destinés à étudier l'influence de la natation et du cyclisme sur l'évolution des paramètres physiologiques et biomécaniques sur le mode de locomotion subséquent. La miniaturisation des outils de mesure (capteurs de puissance, accéléromètres, systèmes de localisation par satellites, cardiofréquencemètres) semblent néanmoins pouvoir aujourd'hui permettre d'affiner la caractérisation *in situ* des exigences associées à la compétition en triathlon au plus haut niveau (Millet et al. 2007).

La première partie de notre travail a pour but essentiel de rappeler les facteurs de la performance dans les activités de longue durée, notamment en triathlon distance Olympique, en concentrant principalement notre attention sur l'influence des stratégies d'allure. Afin d'appréhender plus en détails la relation entre la distribution du travail et la performance réalisée en triathlon, nous analyserons dans une seconde partie les facteurs qui influencent ce rapport, de sorte à proposer les bases d'un modèle explicatif des stratégies d'allure dans les activités sportives cycliques.

CADRE THEORIQUE

**LES STRATEGIES D'ALLURE COMME FACTEURS DE LA
PERFORMANCE DANS LES ACTIVITES DE LONGUE DUREE**

DESCRIPTION ET COMPREHENSION

1. INTRODUCTION

Depuis les années 1980, l'essor du triathlon a mené les scientifiques et les entraîneurs à questionner les caractéristiques physiologiques et/ou biomécaniques régulant la performance dans cette activité (Hausswirth et Brisswalter 2008; Hausswirth et Lehenaff 2001; Millet et al. 2007). Généralement considéré comme un sport d'endurance, le triathlon partage en apparence un grand nombre de similitudes avec les courses de longue durée (Hausswirth et al. 1996; Laurenson et al. 1993a), mais possède aussi ses propres particularités (Hausswirth et Lehenaff 2001; O'Toole et al. 1989). D'un point de vue général, la consommation maximale d'oxygène ($\dot{V}O_{2\max}$) s'impose comme un indicateur déterminant du niveau de performance des triathlètes. Néanmoins, de nombreuses études ont révélé que $\dot{V}O_{2\max}$ n'incarne pas le seul facteur qui influence la position à l'arrivée des épreuves de longue durée (Foster et Lucia 2007; Hausswirth et Brisswalter 2008; Hausswirth et Lehenaff 2001). Plusieurs recherches ont en effet mis en exergue des différences de performance significatives entre des athlètes d'endurance démontrant des valeurs de $\dot{V}O_{2\max}$ similaires ou, à l'inverse, des niveaux de performance équivalents malgré des valeurs de $\dot{V}O_{2\max}$ différentes (Daniels 1985; Sjodin et Svedenrag 1985). Il apparaît ainsi que si la valeur de $\dot{V}O_{2\max}$ est corrélée positivement avec la performance réalisée lors d'activités de longue durée comme le marathon (Farrell et al. 1979) ou le triathlon (Butts et al. 1991a), cette variable ne peut pas entièrement expliquer les variations de performance constatées entre les spécialistes d'une activité sportive donnée. D'autres facteurs influencent en effet la performance dans les activités de longue durée. Il s'agit notamment du pourcentage maximal de $\dot{V}O_{2\max}$ soutenu lors d'un exercice de durée donnée, du rendement énergétique lors du déplacement et de la capacité neuromusculaire à produire de la force. Néanmoins, une analyse des différentes corrélations existantes entre l'ensemble de ces paramètres et la performance dans les activités de longue durée apparaît insuffisante pour expliquer complètement les différences de performance entre les athlètes (Nummela et al. 2006). De récentes études ont mis en exergue que la stratégie d'allure adoptée lors de l'épreuve influence elle-même significativement la performance dans les activités cycliques de locomotion.

2. LES FACTEURS DE LA PERFORMANCE EN TRIATHLON DISTANCE OLYMPIQUE

Le triathlon est une discipline sportive d'endurance multivariée consistant à parcourir une distance fixée plus rapidement que ses adversaires, en enchaînant trois modes de locomotion différents: la natation, le cyclisme et la course à pied. Le **Tableau 1** présente les différents formats de course sur lesquels reposent les compétitions de triathlon au niveau international.

Formats de compétition	Natation	Cyclisme	Course à pied
Sprint	750m	20km	5km
Courte distance (ou « distance Olympique »)	1500m	40km	10km
Moyenne distance	3000m 1900m	80km 90km	20km 21,1km
Longue distance	4000m 3800m	120km 180km	30km 42,2km

Tableau 1. Formats officiels de compétition en triathlon édictés par les instances internationales (International Triathlon Union, ITU ; World Triathlon Corporation, WTC).

L'épreuve Olympique de triathlon mise en place en l'an 2000 à Sydney est réalisée sur le format « courte distance », avec l'autorisation pour les triathlètes d'adopter une position abritée derrière un ou plusieurs concurrents dans les trois disciplines (*i.e.* le *drafting*). La durée de l'épreuve variant entre 1h45min et 2h environ, chez les hommes et les femmes « élite » respectivement, les facteurs de performance en triathlon distance Olympique sont très similaires de ceux constatés pour les épreuves de longue durée en natation, en cyclisme et en course à pied. Pour autant, la nécessité d'assurer l'enchaînement optimal des trois disciplines et l'autorisation du *drafting* font du triathlon une discipline à part entière, révélant des facteurs de performance qui lui sont spécifiques.

2.1. LA CONSOMMATION MAXIMALE D'OXYGENE

2.1.1. DEFINITION

La notion de « consommation maximale d'oxygène » ($\dot{V}O_{2\max}$) a été définie pour la première fois par Hill et Lupton (1923) dans les années 1920 comme le plus haut débit auquel l'oxygène peut être prélevé et utilisé par l'organisme lors d'un exercice d'intensité sévère. Le paradigme de l'existence d'une consommation maximale d'oxygène a été établi à l'époque en considérant :

- qu'il existe une limite haute de la valeur de $\dot{V}O_2$,
- qu'il existe des différences interindividuelles de $\dot{V}O_{2\text{max}}$,
- qu'une haute valeur de $\dot{V}O_{2\text{max}}$ est requise pour atteindre un haut niveau de performance dans les activités de course de moyenne et de longue durée,
- que la valeur de $\dot{V}O_{2\text{max}}$ est limitée par la capacité du système cardiovasculaire à transporter l'oxygène jusqu'aux muscles actifs.

En 1924, Hill et al. ont mesuré $\dot{V}O_2$ chez un sujet, auquel il était demandé de courir de plus en plus vite. Les résultats ont révélé que la valeur de $\dot{V}O_2$ atteinte pour une allure de $243\text{m}.\text{min}^{-1}$ n'était pas dépassée lorsque la vitesse était augmentée à 259, 267, 271 voire $282\text{m}.\text{min}^{-1}$. Ces auteurs ont conclu qu'à des allures de course élevées, $\dot{V}O_2$ atteint une valeur maximale qu'il n'est pas possible de dépasser, y compris en augmentant l'intensité de l'exercice ([Figure 3](#)).

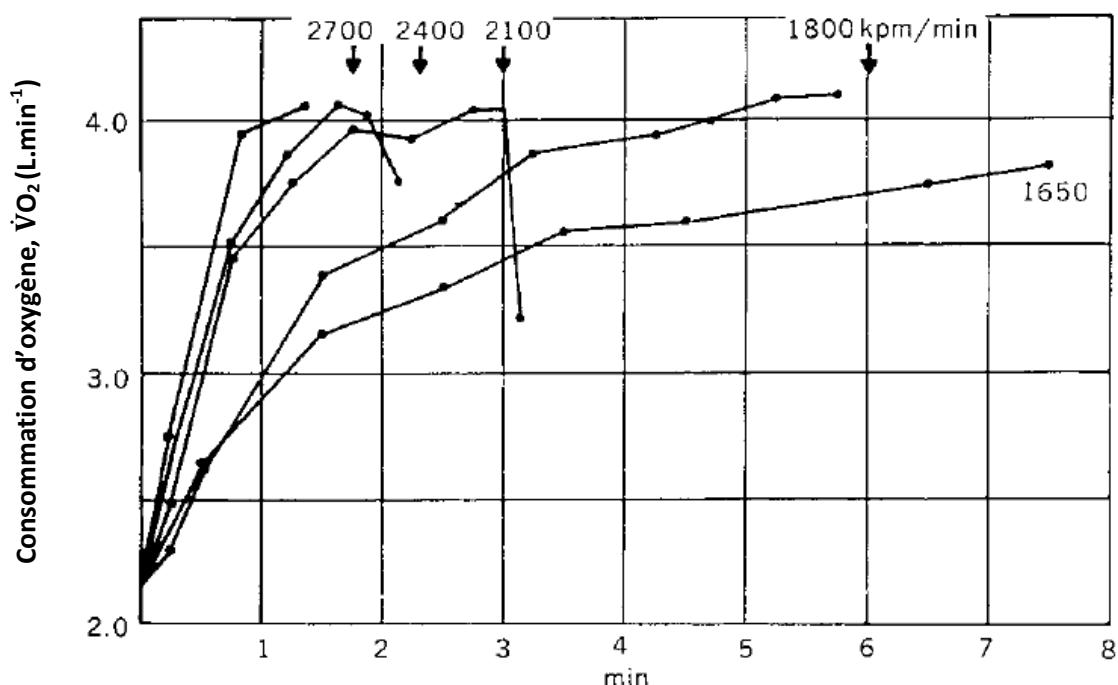


Figure 3. Cinétiques de la consommation d'oxygène lors d'exercices maximaux réalisés à différentes puissances de pédalage sur ergocycle. Les flèches représentent le moment où le sujet a stoppé l'exercice en raison de l'atteinte d'un état d'épuisement. La puissance développée (kpm/min) lors de chaque test est mentionnée sur chaque courbe. Lorsque la puissance imposée était de 275W, le sujet était capable de poursuivre l'exercice au-delà de 8 minutes. *D'après Åstrand et Rodahl (1970).*

Aujourd'hui, il est universellement accepté qu'il existe une limite physiologique supérieure de la capacité de l'organisme à consommer de l'oxygène. Åstrand et Saltin (1961) ont montré lors d'un protocole discontinu, qu'il n'est pas possible de dépasser cette valeur maximale de $\dot{V}O_2$ en augmentant l'intensité d'exercice. Ces résultats ont révélé que la cinétique de $\dot{V}O_2$ est modifiée par

l'intensité d'exercice, de sorte que plus celle-ci est élevée, plus $\dot{V}O_{2\max}$ est atteint rapidement. Pour autant, quelle que soit l'intensité d'exercice imposée, cette valeur maximale reste identique. Cette découverte avait été prédite par Hill et Lupton (1924), qui avaient postulé que « ...quelque que soit la vitesse (ou la charge de travail) imposée au-delà de cette limite, aucune augmentation supplémentaire de la consommation d'oxygène ne peut se produire ».

Cette limite supérieure est principalement déterminée par le volume d'éjection systolique maximal, le volume sanguin total, la densité capillaire et la densité mitochondriale des muscles actifs dans l'activité sportive de référence (Costill et al. 1976). De tous, le facteur limitant principal est le volume d'éjection systolique (Coyle et al. 1984; Ekblom et Hermansen 1968).

2.1.2. CRITERES DE DETERMINATION DE $\dot{V}O_{2\max}$

Au cours d'un exercice d'intensité croissante, $\dot{V}O_2$ augmente linéairement avec la puissance développée jusqu'à atteindre une valeur limite qui reste constante malgré l'augmentation de la puissance imposée. Pour Howley et al. (1995), la valeur de $\dot{V}O_{2\max}$ ne peut être déterminée que si les critères suivants sont remplis :

- les changements de $\dot{V}O_2$ doivent rester inférieurs à $2,1mLO_2 \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$ malgré l'augmentation de l'intensité de l'exercice ;
- le quotient respiratoire doit être supérieur à 1,1 ;
- la fréquence cardiaque maximale théorique ($220 - \text{âge}$) doit être atteinte ;
- la lactatémie doit être supérieure à 8mM.L^{-1} .

2.1.3. EXPRESSION DE $\dot{V}O_{2\max}$ ET MODES DE LOCOMOTION

Etant donné que les trois disciplines constitutives du triathlon se distinguent de part les masses musculaires qu'elles sollicitent, et donc par la quantité d'énergie qu'elles nécessitent pour assurer la locomotion, différentes méthodes de normalisation de $\dot{V}O_{2\max}$ sont nécessaires pour caractériser la valeur de chacune d'entre elles.

Bien que des études ont démontré que la valeur absolue de $\dot{V}O_{2\max}$ est corrélée avec la performance réalisée sur une épreuve de nage de 400m (Chatard et al. 1990), Costill et al. (1985) ont mis en évidence que le coefficient de corrélation est plus élevé ($r = 0,74$ vs. $0,47$) lorsque la valeur de $\dot{V}O_{2\max}$ est exprimée relativement au poids du corps (pour une distance similaire de 365,8 m). Une étude de Ribeiro et al. (1990) a de plus rapporté une faible corrélation entre la valeur absolue de $\dot{V}O_{2\max}$ et la performance sur 400m nage libre en natation. Ainsi, la valeur relative de $\dot{V}O_{2\max}$ semble plus

appropriée pour caractériser $\dot{V}O_{2\max}$ chez des triathlètes en natation. Sleivert et Wenger (1993) ont par ailleurs montré que la performance en natation lors d'un triathlon est corrélée à la valeur relative de $\dot{V}O_{2\max}$ mais non à la valeur absolue de cette variable. L'analyse des valeurs de $\dot{V}O_{2\max}$ en natation chez les triathlètes est aussi compliquée par le fait que, par rapport au cyclisme et à la course à pied, la natation requiert un plus haut degré d'entraînement spécifique pour atteindre de hautes valeurs de $\dot{V}O_{2\max}$ et qu'elle profite moins des bénéfices de l'entraînement croisé engendré par le cyclisme et la course à pied (Millet et al. 2002a).

Durant le cyclisme, le poids du corps tout entier est porté par le vélo, de sorte qu'une plus haute valeur absolue de $\dot{V}O_{2\max}$ pourrait apparaître avantageuse. Pourtant, il semble plus judicieux de prendre en compte les caractéristiques topographiques du parcours de l'épreuve cycliste ciblée pour déterminer le paramètre de comparaison à choisir. Les cyclistes professionnels au profil « grimpeur » démontrent en effet de hautes valeurs relatives de $\dot{V}O_{2\max}$ (et une plus faible masse corporelle) par rapport aux spécialistes d'épreuves contre-la-montre, malgré de plus faibles valeurs absolues de $\dot{V}O_{2\max}$ (Lucia et al. 2000). Les cyclistes spécialistes des épreuves montagneuses démontrent par ailleurs un meilleur ratio entre leur puissance maximale aérobie et leur masse corporelle que les spécialistes d'épreuves de plaine, mais cette supériorité s'inverse lorsque l'on considère la valeur absolue de leur puissance maximale aérobie (Padilla et al. 1999).

En course à pied, le poids joue un rôle prépondérant quelque soit le profil du parcours et du triathlète. Bien que Costill et al. (1985) aient rapporté une relation significative aussi bien entre les valeurs absolue et relative de $\dot{V}O_{2\max}$ d'une part, et la performance en course à pied d'autre part, une plus forte corrélation est constatée entre la performance et la valeur relative de $\dot{V}O_{2\max}$ qu'entre la performance et la valeur absolue de $\dot{V}O_{2\max}$ ($r = 0,83$ vs. $0,59$, respectivement). Généralement, les valeurs de $\dot{V}O_{2\max}$ entre les coureurs et les triathlètes en course à pied sont rapportées en valeurs relatives (Suriano et Bishop 2010), étant donné qu'il est reconnu qu'un excès de masse grasse voire de masse musculaire est délétère pour la performance dans cette discipline.

2.1.4. VALEURS DE $\dot{V}O_{2\max}$ RAPPORTÉES CHEZ LES TRIATHLETES

Les valeurs moyennes de $\dot{V}O_{2\max}$ rapportées chez les sportifs d'endurance « élite » sont généralement comprises entre $5,0$ et $5,5 L \cdot min^{-1}$ ou 70 et $80 mL \cdot min^{-1} \cdot kg^{-1}$ (Billat et al. 2001a; Lucia et al. 2000; Robinson et al. 1937; Saltin et Astrand 1967), soit 1,5 à 2 fois celles d'individus sédentaires. Ces valeurs sont toutefois 10% inférieures chez les athlètes d'endurance féminines de haut niveau en raison de leur plus faible hémoglobinémie et de leur plus grand pourcentage de masse grasse (Durstine et al. 1987; Pollock et al. 1977; Saltin et Astrand 1967).

Les profils physiologiques de triathlètes membres d'équipes nationales impliqués participant à des compétitions de niveau international ont été décrits par trois recherches scientifiques au cours de la dernière décennie (Hue et al. 2000b; Laurenson et al. 1993a; Millet et Bentley 2004; Schabot et al. 2000). Les valeurs moyennes relatives de $\dot{V}O_{2\max}$ rapportées en cyclisme et en course à pied étaient respectivement comprises entre $61,0 - 61,3 \text{ mL} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$ et $63,2 - 65,6 \text{ mL} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$ chez les femmes, et $69,9 - 75,9 \text{ mL} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$ et $74,7 - 78,7 \text{ mL} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$ chez les hommes. Ces valeurs sont comparables à celles rapportées chez des cyclistes (Lucia et al. 2000) et des coureurs (Billat et al. 2001a) participant à des compétitions d'un niveau similaire. L'ensemble de ces résultats indiquent que les triathlètes de haut niveau révèlent des valeurs de $\dot{V}O_{2\max}$ caractéristiques de celles habituellement constatées chez des sportifs de haut niveau spécialistes d'activités de longue durée.

Une méta-analyse de la littérature a récemment montré que les triathlètes possèdent des valeurs de $\dot{V}O_{2\max}$ en natation et en cyclisme équivalentes respectivement à 74 – 86% et 94 – 97% de leur valeur maximale atteinte en course à pied (Suriano et Bishop 2010). Ces résultats présentés dans le [Tableau 2](#) sont consistants avec l'observation d'une plus grande valeur de $\dot{V}O_{2\max}$ en course à pied qu'en cyclisme, et que ces deux valeurs sont classiquement supérieures à celles mesurées en natation. Ce constat semble lié à la plus grande masse musculaire recrutée en course à pied par rapport au cyclisme et à la natation. Une corrélation positive entre $\dot{V}O_2$ et la quantité de masse musculaire active durant l'exercice a en effet été montrée par Lewis et al. (1983). Par ailleurs, la course à pied constitue bien souvent la discipline d'origine de la plupart des triathlètes, ce qui est susceptible d'avoir limité leur capacité à atteindre des adaptations physiologiques similaires en cyclisme et en natation (Kohrt et al. 1989).

Ces différences de valeurs de $\dot{V}O_{2\max}$ dans les trois disciplines du triathlon semblent moins perceptibles chez les triathlètes pour lesquels le triathlon a constitué la pratique sportive d'origine. Le profil physiologique de 29 triathlètes ($20,9 \pm 2,6$ ans) s'étant toujours entraînés uniquement en triathlon a été décrit par Hue et al. (2000b). Leurs résultats n'ont pas révélé de différence significative entre les valeurs de $\dot{V}O_{2\max}$ mesurées sur ergocycle et sur tapis roulant ($69,1 \pm 7,2$ et $70,2 \pm 6,2 \text{ mL} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$, respectivement). Cette homogénéité des capacités aérobies des triathlètes a de plus été corroborée par une étude menée par Vercruyssen et al. (2002) sur 8 jeunes triathlètes de niveau interrégional (d'un âge moyen de $24,0 \pm 3,0$ ans). Ces résultats semblent s'expliquer par les bénéfices associés à l'entraînement croisé « cyclisme-course à pied » (Millet et al. 2002a).

ETUDE	SUJETS	AGE (années)	PROFIL	COURSE A		CYCLISME		NATATION	
				PIED $\dot{V}O_{2\max}$	CYCLISME $\dot{V}O_{2\max}$	% CàP	NATATION $\dot{V}O_{2\max}$	% CàP	
Kohrt et al. (1987)	M = 13	29,5 ± 4,8	Varié	60,5 ± 5,6	57,9 ± 5,7	95,7	52,5 ± 5,2 na	86,6	
Kreider et al. (1988b)	M = 9	27,6 ± 10,6	Varié	68,1 ± 11,9	64,3 ± 8,5	94,4	51,0 ± 7,8 na	74,9	
Loftin et al. (1988)	M = 14	36,0 ± 9,9	Amateurs	49,7 ± 7,5	43,6 ± 8,1	87,7	31,5±6,2 pb	63,4	
Albrecht et al. (1989)	M = 9	NR	Expérimentés	57,6	56,2	97,6	30,4 sb	52,8	
Dengel et al. (1989b)	M = 11	31,4 ± 1,8	Varié	65,3 ± 1,3	63,2 ± 1,7	96,8	56,7 ± 1,8 rec	86,8	
Kohrt et al. (1989)	M = 8	29,4 ± 5,1	Compétiteurs	58,4 ± 1,4	56,0 ± 1,3	95,9	47,8 ± 1,7 na	81,8	
O'Toole et al. (1989)	M = 14	40 ± 11	Ultra-endurance	NR	57,4 ± 7,5	NR	NR	NR	
Schneider et al. (1990)	M = 10	27,6 ± 6,3	Très entraînés	75,4 ± 7,3	70,3 ± 6,0	93,2	NR	NR	
Butts et al. (1991b)	M = 16	22,1 ± 3,2	Amateurs	62,0 ± 8,4	56,5 ± 8,5	91,1	51,5 ± 5,4 na	83,1	
Laurenson et al. (1993b)	F = 10	27,1 ± 3,5	Elite	65,6 ±6,0	NR	NR	NR	NR	
Sleivert et Wenger (1993)	M = 18	27,7 ± 1,3	Varié	63,7 ± 1,6	60,1 ± 1,5	94,3	49,9 ± 1,4 na	78,3	
Danner et Plowman (1995)	F = 13	27,5 ± 3,4	Varié	56,0 ± 5,8	50,0 ± 7,1	89,3	NR	NR	
De Vito et al. (1995)	M = 6	27,0 ± 5,0	Entraînés	69,0 ±5,0	NR	NR	NR	NR	
Bunc et al. (1996)	M= 23	17,7 ± 2,2	Jeunes élites	67,9 ± 5,9	NR	NR	NR	NR	
Miura et al. (1997)	M = 17	26,5 ± 8,2	Entraînés	63,8 ± 8,1	61,1 ± 8,1	95,8	57,7 ± 6,8 nb	90,4	
Rowbottom et al. (1997)	M = 8	29,6 ± 2,6	Entraînés	67,3 ± 2,2	NR	NR	NR	NR	
Zhou et al. (1997)	M = 10	27,4 ± 5,7	Amateurs	63,3 ± 2,8	61,2 ± 3,2	96,7	NR	NR	
Bentley et al. (1998)	M = 10	24,2 ± 4,2	Amateurs	NR	64,7 ± 5,1	NR	NR	NR	
Bassett et Boulay (2000)	M = 6	21,3 ± 1,6	Entraînés	66,9 ± 3,7	64,6 ± 2,6	96,6	NR	NR	
Hue et al. (2000b)	M = 29	20,9 ± 2,6	Compétiteurs	70,2 ± 6,2	69,1 ± 7,2	98,4	NR	NR	
Hue et al. (2000a)	M = 13	23,1 ± 1,2	Compétiteurs	68,8 ± 1,8	67,2 ± 1,6	97,7	NR	NR	
Schabot et al. (2000)	M = 5	23,0 ± 4,0	Elite	74,7 ± 5,3	69,9 ± 4,5	93,6	NR	NR	
Vercruyssen et al. (2002)	M = 8	24,0 ± 3,0	Très entraînés	69,9 ± 5,5	68,7 ± 3,2	98,3	NR	NR	
Bentley et al. (2003)	M = 8	26,2 ± 3,4	Assez Entraînés	60,3 ± 12,9	60,6 ± 10,8	100,5	NR	NR	
Hue et al. (2003)	M = 8	24,7 ± 2,1	Elite	71,8 ± 7,6	70,5 ± 6,5	98,2	NR	NR	
Roels et al. (2003)	M = 10	22,6 ± 3,6	Entraînés	NR	68,2 ± 6,8	NR	53,0 ± 6,7	NR	
Peeling et al. (2005b)	M = 9	21,2 ± 2,6	Très Entraînés	NR	68,8 ± 8,1	NR	NR	NR	
Tew et al. (2005)	M = 8	38,9 ± 15,4	Entraînés	NR	71,9 ± 5,1	NR	NR	NR	
Van Schuylenbergh et al. (2004)	M = 10	21,8 ± 0,3	Entraînés	5,1 ± 0,2 *	5,0 ± 0,2 *	98,0			
Vercruyssen et al. (2005)	M = 8	28,9 ± 7,4	Entraînés	68,9 ± 4,6	67,6 ± 4,9	98,1	NR	NR	
Mean		26,5 ± 5,0			64,2 ± 7,2	61,8 ± 7,6	95,4	47,1 ± 8,7	78,3

Tableau 2. Comparaison des valeurs de $\dot{V}O_{2\max}$ ($\text{mL} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$) mesurées en course à pied, en cyclisme et en natation chez des triathlètes. H = Hommes, F = Femmes, NR = non rapporté, na = nage attachée, pb = pédalage avec les bras, nb = nage sur un banc, rec = $\dot{V}O_{2\max}$ extrapolé à partir de l'air collecté durant les premières 20s de récupération consécutives à une épreuve de nage maximale sur 365,8 m, * $\dot{V}O_{2\max}$ mesuré en $\text{L} \cdot \text{min}^{-1}$. D'après Suriano et Bishop (2010).

Bien qu'importante, $\dot{V}O_{2\max}$ ne constitue pour autant qu'un seul des facteurs de la performance dans les épreuves de longue durée, comme le démontrent les larges variations de performance au sein de groupe d'athlètes possédant des valeurs de $\dot{V}O_{2\max}$ très homogènes (Daniels 1985; Sjodin et Svedenhag 1985). Entre des triathlètes ayant atteint un niveau de performance très similaire, il se peut ainsi en effet qu'aucune corrélation entre $\dot{V}O_{2\max}$ et la performance ne soit constatée. D'autres facteurs, comme ceux caractérisant la réponse physiologique lors d'exercices sous-maximaux, ont une influence prépondérante.

2.2. LES PARAMETRES PHYSIOLOGIQUES LORS D'EPREUVES SOUS-MAXIMALES

Quand bien même $\dot{V}O_{2\max}$ représente la limite maximale de la production d'énergie aérobie, il a été suggéré que certains paramètres mesurés lors d'exercices sous-maximaux constituent de meilleurs indicateurs de la performance dans les activités de longue durée (Costill et al. 1973; Coyle et al. 1988). Ainsi, des triathlètes possédant des valeurs de $\dot{V}O_{2\max}$ similaires pour une discipline donnée du triathlon sont susceptibles de démontrer des niveaux de performance différents pour cette activité, en fonction du pourcentage de $\dot{V}O_{2\max}$ qu'ils sont capables de soutenir pendant une durée donnée. Plusieurs paramètres associés à des charges d'exercice sous-maximales ont été identifiés : le seuil d'accumulation de l'acide lactique et les seuils ventilatoires.

2.2.1. LE SEUIL D'ACCUMULATION DE L'ACIDE LACTIQUE

2.2.1.1. DEFINITION

Alors que les athlètes d'endurance « élite » démontrent des valeurs très élevées de $\dot{V}O_{2\max}$, il apparaît toutefois que pour des efforts d'une durée supérieure à 10-15 minutes, l'épreuve n'est pas réalisée à une vitesse moyenne qui correspond à celle associée à l'atteinte de $\dot{V}O_{2\max}$. Dans ce cadre se pose la question de la fraction d'utilisation de $\dot{V}O_{2\max}$ qui peut être maintenue lors d'une épreuve de longue durée (*e.g.* le triathlon distance Olympique) et de l'activité glycolytique associée.

Lorsque l'intensité d'exercice augmente, il n'y a typiquement pas d'augmentation de la lactatémie jusqu'à 60% de $\dot{V}O_{2\max}$. Chez des sujets entraînés, cette valeur peut atteindre 75 voire 90% de $\dot{V}O_{2\max}$. De nombreuses études ont investigué ce qui engendre cette augmentation de la lactatémie et les relations possibles entre les ions lactate (et/ou les ions hydrogène) et la fatigue (Allen et al. 2008; Cairns 2006). L'analyse de la littérature révèle toutefois que l'apparition du lactate au niveau sanguin n'est pas synonyme d'un état hypoxique au niveau musculaire et que cette molécule n'est

pas en soi responsable de la fatigue des muscles actifs (Cairns 2006; Coyle et al. 1984; Holloszy et al. 1977; Nielsen et al. 2001b).

Il apparaît en fait que la lipolyse ne permet pas de répondre aux besoins en ATP aux intensités d'exercice sévères (Brooks et Mercier 1994; Coyle 1995b). L'augmentation de l'intensité d'exercice accroît la stimulation du système nerveux sympathique et engendre une cascade de signalisations au niveau musculaire qui stimulent la glycogénolyse et la glycolyse, de sorte que la production de pyruvate excède progressivement la capacité d'oxydation mitochondriale, accélérant ainsi la production d'acide lactique (Roberts et al. 2004). Les ions hydrogène produits (issus de la transformation des molécules d'acide lactique en ions lactate et en ions hydrogène) sont partiellement responsables de la fatigue et activent les afférences musculaires III et IV qui provoquent de multiples réflexes cardiovasculaires et automatiques (Pryor et al. 1990). La plus petite intensité à partir de laquelle la production de lactate dépasse la capacité d'oxydation musculaire est définie comme le seuil d'accumulation de l'acide lactique (SAAL) (Karlsson et Jacobs 1982). Il existe de nombreuses controverses concernant les différentes méthodes qui peuvent être employées pour déterminer ce seuil. Certains auteurs utilisent l'évolution de la lactatémie pour déterminer à partir de quelle intensité celle-ci atteint 4mmol.L^{-1} (Kindermann et al. 1979). D'autres chercheurs proposent de déterminer SAAL à partir de la rupture de pente dans la courbe représentative de la lactatémie en fonction de l'intensité d'exercice (vitesse ou puissance) (Cheng et al. 1992; Lundberg et al. 1986).

A cet égard, des chercheurs ont comparé la corrélation existant entre la puissance moyenne développée par des cyclistes féminines entraînées lors d'une épreuve contre-la-montre d'une heure et l'analyse de l'augmentation de la lactatémie lors d'un test maximal incrémenté identifiée à partir de 6 méthodes d'analyse différentes (Bishop et al. 1998). Ces 6 méthodes consistaient à déterminer : 1) le seuil lactique (atteint à la puissance de pédalage pour laquelle la lactatémie commence à s'accroître au-dessus de sa valeur de repos) ; 2) le seuil lactique (1) (associé à la puissance de pédalage à partir de laquelle la lactatémie s'accroît de plus d' 1mmol.L^{-1} au-dessus de sa valeur de repos) ; 3) le seuil lactique (D) (défini par la méthode de Cheng et al. en 1992) ; 4) le seuil lactique (D_{max}) (Cheng et al. 1992) ; 5) le seuil à 4mmol.L^{-1} ; 6) le seuil lactique (LOG) (identifié comme la puissance pour laquelle la valeur logarithmique de la lactatémie augmente en fonction de la valeur logarithmique de la puissance développée). Les résultats ont montré que la plus grande corrélation ($r = 0,84$) était obtenue lorsque la méthode D_{max} était employée (Cheng et al. 1992).

Bien que les déterminants physiologiques de SAAL sont relativement complexes, ceux-ci sont principalement déterminés par la capacité oxydative musculaire (Coyle et al. 1984; Davies et al. 1982; Gregg et al. 1989a; Gregg et al. 1989b; Holloszy et al. 1977). Cette capacité est hautement plastique et peut être doublée comme l'ont montré des études menées chez l'homme et l'animal (Coyle et al.

1984; Dudley et al. 1982; Holloszy et al. 1977). Selon Joyner et Coyle (2008), l'augmentation très importante de la capacité oxydative musculaire est l'un des principaux facteurs expliquant les hautes valeurs de SAAL mesurées chez les athlètes d'endurance de haut niveau. Comme nous l'avons souligné précédemment, les athlètes d'endurance « élite » comme les triathlètes démontrent des valeurs de $\dot{V}O_{2\max}$ supérieures de 50 à 100% par rapport à des sujets sédentaires et leur SAAL est associé à des pourcentages plus élevés de leur $\dot{V}O_{2\max}$. Ainsi, ils sont capables de maintenir une haute valeur de $\dot{V}O_2$ pendant des périodes prolongées, ce qui leur permet de courir à des allure proches de 20km.h^{-1} ou de pédaler à des puissances proches de 400W au cours de périodes prolongées.

2.2.2. LES SEUILS VENTILATOIRES

2.2.2.1. DEFINITION

Dès 1930, Owles observe l'existence d'un niveau critique d'exercice au-dessus duquel se produit une accumulation d'ions lactate dans le sang et une augmentation de la production de CO_2 . Peu après, Margaria et al. (1933) indiquent que la lactatémie s'élève lors d'un exercice continu dont l'intensité est proche de 60% de l'intensité maximale. Ces auteurs ont expliqué cette accumulation de lactate dans le sang par la survenue d'une hypoxie locale dans les muscles actifs. Ils ont remarqué également de valeurs de lactatémie plus faibles, à puissances similaires, chez des sportifs spécialistes d'une discipline d'endurance.

Wasserman et McIlroy (1964) ont introduit le terme de « seuil anaérobie » en associant les mesures des variables ventilatoires et de lactatémie. Pour ces auteurs, le seuil anaérobie désigne l'intensité d'exercice au-dessus de laquelle l'apport en oxygène aux muscles actifs serait insuffisant par rapport à la demande de ces derniers. Au cours d'un protocole où la vitesse ou la puissance développée est croissante (*i.e.* test triangulaire), ce seuil est repéré par la vitesse ou la puissance pour laquelle se produit une augmentation non linéaire du débit expiratoire (\dot{V}_E), du quotient d'échanges gazeux respiratoires et de la lactatémie ($[La^-]_s$) (Wasserman et McIlroy 1964; Wasserman et al. 1973). Reinhard et al. (1979) ont déterminé le seuil anaérobie par la méthode des équivalents ventilatoires de l'oxygène et du dioxyde de carbone, et ont montré l'existence d'un deuxième seuil : le seuil de décompensation de l'acidose métabolique. Le seuil aérobie (ou premier seuil ventilatoire, SV1) est déterminé par une augmentation de l'équivalent ventilatoire de l' O_2 (EqO_2) sans augmentation de celui du CO_2 ($EqCO_2$). Le seuil de décompensation de l'acidose métabolique (ou deuxième seuil ventilatoire, SV2) est mesuré lorsque l'augmentation de l'équivalent ventilatoire de l' O_2 s'accompagne d'une augmentation de celui du CO_2 .

Selon certaines études (Reinhard et al. 1979; Wasserman et al. 1973), l'origine des deux seuils serait purement humorale et relèverait des seules modifications du pH sanguin. Au début et jusqu'au

premier seuil ventilatoire d'un exercice à charge linéairement croissante, les augmentations de \dot{V}_E et de $\dot{V}CO_2$ sont proportionnelles à celle de $\dot{V}O_2$. A partir du premier seuil, selon la théorie de Wasserman et al. (1973), \dot{V}_E et $\dot{V}CO_2$ augmentent plus que $\dot{V}O_2$ car une quantité supplémentaire de CO_2 est produite par le tamponnement des ions hydrogène via le système tampon-bicarbonate. A cette intensité, il se produit donc une augmentation de l'Eq O_2 sans augmentation d'Eq CO_2 (ce dernier restant constant ou diminuant), qui définit le premier seuil ventilatoire (SV1). La puissance continuant à s'élever, \dot{V}_E et $\dot{V}CO_2$ augmentent encore de manière proportionnelle pendant la phase dite de « tamponnement isocapnique », jusqu'au deuxième seuil ventilatoire (SV2) (Reinhard et al. 1979). A partir de SV2, \dot{V}_E augmente proportionnellement plus que $\dot{V}CO_2$, afin de compenser l'acidose métabolique. Il se produit une augmentation de l'Eq O_2 accompagnée d'une augmentation de l'Eq CO_2 qui correspond au début de la phase d'hyperventilation hypocapnique (Skinner et McLellan 1980).

2.2.2.2. CONTROVERSE AU SUJET DES SEUILS VENTILATOIRES

Les notions de seuils ventilatoires impliquent la notion de limite entre processus énergétiques aérobie et anaérobie. Au dessus de l'intensité associée à SV2, l'énergie serait fournie de façon mixte par les métabolismes aérobie et anaérobie induisant la production et l'accumulation d'ions lactate, formés en raison d'un apport insuffisant d' O_2 aux muscles actifs (Davis 1985; Walsh et Banister 1988; Wasserman et McIlroy 1964; Wasserman et al. 1973). Wasserman et McIlroy (1964) avaient observé au cours d'une épreuve maximale à charge croissante une puissance charnière pour laquelle se produit une brusque augmentation de la lactatémie. Ainsi, avant cette puissance la lactatémie ne variait pas ou très peu, puis au dessus du seuil anaérobie son accroissement devenait de plus en plus rapide.

Cette théorie, telle que ces deux auteurs l'ont énoncée, repose donc sur deux hypothèses principales. La première soutient que la production de lactate n'intervient qu'au delà d'une certaine puissance, ce qui explique d'où provient la notion de seuil. La seconde suggère que la production de lactate est la conséquence d'une hypoxie locale, d'où résulte la dénomination « anaérobie ».

La première hypothèse est réfutée par le fait que la lactatémie est le résultat de l'apparition du lactate dans le sang mais aussi de son élimination par certains organes (le foie, le cœur, le système nerveux central et les muscles). La lactatémie ne représente donc pas la seule production de lactate par les muscles actifs. Green et al. (1983) ont observé pour une puissance correspondant à 80% du seuil anaérobie, une concentration intramusculaire de lactate de $4,5\text{mmol.L}^{-1}$ alors que la lactatémie restait égale à sa valeur de repos ($1,3 - 1,5\text{mmol.L}^{-1}$). Ainsi, au cours d'un exercice à puissance croissante, le lactate est produit et s'accumule dans le muscle avant que cela ne se traduise par une

élévation de la lactatémie. Le fait qu'il n'existe pas de variation de lactatémie au début de ce type d'exercice n'implique pas une absence de production de lactate au niveau des muscles en activité. En conséquence, au cours d'un exercice maximal à puissance croissante, le muscle produit du lactate en permanence, dès la première minute (Brooks 1986). Pour certains auteurs (Morton et al. 1994; Myers et al. 1994), le fait que la lactatémie augmente selon un modèle curvilinéaire au cours d'une épreuve triangulaire ne peut par ailleurs être déterminé de façon précise statistiquement. D'autres études ont cependant montré l'existence de deux points caractéristiques de la cinétique du lactate au cours d'une épreuve d'effort en rampe (Morton et al. 1994; Peronnet et Morton 1994). La première rupture de pente serait simplement attribuée au retard d'apparition du lactate dans le sang par rapport à la production musculaire, et la deuxième rupture traduirait une véritable augmentation de la lactatémie en réponse à l'exercice (Morton et al. 1994; Peronnet et Morton 1994).

La deuxième hypothèse relative au concept de seuil anaérobie suggère que l'accroissement de la lactatémie ne peut se dérouler que si le muscle travaille en condition hypoxique (Brooks 1985; Davis 1985; Wasserman et al. 1973). Dans ces conditions, le pyruvate se transformerait davantage en lactate et ne pourrait donc pas entrer dans le cycle de Krebs pour resynthétiser l'ATP par les processus oxydatifs. Des travaux chez des sujets placés en hypoxie aigue (Dousset et al. 2002) ou chez des sujets pratiquant l'apnée (Joulia et al. 2003) réfutent cependant cette hypothèse car ils démontrent qu'à puissance croissante l'hypoxémie réduit la lactatémie. Par ailleurs, des mesures de pression partielle en oxygène (PO_2) intramusculaires ne confortent pas l'hypothèse d'une hypoxie locale. En effet, Brooks (1985) rapportent des valeurs de PO_2 relativement élevées à l'exercice au niveau des mitochondries des muscles actifs. L'augmentation de la lactatémie n'est donc pas due à une hypoxie musculaire locale mais à l'élévation de la demande énergétique. Pour des exercices situés au dessus du seuil anaérobie, Pirnay et al. (1972) ont montré que la valeur de PO_2 , mesurée dans le sang à la sortie d'un muscle sollicité par un exercice maximal, ne s'abaisse pas en dessous de 20mmHg. Connell et al. (1984) ont par ailleurs prolongé ce résultat en montrant qu'à $\dot{V}O_{2\max}$ il n'existe aucune zone musculaire où PO_2 est inférieure à 2mmHg, valeur 4 à 20 fois supérieure à la valeur de PO_2 nécessaire à la phosphorylation oxydative. Ainsi, le muscle n'est jamais en condition d'hypoxie ni globalement, ni localement. Nous privilierons donc l'utilisation de la notion de « seuil d'accumulation de l'acide lactique » (SAAL) à l'issue du présent chapitre.

D'après Wasserman et al. (1973), le seuil anaérobie déterminé grâce aux échanges gazeux pulmonaires correspondrait à l'intensité pour laquelle la lactatémie augmente de manière importante. Or, plusieurs études ont montré que cette correspondance n'est pas fondée sur une relation de causalité (Chicharro et al. 1997; Davis et al. 1981; Green et al. 1983; Myers et Ashley 1997; Poole et Gaesser 1985). Ainsi, le seuil anaérobie déterminé par la méthode des échanges

gazeux ne coïncide pas avec le seuil anaérobie mesuré par une augmentation non linéaire de la lactatémie. Par ailleurs, les études menées chez des patients atteints du syndrome de McArdle ont montré que les seuils déterminés par les mesures d'échanges gazeux et de la lactatémie n'apparaissaient pas pour les mêmes intensités. En effet, ces malades ne peuvent pas produire de lactate à partir du glycogène musculaire en raison d'un déficit en phosphorylase musculaire, de sorte que leur lactatémie reste stable autour d'une valeur de repos de 1mmol.L^{-1} au cours d'une épreuve d'exercice en rampe (Hagberg et al. 1982).

Dans le but de déterminer si l'augmentation de l' EqO_2 est associée à l'acidose métabolique, Farrell et Ivy (1987) ont mesuré la ventilation en continu pour des concentrations de lactate et d'ions H^+ normale ou élevées. Ils ont observé que l'augmentation de l' EqO_2 apparaît pour la même puissance d'exercice quelles que soient les concentrations de lactate et d'ions H^+ . Ces auteurs ont conclu que l'augmentation de l' EqO_2 n'est pas induite par des changements de lactatémie ou de pH sanguin.

Ainsi, le concept de seuil anaérobie apparaît très controversé, non seulement pour sa dénomination « anaérobie » mais aussi pour la relation de cause à effet entre seuils lactiques et seuils ventilatoires. Nous envisagerons donc les cinétiques du lactate et des échanges gazeux pulmonaires de manière indépendante, lors des analyses menées dans la suite de ce manuscrit.

2.2.2.3. VALEURS DES PARAMETRES SOUS-MAXIMAUX DE LA PERFORMANCE AÉROBIE CHEZ LES TRIATHLETES « ELITE »

Les paramètres sous-maximaux de la fourniture d'énergie par la filière aérobie ont été identifiés comme des facteurs de la performance en natation, en cyclisme et en course à pied (Joyner et Coyle 2008). Il a ainsi été mis en évidence que la performance dans un groupe de cyclistes présentant des valeurs de $\dot{\text{V}}\text{O}_{2\text{max}}$ similaires ($\dot{\text{V}}\text{O}_{2\text{max}} = 68,6 \pm 1,2\text{L}\cdot\text{min}^{-1}\cdot\text{kg}^{-1}$) dépend du pourcentage de $\dot{\text{V}}\text{O}_{2\text{max}}$ associé au SAAL ($r = 0,90$, $p < 0,001$) (Coyle et al. 1988). Il a été montré que les valeurs sous-maximales mesurées en course à pied sont aussi prédictives de la performance lors de course à pied de longue durée (Costill et al. 1973; Farrell et al. 1979). Farrell et al. (1979) ont montré que la vitesse de course et le pourcentage de $\dot{\text{V}}\text{O}_{2\text{max}}$ associés au SAAL sont significativement corrélés à la performance pédestre sur des distances comprises entre 3,2 et 42,2km. De même, une étude de Laursen et al. (2003) a révélé que la performance lors d'une épreuve contre-la-montre de 40km est significativement corrélée à la puissance associée au SV2 au sein d'un groupe de cyclistes ne présentant pas de différence significative en termes de $\dot{\text{V}}\text{O}_{2\text{max}}$ ou de puissance pic atteinte lors d'un test maximal incrémenté de détermination de $\dot{\text{V}}\text{O}_{2\text{max}}$. Ces données expérimentales suggèrent donc que les valeurs physiologiques associées au travail sous-maximal sont un facteur déterminant de la

performance lors des activités de locomotion de longue durée. En triathlon distance Olympique, si cette relation semble effective pour la course à pied, elle l'est moins pour la natation et le cyclisme en raison des bénéfices associés à l'adoption d'une position abritée derrière un ou plusieurs concurrents (Bentley et al. 2001; Whyte et al. 2000).

Il est difficile de comparer les valeurs de vitesse et de puissance associées au SAAL en raison de la diversité des méthodes de détermination employées (Suriano et Bishop 2010). Pour un groupe de triathlètes entraînés engagés dans des compétitions « longue distance », Kohrt et al. (1989) ont rapporté une valeur au SAAL égale à 85,1% de $\dot{V}O_{2\max}$ ($n = 14$, $\dot{V}O_{2\max} = 58,4 \pm 1,4 \text{mL} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$). Le même groupe de triathlètes a démontré une plus faible valeur de $\dot{V}O_{2\max}$ en cyclisme par rapport à la course à pied (76,1% de $\dot{V}O_{2\max}$ à SV2). Cela a coïncidé avec une plus faible valeur de $\dot{V}O_{2\max}$ en cyclisme pour ce groupe ($56,0 \pm 1,3 \text{mL} \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$). Parallèlement, O'Toole et al. (1989) ont rapporté que la puissance de pédalage associée à l'atteinte d'une lactatémie de $4 \text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ correspond à $88,0 \pm 1,2\%$ de $\dot{V}O_{2\max}$ chez des triathlètes spécialisés dans les courses longue distance (format *Ironman*). Comparée avec l'étude précédée de Kohrt et al. (1989), la plus haute fraction de $\dot{V}O_{2\max}$ rapportée par O'Toole et al. (1989) était probablement associée au profil « longue distance » des triathlètes étudiés, qui présentent généralement un grand volume d'entraînement en cyclisme. Au regard de ces résultats, et tenant compte du fait qu'ils n'ont pas été collectés sur des triathlètes de haut niveau, Suriano et Bishop (2010) suggèrent que ces valeurs rapportées pour des triathlètes semblent comparables à celles observées chez des sportifs spécialisés dans une discipline d'endurance unique. Par exemple, chez des coureurs à pied « élite » ($\dot{V}O_{2\max} = 77,7 \pm 6,4 \text{mL} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$), SAAL a été mesuré à $90,4 \pm 1,1\%$ de $\dot{V}O_{2\max}$ par Billat et al. (2001a). De même, Lucia et al. (2001) ont rapporté que des cyclistes professionnels démontrent un SAAL associé à environ 90% de $\dot{V}O_{2\max}$. Nous pensons que des résultats récents, collectés auprès de triathlètes de valeur internationale sont nécessaires pour confirmer cette similitude.

Si l'ensemble des données jusqu'ici présentées confirment l'importance des facteurs de la « performance aérobie » ($\dot{V}O_{2\max}$ et SAAL, Joyner et Coyle 2008) en triathlon, la performance dans cette discipline n'apparaît pas pour autant entièrement déterminée par ces seules capacités physiologiques. Nous allons montrer à présent que l'évaluation et la description du coût énergétique du déplacement revêt aussi une importance prépondérante dans l'approche de la performance dans les activités cycliques de longue durée comme le triathlon distance Olympique.

Ce qu'il faut retenir

Les données collectées auprès de triathlètes de haut niveau révèlent chez ces derniers des caractéristiques physiologiques assez similaires à celles classiquement observées chez des sportifs de haut niveau spécialisés dans des activités de locomotion unimodale de longue durée. Ces résultats concernent tant $\dot{V}O_2\text{max}$ que les paramètres sous-maximaux associés à la performance dans ce type d'activités (vitesses / puissances associées à l'atteinte des seuils ventilatoires ou du seuil d'accumulation de l'acide lactique).

Il apparaît ainsi que les triathlètes « élite » sont capables d'atteindre des adaptations physiologiques similaires à celles observées chez les cyclistes et les coureurs de haut niveau. Ce constat semble s'expliquer par les bénéfices associés à l'entraînement croisé entre cyclisme et course à pied. D'autres données devront être collectées en natation pour prolonger ce type de comparaison.

2.3. LE COUT ENERGETIQUE DE LA LOCOMOTION

2.3.1. DEFINITION

Les différences de coût énergétique entre les modes de locomotion peuvent s'expliquer à plusieurs niveaux à partir de l'analyse des différentes étapes de transformation d'énergie au sein de l'organisme. En effet, la production d'une vitesse de déplacement résulte d'un certain nombre de processus de transformations énergétiques (van Ingen Schenau et Cavanagh 1990).

L'efficience du sujet en déplacement peut donc être envisagée aussi bien à un niveau local qu'au niveau global de l'organisme en considérant soit le rendement mécanique, soit le coût énergétique. Ces différents niveaux renvoient à des approches distinctes de la littérature qui seront détaillées ultérieurement.

2.3.2. RENDEMENT ET COUT ENERGETIQUE

L'effet des variations d'efficience du système sur la performance dans les activités de locomotion est généralement évalué par des indices plus macroscopiques que le rendement musculaire et mécanique. Cette deuxième approche théorique envisage soit le calcul du rendement global, défini comme le ratio entre le travail utile produit et l'énergie métabolique dépensée (équation 1), soit le calcul du coût énergétique représentant le ratio entre l'énergie métabolique dépensée et la vitesse de déplacement (équation 2), (di Prampero 1986; Gaesser et Brooks 1975).

$$\text{Rendement global (\%)} = \frac{\text{Travail utile (J)}}{\text{Energie métabolique (J)}} \times 100 \quad (1)$$

$$\text{Coût énergétique} = \frac{\text{Energie métabolique (mLO}_2.\text{min}^{-1}.\text{kg}^{-1})}{\text{Vitesse de déplacement (m.min}^{-1})} \times 100 \quad (2)$$

Selon l'indice utilisé, l'optimisation de l'efficience globale du sujet se traduit soit par une augmentation du rendement global, soit par une diminution du coût énergétique. L'utilisation de l'un ou l'autre de ces indices dépend essentiellement de la façon dont est quantifié le travail utile produit. Dans la plupart des activités de locomotion, le travail utile est estimé par la vitesse de déplacement du sujet, et le coût énergétique est utilisé comme indice représentatif de l'efficience globale du sujet. Par contre, en cyclisme, l'évaluation de l'efficience de la locomotion est classiquement réalisée en laboratoire, et le travail utile est quantifié à partir de la puissance développée par le sujet en sortie d'ergocycle.

Ainsi le rendement global est le paramètre privilégié lors des épreuves de cyclisme réalisées en laboratoire. Dans ce contexte, les différents auteurs s'intéressant à la quantification du rendement global dans l'activité cyclisme font référence à plusieurs méthodes de calcul du rendement qu'il convient de préciser.

2.3.3. LES DIFFERENTS INDICES DU RENDEMENT EN CYCLISME

Quatre types d'indices sont couramment utilisés dans la littérature pour évaluer le rendement de l'activité cyclisme : *gross efficiency*, *net efficiency*, *work efficiency*, *delta efficiency* (Gaesser et Brooks 1975; Stainsby et al. 1980). Ces indices se distinguent exclusivement par la quantification de l'énergie métabolique dépensée, le numérateur représentant dans tous les cas le travail utile produit.

L'indice le plus global du rendement de l'activité est l'efficience brute (*gross efficiency*, équation 3), notée GE et définie comme le ratio entre le travail utile produit mesuré à la sortie de l'ergomètre, et la dépense d'énergie métabolique totale nécessaire à la réalisation de ce travail (notée E1 et représentant l'équivalent énergétique du litre d'oxygène consommé en fonction du quotient respiratoire RER).

$$\text{Gross efficiency (\%)} = \frac{\text{Travail utile produit (joules)}}{\text{Energie métabolique totale dépensée (J)}} \times 100 \quad (3)$$

Dans cette équation, l'énergie métabolique dépensée représente non seulement l'énergie métabolique nécessaire à la réalisation du travail utile, mais également d'autres sources de dépenses

énergétiques qui ne contribuent pas directement à la réalisation de ce travail. Ainsi sont prises en compte l'énergie de gesticulation (correspondant au travail interne) (Francescato et al. 1995), la dépense énergétique liée au recrutement des muscles permettant le maintien de la posture ou encore le coût en oxygène des muscles assurant les fonctions cardiaque et respiratoire.

Dans le calcul du rendement global, la valeur du dénominateur est donc surestimée et l'efficience globale du sujet est sous-estimée (Sidossis et al. 1992; Stainbsy et al. 1980). Cette principale limite a amené les physiologistes à considérer d'autres indices représentatifs de l'efficience en cyclisme. Ces indices se différencient par leur dénominateur. Dans ce cadre, différentes dépenses d'énergie de base peuvent être retranchées à la valeur E1 de l'équation 3. Les plus couramment utilisées dans la littérature sont la valeur de débit volumique d'oxygène consommé au repos, celle liée à la variation de puissance de sortie lors de l'exercice ou la dépense énergétique correspondant au travail interne (Stainbsy et al. 1980).

Net efficiency (%) =

$$\frac{\text{Travail utile produit (J)}}{\text{Energie métabolique dépensée à l'exercice (J)} - \text{Energie métabolique dépensée au repos}} \times 100 \quad (4)$$

Dans le calcul de l'efficience nette NE (net efficiency, équation 4), la dépense énergétique de repos (E2) est déduite de la valeur E1 afin d'évaluer exclusivement la dépense énergétique correspondant au travail externe fourni (Stainbsy et al. 1980). Cependant, l'estimation d'une valeur de $\dot{V}O_2$ de repos dans des conditions expérimentales a révélé une forte variabilité inter- et intra-individuelle. Ce manque de reproductibilité amène donc certains auteurs à utiliser la valeur de $\dot{V}O_2$ de repos théorique de $0,083mL.kg^{-1}.s^{-1}$ calculée par Medbo et al. à partir de la relation $\dot{V}O_2$ -vitesse chez de jeunes adultes de sexe masculin (Medbo et al. 1988).

L'efficience de travail WE (work efficiency, équation 5) se définit comme le ratio entre le travail utile produit et la différence entre l'énergie métabolique totale dépensée E1 et l'énergie métabolique nécessaire au pédalage à vide (E3). La valeur d'énergie métabolique prise en considération dans ce calcul ne prend donc pas en compte l'énergie de gesticulation, correspondant au travail interne nécessaire pour déplacer les segments corporels au cours d'un cycle de pédalage (Winter 1979).

Work efficiency (%) =

$$\frac{\text{Travail utile produit (J)}}{\text{Energie métabolique dépensée à l'exercice (J)} - \text{Energie métabolique dépensée pour le pédalage à vide}} \times 100 \quad (5)$$

La variation de l'efficience DE (*delta efficiency*, équation 6) représente le ratio entre l'équivalent énergétique de la variation de travail utile produit entre deux instants et l'équivalent énergétique de la variation d'énergie métabolique dépensée entre ces deux instants.

Comparativement aux indices du rendement précédemment évoqués, de nombreux auteurs considèrent ce paramètre comme la meilleure estimation de l'efficience musculaire (Coyle 1995a; Horowitz et al. 1994). Ce calcul réduirait l'influence des processus métaboliques qui ne contribuent pas directement à la réalisation du travail mécanique (Boning et al. 1984; Gaesser et Brooks 1975; Sidossis et al. 1992).

$$\text{Delta efficiency (\%)} = \frac{\text{Travail utile produit (joules)}}{\text{Delta de l'énergie métabolique totale dépensée (J)}} \times 100 \quad (6)$$

Cependant, Stainsby et al. (1980) soulignent qu'aucun de ces indices du rendement (GE, NE, WE, DE) ne représente précisément la variation de l'efficience au cours de l'exercice. D'une part, il apparaît que la mesure du travail utile produit représente une sous-estimation du travail mécanique total réalisé, parce qu'elle ne prend pas en compte le travail interne dont l'évaluation nécessite une analyse cinématique afin d'estimer les variations d'énergie cinétique et potentielle liées au déplacement du centre de masse (Neptune et van den Bogert 1998; Widrick et al. 1992; Winter 1979). D'autre part, la soustraction d'une valeur d'énergie métabolique de base (dépense énergétique de repos, dépense énergétique liée au pédalage à vide pour NE et WE respectivement) nécessite que celle-ci soit constante tout au long de l'exercice. Or, l'intervention de certains processus métaboliques qui ne contribuent pas directement à la production du travail utile au cours de l'exercice peut modifier ces valeurs de base entre le début et la fin de l'exercice. Ces principaux mécanismes sont le métabolisme splanchnique, l'augmentation de la température corporelle, le coût de la ventilation, ou encore la modification du niveau de catécholamines circulantes.

2.3.4. DEFINITION DU COUT ENERGETIQUE

Le coût énergétique de la locomotion (CE) est défini comme la quantité d'énergie consommée par unité de distance. Il peut également être décrit comme le rapport entre le débit d'énergie consommé par unité de temps E1 et la vitesse de déplacement v (équation 7; di Prampero, 1986).

$$\text{CE} = E \cdot v^{-1} \quad (7)$$

Lors d'un exercice réalisé dans des conditions aérobies, E correspond à la consommation d'oxygène exprimée en $\text{mL} \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$, v est exprimée en $\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$, et CE en $\text{mL} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$. De plus, CE peut être exprimé en $\text{J} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$ en prenant en compte l'équivalent énergétique du litre d'oxygène (EO_2)

exprimé en kJ.L^{-1} dont la valeur dépend du substrat utilisé comme source d'énergie. Pour une consommation exclusive de lipides, le quotient respiratoire est de 0,7 et $\dot{\text{V}}\text{O}_2$ est égal à $19,6\text{kJ.L}^{-1}$ alors que pour une consommation exclusive de substrats glucidiques, le quotient respiratoire est de 1,0 et $\dot{\text{V}}\text{O}_2$ est égal à $21,3\text{kJ.L}^{-1}$.

2.3.5. VALIDITE DE LA MESURE DU COUT ENERGETIQUE

La mesure du coût énergétique nécessite de standardiser les conditions expérimentales (Brisswalter et Legros 1994a). Celles-ci sont facilement contrôlées en laboratoire où le coût énergétique est calculé indépendamment des effets liés aux résistances de l'air (Brisswalter et Legros 1994a). Néanmoins, on peut actuellement mesurer le coût énergétique en situation grâce aux appareillages de mesure et d'enregistrement des paramètres gazeux, dont la répétabilité des mesures doit avoir été préalablement démontrée (Duffield et al. 2004; Perret et Mueller 2006).

Dans des conditions de terrain, si la validité de la mesure dépend, comme en laboratoire, de la précision de l'appareillage (Hausswirth et al. 1997b), l'impossibilité de contrôler les conditions externes de pratique (température, humidité, vent) nécessite une vigilance accrue des expérimentateurs aussi bien dans l'étalonnage de l'appareil que dans l'interprétation des valeurs enregistrées (Brisswalter et Legros 1994a).

2.3.5.1. INFLUENCE DU MODE DE RECUEIL DES ECHANGES GAZEUX

Quelques études se sont intéressées au mode de recueil des paramètres ventilatoires. Celles-ci ont pu montrer que le fait de porter un embout buccal ou un masque altère les caractéristiques respiratoires obtenues en condition de repos (Hirsch et Bishop 1982). Cependant, seule l'étude de Siler (1993) s'est intéressée à la comparaison des deux modes de recueils d'échanges gazeux au cours d'un exercice. Les résultats ont montré que le port de l'embout ou d'un masque n'affecte ni le style du coureur à des vitesses de course sous-maximales ni les mesures de $\dot{\text{V}}\text{O}_2$.

2.3.5.2. CRITERES D'EVALUATION DU COUT ENERGETIQUE

Indépendamment du contrôle de la variabilité instrumentale, le principal critère d'évaluation du coût énergétique est l'atteinte d'un état d'équilibre de $\dot{\text{V}}\text{O}_2$. La valeur de ce paramètre varie en fonction de l'intensité du travail, des muscles concernés, de l'existence d'un travail préalable et du niveau d'entraînement des sujets. La détermination de l'intensité de travail impose donc de contrôler la validité de la mesure de $\dot{\text{V}}\text{O}_2$ et limite la mesure du coût énergétique à des exercices dont l'intensité est reliée à l'utilisation d'énergie uniquement d'origine aérobie. Dans ce cadre, la stabilité

de la lactatémie durant les paliers d'un test incrémenté permet de vérifier le caractère aérobie de l'exercice (Daniels et al. 1984).

Lorsque les conditions de mesure sont contrôlées, l'interprétation des variations du coût énergétique n'est par ailleurs pas possible sans une connaissance précise de la stabilité à court terme de ce paramètre pour la population concernée et le mode de locomotion étudié. La majorité des études réalisées en laboratoire ont envisagé isolément la stabilité du coût énergétique de la course à pied et celle des paramètres biomécaniques (di Prampero 1981; Williams et al. 1991); quelques études seulement ont étudié la variation conjointe de ces paramètres (Brisswalter et Legros 1994b; Morgan et al. 1991). Dans ces travaux, la variabilité à court terme du coût énergétique de la course à pied se situait entre 1,8 et 11%. La dispersion de ces résultats a semblé être principalement liée à la diversité des méthodes mises en œuvre aussi bien en ce qui concerne le degré de spécialisation de la population en course à pied que la standardisation des protocoles (Brisswalter et Legros 1994a).

De manière générale, Brisswalter et Legros (1994a) indiquent que lorsque le protocole est standardisé, les valeurs moyennes de coût énergétique en course à pied peuvent être considérées comme stables, quel que soit le niveau de pratique. Néanmoins, si dans toutes ces études les valeurs moyennes ne varient pas significativement, il existe des variations individuelles importantes du coût énergétique indépendantes, par ailleurs, de la variabilité des paramètres biomécaniques (Morgan et al. 1991). Il semble ainsi que, si le coût énergétique de la course à pied est un paramètre reproductible, son évaluation doit être basée sur deux mesures successives pour permettre d'identifier 90% de la variabilité individuelle (Williams et al. 1991).

2.3.6. LE COUT ENERGETIQUE ET LA PERFORMANCE

Pour la natation, la relation entre le coût énergétique de la locomotion et la performance est bien établie (Toussaint et Hollander 1994). Les résistances hydrodynamiques et l'efficience de propulsion, dont l'optimisation requièrent des années de pratique, constituent les principaux facteurs qui déterminent le coût énergétique de la nage (Zamparo et al. 2010). Une étude a à cet égard montré que des nageurs entraînés démontrent un coût énergétique de la nage 21 à 29% meilleur que des triathlètes de niveau équivalent (Chatard et al. 1995). Ces résultats confirment une étude préalable qui avait montré qu'un groupe de nageurs de haut niveau possédait une efficience de propulsion 36,4% plus élevée que celles de triathlètes élite (Toussaint 1990). Bien que la fréquence de nage était identique chez les nageurs et les triathlètes de haut niveau, ces derniers ont révélé une moindre distance parcourue par cycle de bras, ce qui témoigne d'une efficience de nage moindre (Chatard et al. 1995; Toussaint 1990). Cette différence n'est pas liée à une différence de

taille mais à la meilleure capacité des nageurs à trouver appui sur l'eau lors de la phase propulsive (Millet et al. 2002b).

L'analyse de la littérature révèle que le coût énergétique du pédalage constitue aussi un facteur de la performance en cyclisme (Faria et al. 2005a, b). Dès lors qu'elle dépasse $65\text{mLO}_2\cdot\text{min}^{-1}\cdot\text{kg}^{-1}$, il apparaît en effet que la valeur de $\dot{V}\text{O}_{2\text{max}}$ ne permet plus d'expliquer la différence de niveau de performance entre des cyclistes professionnels et des cyclistes amateurs (Lucia et al. 1998). Lucia et al. (2002) ont ainsi montré qu'il existe une relation inverse entre $\dot{V}\text{O}_{2\text{max}}$, le coût énergétique et *gross efficiency* chez des cyclistes professionnels. En d'autres termes, une valeur optimisée du coût énergétique permet de compenser une valeur relativement faible de $\dot{V}\text{O}_{2\text{max}}$ chez les cyclistes professionnels. Chez ces derniers, la valeur de *gross efficiency* se situe en moyenne aux alentours de 24% et celle du coût énergétique du pédalage est d'environ $85\text{W}\cdot\text{L}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$ (Lucia et al. 2002). Chez un cycliste double-champion du monde de l'épreuve en ligne sur route, Lucia et al. (2002) ont même montré que ces valeurs atteignaient respectivement 25% et $>90\text{W}\cdot\text{L}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$, tandis que $\dot{V}\text{O}_{2\text{max}}$ s'élevait « seulement » $70\text{mL}\cdot\text{min}^{-1}\cdot\text{kg}^{-1}$. A titre comparatif, les valeurs rapportées par Coyle et al. (1995) chez des cyclistes amateurs très entraînés étaient nettement inférieures ($\sim 75\text{W}\cdot\text{L}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$). De manière intéressante, l'étude de Lucia et al. (2002) a par ailleurs mis en évidence que l'efficience mécanique augmentait avec l'intensité d'exercice chez ces cyclistes professionnels. Pour Faria (2005a), ce constat expliquerait la grande résistance à la fatigue que démontrent ces sportifs à l'exercice (Lucia et al. 2001; Lucia et al. 1998) et serait expliqué par la très grande quantité de pratique que révèlent ces derniers (environ $35\ 000\text{km}\cdot\text{an}^{-1}$).

Pour la course à pied, la relation entre performance et le coût énergétique de la locomotion est bien documentée (Conley et Krahnenbuhl 1980; Conley et al. 1984; Costill 1967; Costill et al. 1973; Di Prampero et al. 1993; Pollock 1977). Saunders et al. (2004) expliquent ainsi que les coureurs qui possèdent un bon coût énergétique dépensent moins d'énergie pour courir à vitesse donnée que des coureurs qui démontrent un mauvais coût énergétique de la locomotion, ce qui leur permet d'être plus performants pour une quantité d'énergie consommée similaire. Etant donné qu'il existe une grande variabilité inter-individuelle de ce paramètre entre des coureurs démontrant une valeur de $\dot{V}\text{O}_{2\text{max}}$ proche (Daniels 1985), le coût énergétique de la course est parfois plus prédictif du niveau de performance chez les athlètes de haut niveau que ne l'est la valeur $\dot{V}\text{O}_{2\text{max}}$ (Costill et al. 1973; Morgan et al. 1989).

Di Prampero (2003) a estimé qu'une amélioration de 5% du coût énergétique de la course engendre un progression de 3,8% de la distance parcourue lors d'une course de longue durée. Par exemple, une étude de cas a été rapportée par Conley et al. (1984) au sujet de Steve Scott, lorsque celui-ci était recordman américain du mile. Les effets de son entraînement avaient alors été évalués pendant

6mois. Au cours de cette période, cet athlète avait amélioré $\dot{V}O_{2\max}$ de 3,8% (de 74,4 à 77,2mLO₂.min⁻¹.kg⁻¹), tandis qu'une amélioration de 10% de son coût énergétique à 16km.h⁻¹ avait été parallèlement rapportée (de 65,1% à 58,6% de $\dot{V}O_{2\max}$), ce qui avait résulté en une amélioration globale de son niveau de performance.

Svedenhag et Sjodin (1985) ont étudié les variations du coût énergétique et de la performance chez des coureurs à pied « élite » ($\dot{V}O_{2\max}$: 75mLO₂.min⁻¹.kg⁻¹) qui ont suivi des sessions d'entraînement associant du travail à faible allure, de la course en côte et du travail fractionné de haute intensité sur une période de 22mois. Leurs résultats ont révélé que les athlètes étudiés avaient significativement réduit leur $\dot{V}O_2$ à 15 et 20km.h⁻¹ à l'issue de cette période, ce qui s'était accompagné d'une amélioration de leur performance sur 5000m. Ces résultats ont par ailleurs été renforcés par d'autres études qui ont étudié la relation entre le niveau d'entraînement et le coût énergétique de la course à pied. Une étude a notamment révélé que si la masse corporelle est le principal facteur qui influence le coût énergétique en course à pied ($r = 0,72$), ce dernier est aussi significativement corrélé avec le niveau d'entraînement en course à pied (Bourdin et al. 1993).

Des résultats collectés auprès de coureurs de haut niveau ont par ailleurs montré que ces derniers se distinguent notamment par les faibles valeurs de leur coût énergétique (**Tableau 3**).

Athlètes	Vitesse de course (m.s ⁻¹) pour déterminer l'économie de course	Coût énergétique (mLO ₂ .kg ⁻¹ .km ⁻¹)
Tadesse Zerisenay (Lucia et al. 2008)	317	150
Frank Shorter (champion Olympique du marathon en 1972) (Pollock 1977)	322	192
Coureurs Kenyans élite (incluant des médaillés Olympiques en demi-fond) (Saltin et al. 1995)	333	192
Coureurs caucasiens élite (incluant des médaillés aux Championnats d'Europe d'athlétisme) (Lucia et al. 2006)	317	211

Tableau 3. Exemples de valeurs du coût énergétique de la course pour des allures de compétition ($\geq 19\text{km.h}^{-1}$) chez des athlètes d'endurance de classe mondiale.

L'ensemble de ces résultats montre qu'un bon rendement énergétique est profitable à la performance lors des épreuves de locomotion de longue durée, ce qui concerne directement le triathlon. Plusieurs travaux ont à cet égard suggéré que la capacité à conserver une grande économie de locomotion lors de la course à pied d'un triathlon, après avoir nagé et pédalé, constitue un facteur spécifique de la performance en triathlon (Delextrat et al. 2003a; Hausswirth et al. 1996; Hausswirth et al. 1997a; Hausswirth et Brisswalter 2008). Aussi, la réduction du coût énergétique de la locomotion en triathlon apparaît fortement reliée à l'adoption d'une position abritée en natation et en cyclisme lors des épreuves distance Olympique, où le règlement l'autorise.

2.3.7. L'INFLUENCE DU DRAFTING EN TRIATHLON

2.3.7.1. LES BENEFICES DU DRAFTING EN NATATION

Nager en crawl directement derrière ou sur le côté d'un autre nageur est couramment utilisé lors des compétitions en triathlon et dans les épreuves de natation en eau libre. Cette stratégie permet de limiter le coût énergétique de la nage et de la sorte d'augmenter le niveau de performance, grâce à une réduction de la traînée hydrodynamique (Chatard et al. 1998). Les bénéfices associés à la nage en position abritée ont été investigués principalement par Bassett et al. (1991), Chatard et Wilson (2003) et Chollet et al. (2000). La principale hypothèse explicative de la réduction de la trainée hydrodynamique associée au *drafting* serait que la dépression créée devant le nageur diminuerait le gradient de pression entre les zones à l'avant et à l'arrière de celui-ci et faciliterait son déplacement.

Dans des conditions sous-maximales, plus précisément lors d'un test réalisé à 95% de la vitesse moyenne maximale maintenue sur une distance de 549m, Bassett et al. (1991) ont montré que le *drafting* affecte la réponse métabolique en natation. La valeur de $\dot{V}O_2$ est réduite de $8 \pm 12\%$, la lactatémie de $33 \pm 17\%$ et la difficulté d'effort perçue de $21 \pm 17\%$, par rapport à une course-contrôle nagée seul à la même vitesse. Ces réductions sont associées à une baisse des résistances à l'avancement de 13 à 26% par rapport au nageur-leader pour le nageur en position abritée, en fonction de la vitesse de déplacement de ceux-ci (Bassett et al. 1991). Ces auteurs ont montré que nager dans une position abritée résulte en l'augmentation de la vitesse de nage (3,2% soit 20m sur une épreuve de 400m) et de l'amplitude de nage concomitante à une réduction de la lactatémie et de la fréquence de nage (Bassett et al. 1991). Ils ont observé que le gain de performance est corrélé à l'habileté et à la masse grasse du nageur ; les meilleurs nageurs présentant un faible pourcentage de masse grasse étant les plus avantagés. Chollet et al. (2000) ont confirmé ces résultats en montrant que la vitesse de nage augmente de $1,34m.s^{-1}$ à $1,39m.s^{-1}$ lorsqu'un nageur s'abrite derrière un autre nageur lors d'une épreuve maximale sur 400m mais les ont surtout prolongés en distinguant que le *drafting* contribue à la stabilisation des paramètres cinématiques de la nage en crawl (*i.e.* amplitude et fréquence de nage). La distance séparant le nageur leader du nageur abrité influence toutefois significativement l'amplitude des gains associés au *drafting* en natation, de sorte que plus cette distance est réduite, plus les gains sont grands. Deux études (Chatard et al. 1998; Chatard et Wilson 2003) ont montré que les bénéfices du *drafting* sont maximisés lorsque cette distance est comprise entre 0 et 50cm. Pour autant, des gains significatifs apparaissent toujours jusqu'à 150cm. Ce résultat expliquerait la distance moyenne de 60cm spontanément adoptée par les triathlètes en situation de compétition (Millet et al. 2000).

Etant donné que la flottabilité semble influencer les bénéfices du *drafting* comme le révèlent les bénéfices accrus pour les nageurs présentant un faible pourcentage de masse grasse (Bassett et al. 1991), un autre paramètre à prendre en considération est le port de la combinaison. Delextrat et al. (2003a) ont à cet égard démontré que l'effet positif du *drafting* est conservé, y compris lorsque les triathlètes portent une combinaison. Ces auteurs ont distingué une baisse significative de la fréquence cardiaque (FC, -7%) chez des nageurs en position abritée portant une combinaison lors d'une épreuve maximale sur 750m par rapport à une situation contrôle nagée à une allure identique. À travers ces résultats, il apparaît donc que lors d'une épreuve internationale de triathlon, le *drafting* est susceptible d'incarner un bénéfice supplémentaire au port de la combinaison en contribuant à une réduction accrue du coût énergétique de la nage.

2.3.7.2. LES BENEFICES DU DRAFTING EN CYCLISME

Lors des épreuves cyclistes individuelles contre-la-montre, il est possible de prévoir avec précision la performance d'un cycliste à partir de la connaissance du poids et des caractéristiques aérodynamiques du système « cycliste + vélo » et des caractéristiques physiologiques du cycliste (di Prampero 2000; Olds 2001). Durant les épreuves en ligne, les cyclistes ont cependant la possibilité de se protéger du vent en se plaçant derrière un autre concurrent, ce qui peut significativement influencer leur performance. Jeukendrup et Martin (2001) ont par exemple mis en évidence une puissance de pédalage moyenne de 98W lors d'une étape en plaine du Tour de France, soit 152W de moins que la puissance estimée pour qu'un cycliste parcourt seul la même distance dans un temps égal. Mc Cole et al. (1990) ont montré qu'en position abritée, un cycliste réduit $\dot{V}O_2$ d'environ 18% à 32km.h^{-1} , et que les bénéfices du *drafting* sont plus grands à 37 et 40km.h^{-1} (27%) qu'à 32km.h^{-1} . Depuis, Edwards et Byrnes (2007) ont montré que la surface frontale du coureur leader est un paramètre déterminant des bénéfices du *drafting*. Plus précisément, ces auteurs ont montré que les bénéfices du *drafting* sont positivement corrélés au ratio entre la surface frontale du cycliste leader et celle du cycliste abrité.

Peu d'études ont cependant investigué l'influence du *drafting* en cyclisme sur la performance lors de la course à pied d'un triathlon. Les premiers résultats présentés par Hausswirth et al. (1999) ont révélé que le *drafting* lors d'un triathlon « sprint » diminue le coût énergétique de la course à pied (-14%), FC (-8%) et \dot{V}_E (-31%) lorsque le triathlète réalise une épreuve de 20km à une vitesse moyenne de $39,5\text{km.h}^{-1}$ en demeurant 20 à 50cm derrière le cycliste leader. L'autorisation du *drafting* lors de la partie cycliste des épreuves internationales de triathlon distance Olympique et du départ groupé souvent constaté au départ de la course à pied, il semble important pour les triathlètes d'optimiser autant que possible les effets reliés au *drafting* pour économiser de l'énergie en vue de l'épreuve pédestre subséquente. Dans cette perspective, Hausswirth et al. (2001) ont

comparé les effets physiologiques du *drafting* continu par rapport au *drafting* alterné lors d'un triathlon indoor simulé sur distance sprint (750m de natation, 20km de cyclisme, 5km de course à pied). Ces auteurs ont ainsi révélé des gains supérieurs en s'abritant de manière continue plutôt que de manière alternée (-16,5% et -11,4% concernant les valeurs de $\dot{V}O_2$ et de FC, respectivement). Ce résultat, qui souligne les bénéfices importants du *drafting* en triathlon, met en exergue l'intérêt de conserver une position continuellement protégée lors de la partie cycliste des épreuves distance Olympique.

2.3.7.3. COURIR DANS UNE POSITION ABRITEE : QUELS GAINS ENVISAGER ?

En 1926, Sargent a conduit la première étude sur la relation entre $\dot{V}O_2$ et vitesse de course. Celui-ci avait alors résolu le problème posé par la méthode du sac de Douglas en demandant à ses sujets de bloquer leur respiration lors d'une course de 120 yards (~110m). Les gaz expirés étaient mesurés durant les 40min consécutives à la course et la valeur de $\dot{V}O_2$ au repos était déduite de celle à l'exercice. Les résultats avaient alors révélé que $\dot{V}O_2$ augmente à la puissance 3,8 de la vitesse de course. Plus de 40 ans plus tard, Pugh et al. (1971) ont constaté que 80% de l'énergie consommée pour vaincre les résistances à l'avancement lors d'une course à $6m.s^{-1}$ peuvent être conservés en courant juste derrière un autre coureur. Bien que des effets négatifs puissent être envisagés pour ce type de stratégie, un athlète devrait pouvoir réduire virtuellement $\dot{V}O_2$ de 6% (= $7,5 \times 0,80$) en courant à cette vitesse derrière un autre concurrent. D'après la relation démontrée par Pugh (1971) entre $\dot{V}O_2$ et la vitesse de course (lors d'une épreuve sur piste), la valeur de $\dot{V}O_2$ associée à une vitesse de $6m.s^{-1}$ est de $76mL.kg^{-1}.min^{-1}$. La vitesse associée à un gain de 6% de $\dot{V}O_2$ permettrait virtuellement l'atteinte d'une vitesse de $6.4m.s^{-1}$. Ce gain équivaudrait à une réduction du temps au 400m de 66,6 à 62,5s. L'expérience de terrain, suggère toutefois qu'en réalité, les athlètes ne peuvent pas courir aussi proches que cela les uns des autres, et que les bénéfices réels associés au *drafting* en course à pied sont plus faibles que ceux estimés par Pugh (1971).

Lors de la course à pied d'un triathlon, la première moitié des concurrents courent aux alentours de $5.6m.s^{-1}$ (Vleck et al. 2008), ce qui est proche de la vitesse pour laquelle Pugh (1971) a modélisé les bénéfices du *drafting* en course à pied. Ce constat suggère donc qu'il leur est potentiellement possible de réduire leur coût énergétique en course à pied en adoptant une position abritée derrière d'autres triathlètes. Sur le plan physiologique, ces bénéfices sont potentiellement bien moins importants pour les triathlètes féminines, étant donné que les meilleures d'entre elles courent à environ $4.8m.s^{-1}$ (Vleck et al. 2008).

2.3.7.4. L'INFLUENCE DE L'EXERCICE PREALABLE EN TRIATHLON

2.3.7.4.1. L'INFLUENCE DE LA NATATION SUR LE COUT ENERGETIQUE EN CYCLISME

Delestrat et al. (2003b) ont montré que l'influence d'un exercice préalable de natation se traduit par une diminution significative du rendement mécanique global du pédalage (-15,5%) lors d'une épreuve enchaînée par rapport à une épreuve cycliste de même durée globale et de même intensité. Ces résultats sont en accord avec ceux précédemment décrits par Kreider et al. (1988a), qui avaient observé des diminutions significatives de la puissance développée (-17%) et de l'efficience de pédalage (-8,8%) lors d'un triathlon sprint simulé en laboratoire (800m de natation, 40km de cyclisme, 10km de course à pied) par rapport à une épreuve cycliste isolée.

2.3.3.4.2. L'INFLUENCE DU CYCLISME SUR LE COUT ENERGETIQUE DE LA COURSE A PIED

Les triathlètes font souvent état de sensations en compétition qu'ils ne ressentent pas lorsqu'ils parcourent une épreuve isolée de course à pied. De nombreuses études ont tenté de caractériser les altérations physiologiques qui surviennent lors de ce type d'activité.

Dengel et al. (1989a) ont montré que le coût énergétique de la course influence significativement la performance en triathlon. Toutefois, la réponse physiologique et/ou biomécanique durant la course à pied d'un triathlon est aussi grandement influencée par la natation et le cyclisme. Boone et Kreider (1986) ont été les premiers à mesurer le coût énergétique de la course après un exercice cycliste préalable. Leur étude a révélé que le coût énergétique de la course est significativement dégradé lors d'une course de 5min à $9,6\text{km.h}^{-1}$ réalisée après 3min de pédalage à 80% de FC_{\max} . Il convient toutefois de noter que les participants de cette étude n'étaient pas des triathlètes mais des étudiants physiquement actifs, dont le niveau de performance était très éloigné de celui constaté chez des triathlètes de haut niveau.

Des études ont par ailleurs montré que les valeurs de $\dot{V}\text{O}_2$, \dot{V}_E , FC et de la différence artério-veineuse en oxygène sont plus élevées à la fin d'un triathlon simulé en laboratoire consistant en 800m de natation, 40km de cyclisme et 10km de course à pied qu'à la fin d'une course isolée de 10km (Kreider et al. 1988a; Kreider et al. 1988c). Il a été conclu par ces auteurs que des adaptations cardiovasculaires sont mises en place pour contrebalancer la charge thermique engendrée par la natation et le cyclisme. Les résultats issus de ces deux études constituent une meilleure base de réflexion, par rapport à ceux obtenus par Boone et Kreider en (1986), quand bien même la réalisation de la course à pied sur tapis roulant dans cette étude n'avait pas reproduit strictement les conditions écologiques de pratique. Guézennec et al. (1996) ont prolongé ces travaux en comparant la réponse

métabolique mesurée lors de la course à pied d'un triathlon distance Olympique réalisée sur piste par rapport à une course-contrôle de 10km. Leurs résultats ont confirmé que le coût énergétique de la course à pied en triathlon est significativement augmenté par rapport à celui de la course isolée (224 vs. 207mLO₂.kg⁻¹.km⁻¹, respectivement) et que la course à pied d'un triathlon est associée à une plus grande valeur de \dot{V}_E . Ces auteurs ont suggéré qu'une modification des facteurs cinématiques (e.g. amplitude et fréquence de foulée) pourrait probablement expliquer cette dégradation de l'efficience de course, bien que ces paramètres n'aient pas été mesurés dans cette étude. Hausswirth et al. (1996) ont conduit une étude similaire, lors de laquelle a été comparée une course de 45min réalisée dans le cadre d'un triathlon avec une course contrôle de 45 minutes réalisée à une vitesse de course identique. L'augmentation du coût énergétique durant la course à pied du triathlon par rapport à la course contrôle a été confirmée (224 vs. 207mLO₂.kg⁻¹.km⁻¹, respectivement). Pour expliquer ce résultat, les hypothèses d'une hypovolémie plasmatique et d'une plus grande perte de masse à la fin du triathlon ont été avancées ; celles-ci renvoyant toutes deux à la durée de l'épreuve et aux spécificités du triathlon. Par ailleurs, une estimation de l'amplitude de foulée menée durant les deux épreuves a montré que la foulée spontanément adoptée lors de la phase initiale de la course à pied en triathlon est caractérisée par une plus faible amplitude et une plus grande fréquence. Cette réponse adaptative semble être engendrée par l'épreuve de cyclisme préalable puisque ces différences ont progressivement disparu lors de la course à pied enchaînée ; les deux conditions menant à des valeurs identiques en termes de couple amplitude/fréquence de foulée en fin de test. Le triathlon semble ainsi présenter des spécificités tant bioénergétiques que biomécaniques associées à des changements posturaux qui interviennent lors de l'enchaînement cyclisme/course à pied (Hausswirth et Brisswalter 2008; Hausswirth et Lehenaff 2001).

Ce qu'il faut retenir

La capacité que possède le triathlète à minimiser sa dépense d'énergie pour une vitesse de déplacement donnée constitue un facteur de la performance en triathlon dans les trois disciplines. Plusieurs travaux ont pu mettre en exergue l'existence de différences importantes du coût énergétique de la locomotion chez des spécialistes d'activités de longue distance, ce qui nous amène à identifier le coût énergétique comme une caractéristique physiologique importante chez les triathlètes « élite ». De plus, des études ont révélé une dégradation significative du coût énergétique du pédalage et de la course à pied, lorsque ces modes de locomotion sont précédés d'une épreuve de natation et/ou de cyclisme, comme en triathlon. La capacité à limiter ces altérations par l'entraînement et l'adoption d'une position abritée (*i.e. drafting*), incarne des facteurs déterminants de la performance en triathlon.

2.4. LES FACTEURS NEUROMUSCULAIRES

Bien que le succès dans les sports continus de longue durée comme le triathlon requière une haute valeur de $\dot{V}O_{2\max}$, la capacité à soutenir une fraction élevée de $\dot{V}O_{2\max}$ tout au long de l'épreuve et un faible coût énergétique de la locomotion, ces variables ne déterminent pas pour autant complètement la performance dans ces activités (Nummela et al. 2006). Nummela et al. (2006) ont montré que la performance lors d'une épreuve de course prolongée est mieux expliquée si le modèle traditionnel de la performance aérobie combinant la « performance aérobie » ($\dot{V}O_{2\max}$, % de $\dot{V}O_{2\max}$, Joyner et Coyle 2008) et le coût énergétique de la locomotion (Bassett et Howley 1997; di Prampero et al. 1986) est complété par l'évaluation de la capacité neuromusculaire à produire de la force. Nummela et al. (2006) proposent d'évaluer la puissance musculaire d'un athlète à partir de la vitesse de course maximale atteinte lors d'un test consistant à réaliser 10x150m avec une récupération de 100s entre chaque course (test V_{MART}). La vitesse est fixée à $4,75m.s^{-1}$ lors du premier passage puis incrémentée de $0,41m.s^{-1}$ à chaque tentative. Le dernier 150m est réalisée à vitesse maximale. Comme le révèle la **Figure 4**, ces auteurs ont montré que la performance lors d'une épreuve de course de 5km est mieux expliquée (73% vs. 56%) lorsque la vitesse maximale atteinte lors du test V_{MART} est intégrée au modèle classique de di Prampero (1986). Ces résultats ont été confirmés par d'autres études qui ont montré que la performance réalisée lors du test V_{MART} est positivement corrélée aux temps de course du 400m au 5000m (Paavolainen et al. 1999a; Rusko et al. 1993; Rusko et Nummela 1996).

Ces résultats ont été renforcés par Paavolainen et al. (1999a) qui ont montré que la performance en course à pied sur 5km est améliorée par l'introduction d'un entraînement de 9 semaines en musculation consistant à mobiliser à grande vitesse de faibles charges (30% de la force maximale développée sur une répétition maximale volontaire). Plus précisément, ces auteurs ont révélé que la performance de coureurs entraînés était améliorée lorsque 30% de leur temps d'entraînement aérobio habituel était remplacé par un travail de musculation. Dans le même temps, aucun progrès significatif n'était constaté pour un groupe contrôle conservant un travail aérobio classique. Ce résultat a semblé être expliqué par l'amélioration concomitante du coût énergétique, la réduction du temps de contact du pied au sol pour une vitesse de course donnée (révélatrice d'une meilleure qualité d'appui) et l'amélioration de la vitesse maximale atteinte par ces athlètes lors du test V_{MART} (Paavolainen et al. 1999a). Paavolainen et al. (1999b) ont par ailleurs conforté cette hypothèse en montrant que les coureurs très entraînés présentent une plus grande pré-activation et un plus grand recrutement musculaire à l'appui que des coureurs peu expérimentés. Ceci leur permettrait de réduire la phase d'écrasement au sol et de limiter leur temps de contact pour une vitesse de course donnée. Nummela et al. (2006) ont de plus observé qu'il existe une relation positive entre la

performance sur 5km et la capacité du coureur à maintenir son niveau de recrutement musculaire durant la course. L'ensemble de ces résultats suggère que plus les unités motrices des muscles des membres inférieurs sont puissantes, moins il est nécessaire au coureur d'activer un grand nombre d'unités motrices de type II, fatigables et coûteuses en énergie, pour atteindre une vitesse de course donnée (Paavolainen et al. 1999a).

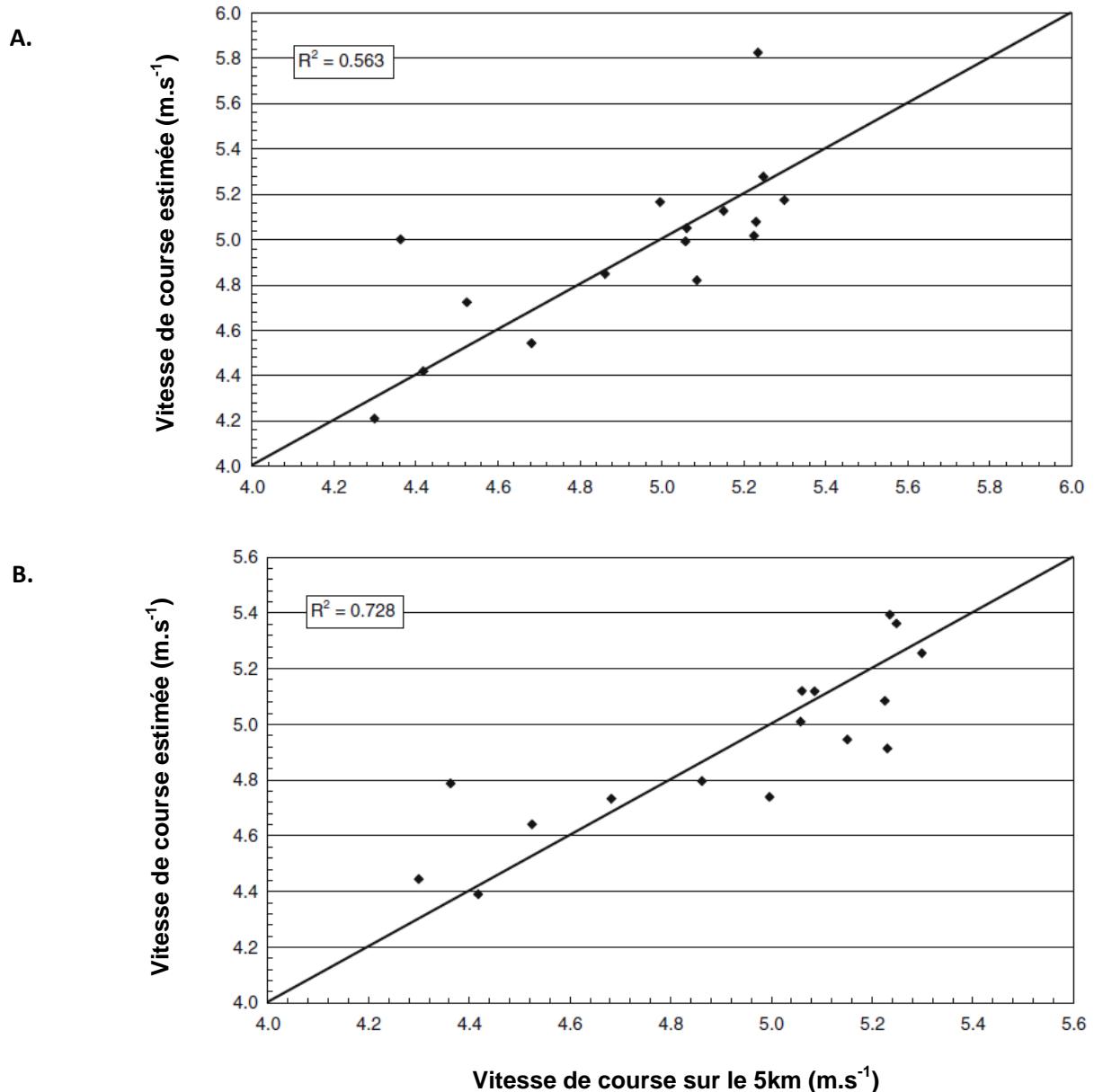


Figure 4. Performances sur 5km réalisées par des coureurs entraînés et performances estimées par les modèles de di Prampero (1986) (A) et Nummela et al. (2006) (B). Les droites noires représentent la ligne d'identité. *D'après Nummela et al. (2006).*

Une étude a par ailleurs mis en évidence qu'il existe un phénomène de fatigue neuromusculaire des extenseurs du genou à l'issue d'une course cycliste de 140km réalisée par des cyclistes entraînés (Millet et al. 2003a). Ces auteurs ont ainsi montré une baisse de la force maximale isométrique volontaire générée lors d'une extension du genou (-9%), sans pour autant d'une diminution de l'activation maximale volontaire ne soit constatée. Ce résultat démontre l'apparition d'un état de fatigue périphérique à l'issue de ce type d'exercice et suggère l'importance potentielle des facteurs neuromusculaires dans la performance en triathlon distance Olympique, quand bien même la durée d'effort était plus longue dans l'étude de Millet et al. (2003a). Deux études ont d'ailleurs depuis confirmé cette hypothèse et mis en évidence une diminution de la force maximale isométrique volontaire à l'issue de 30min de pédalage à 70-75% de la puissance maximale aérobie chez des triathlètes entraînés (Lepers et al. 2008; Theurel et Lepers 2008). Ces résultats confirment l'importance des capacités neuromusculaires dans le cadre de la performance en triathlon distance Olympique.

Ce qu'il faut retenir

La vitesse de course moyenne adoptée lors des épreuves de Coupe du Monde par les meilleurs triathlètes se situe actuellement autour de 20km.h^{-1} . L'atteinte de telles allures suppose de hautes qualités neuromusculaires pour lutter contre les forces d'écrasement et assurer la propulsion du coureur tout en conservant une grande économie de course. Plusieurs études ont montré que l'entraînement des qualités de force explosive des membres inférieurs engendre l'amélioration de la performance dans les activités de longue durée comme le triathlon. Pour la course à pied, ce type de travail est associé à un meilleur maintien des paramètres cinématiques de la foulée ainsi qu'à un meilleur coût énergétique.

3. LA MODELISATION DES STRATEGIES D'ALLURE

Toujours dans le souci d'améliorer et de comprendre la performance en sport à haut niveau, plusieurs scientifiques ont étudié la manière dont le travail est distribué lors d'une épreuve sportive (Abbiss et Laursen 2008; Foster et al. 1994). Cette gestion du travail lors d'un exercice donné est reflétée par l'évolution de la vitesse de déplacement ou de la puissance développée par l'athlète en situation de compétition. Il est aujourd'hui bien documenté qu'il est essentiel d'optimiser cette gestion de l'effort pour repousser les limites de la performance chez l'athlète (Abbiss et Laursen 2008; Foster et al. 1994). L'objectif de ce second chapitre sera i) d'identifier les différents modèles de stratégie d'allure observées en compétition, ii) de caractériser les situations dans lesquelles il est recommandable d'adopter chacune d'entre elles et iii) de transposer cette analyse à la pratique du triathlon distance Olympique à haut niveau.

La plupart des disciplines sportives, comme le triathlon mais aussi la course à pied, la natation, le cyclisme, l'aviron, le ski de fond ou le patinage de vitesse sont considérées comme des épreuves « en boucle fermée » (St Clair Gibson et al. 2003). Cela signifie que dans ces activités, le but de l'athlète est de parcourir une distance connue à l'avance en un temps plus court que ces adversaires (Foster et al. 1993; Padilla et al. 2000b). Dans la pratique, les athlètes sont confrontés soit directement à d'autres concurrents lors d'épreuves en ligne soit indirectement lors d'épreuves contre-la-montre (Foster et al. 1993). Lors des compétitions en ligne, cette confrontation est directe et une infime marge d'avance suffit pour remporter la course. Ainsi, les actions des adversaires et des coéquipiers influencent souvent les dynamiques de la course, rendant ainsi l'équipe, l'entraîneur et les tactiques individuelles déterminantes pour l'issue finale de la course. Lors des épreuves contre-la-montre, cette confrontation est indirecte et le résultat est fonction du temps requis pour parcourir la distance fixée. L'un des avantages de ce type de courses pour les chercheurs en sciences du sport est que l'absence de confrontation avec des adversaires directs rend possible la réplication en laboratoire des conditions de course vécues en compétition avec une plus grande fidélité et la modélisation des stratégies d'allure adoptées lors de ce type d'épreuves (Billat et al. 1999; de Koning et al. 1999; Faria et al. 2005a; Swain 1997).

3.1. LES STRATEGIES D'ALLURE DECREMENTALE

3.1.1. LES STRATEGIES D'ALLURE DECREMENTALE AVEC DEPART A INTENSITE SOUS-MAXIMALE

Une stratégie d'allure décroissante (dite en *positive-split*) se caractérise par une diminution progressive de la vitesse de locomotion au cours de l'épreuve analysée. Celle-ci est classiquement

observée lors de disciplines comme le 100m et le 200m en natation (Thompson et al. 2003) ou les courses sur 2000m en aviron (Garland 2005). Sandals et al. (2006) ont montré que les coureurs de 800m qui s'approchent à 2% du record du monde démontrent ce type de stratégie. Leurs résultats ont mis en évidence que les 200 premiers mètres, les 400m intermédiaires et les 200 derniers mètres sont respectivement courus à 107,4%, 98,3% et 97,5% de la vitesse moyenne du 800m. Comparée avec une stratégie d'allure constante, cette stratégie d'allure décroissante engendre l'utilisation d'une plus grande fraction de $\dot{V}O_{2\max}$ durant l'épreuve ($89,3 \pm 2,4\%$ vs. $92,5 \pm 3,1\%$ de $\dot{V}O_{2\max}$) (Sandals et al. 2006).

Il a été mis en évidence d'autre part que l'adoption d'une stratégie d'allure décroissante engendre l'atteinte d'une plus haute valeur pic de $\dot{V}O_2$ (Bailey et al. 2010; Sandals et al. 2006; Thompson et al. 2003), une plus grande accumulation de métabolites possiblement responsable d'une baisse de la contractilité musculaire (Thompson et al. 2003, 2004) ainsi qu'une plus grande augmentation de la difficulté d'effort perçue lors de la phase initiale de l'exercice (Thompson et al. 2003). Plusieurs auteurs ont fait l'hypothèse que la réduction terminale de l'intensité d'exercice associée à ce type de stratégie survient de sorte à ce qu'aucune défaillance de l'un des systèmes physiologiques mis en jeu ne survienne (Marino 2004; Noakes et al. 2005; Thompson et al. 2004). Des études ont en effet distingué que des cyclistes entraînés (puissance maximale aérobie moyenne $\geq 370W$) démontrent spontanément une puissance de pédalage élevée lors de la phase initiale d'un exercice de pédalage réalisé dans une ambiance chaude ($35^\circ C$) (Tucker et al. 2006b; Tucker et al. 2004). Ces auteurs ont distingué qu'après ce départ rapide, la réduction de la puissance de pédalage par unité de temps est significativement plus grande que dans une condition de neutralité thermique (15°) ($2,35 \pm 0,7$ vs. $1,61 \pm 0,8W \cdot min^{-1}$) (Tucker et al. 2006b). Dans cette étude, il était demandé aux participants de pédaler à une difficulté d'effort perçue fixée à 16 sur l'échelle de cotation de la difficulté d'effort perçue (soit entre « difficile » et « très difficile ») jusqu'à ce que la puissance de sortie diminue en dessous de 70% de la puissance initiale adoptée. Etant donné que la cinétique de décroissance de la puissance de pédalage était corrélée à celle de l'accumulation de la chaleur ($r = 0,92$, $p < 0.05$), Tucker et al. (2006b) ont fait l'hypothèse que le travail consenti était continuellement ajusté lors de l'exercice de sorte à prévenir une élévation trop rapide de la température corporelle et *in fine* l'atteinte d'une valeur critique de celle-ci ($\sim 39,5\text{--}40,5^\circ C$). Les raisons pour lesquelles les athlètes adoptent spontanément une puissance de pédalage élevée lors de la phase initiale de l'exercice demeurent à clarifier (Tucker et al. 2006b; Tucker et al. 2004) mais semblent toutefois reliées à l'absence de stress thermique au début de l'épreuve. De nouvelles études semblent nécessaires pour mieux comprendre l'influence de l'ambiance thermique et des mécanismes de thermorégulation lors des épreuves durant lesquelles la stratégie d'allure est laissée libre.

D'autres résultats suggèrent que ce type de stratégie est aussi visible lors de compétitions d'ultra-endurance (Abbiss et al. 2006; Laursen et al. 2005; Laursen et al. 2002; Martin et al. 2010; Neumayr et al. 2002; Neumayr et al. 2004; O'Toole et al. 1998) (Figure 5). Par exemple, des études ont montré que la fréquence cardiaque diminue en moyenne de 1 à 2% par heure lors d'épreuves de cyclisme et de triathlon durant entre 6 et 24 heures réalisées par des sportifs amateurs (Laursen et al. 2005; Neumayr et al. 2004) ou « élite » (Neumayr et al. 2004). Il est considéré que cette réduction progressive de l'intensité d'exercice pourrait être reliée à la déplétion du stock de glycogène musculaire (Coyle et Coggan 1984; Rauch et al. 2005), qui engendrerait une réduction de l'activité métabolique (Laursen et Rhodes 2001; Neumayr et al. 2004; O'Toole et al. 1998), source de l'apparition d'un phénomène de fatigue neuromusculaire (Abbiss et Laursen 2005; Hausswirth et al. 1997a; Laursen et Rhodes 2001; Lepers et al. 2002) et/ou d'une défaillance psychologique reliée à l'augmentation de la difficulté d'effort perçue (Neumayr et al. 2004; St Clair Gibson et al. 2003).

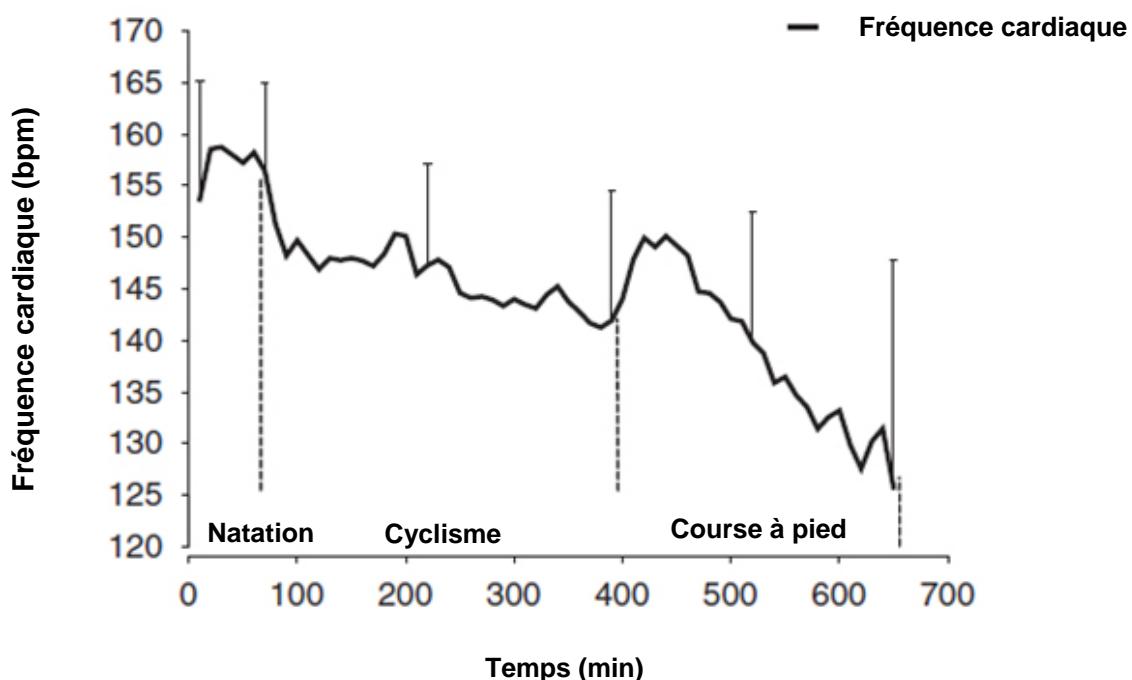


Figure 5. Exemple de stratégie d'allure décroissante révélée par la baisse de la fréquence cardiaque durant un triathlon longue distance *Ironman*; $n = 27$. D'après Laursen et al. (Laursen et al. 2005; Laursen et al. 2006).

Une étude récente de Martin et al. (2010) a apporté des réponses intéressantes concernant l'origine de la fatigue lors d'une épreuve de course de très longue durée. 12 coureurs ultra-fondeurs expérimentés ont réalisé une épreuve de 24h sur tapis roulant à allure libre, avec pour objectif de réaliser la meilleure performance possible. Les résultats ont révélé une baisse progressive de la

vitesse tout au long de l'épreuve. Celle-ci était concomitante à une réduction de la force maximale volontaire développée lors d'extensions du genou et de flexions de la cheville elles-mêmes associées à une diminution de l'activation maximale volontaire. Seul le muscle *soleus* a révélé une réduction de l'amplitude maximale du potentiel d'action musculaire et aucun phénomène de fatigue basse fréquence n'a été observé pour les muscles *soleus* et *vastus lateralis*. Finalement, une faible réduction de la capacité de production de force des extenseurs du genou était constatée à la fin des 24h d'exercice, même si ce paramètre était variable entre les participants. Ces résultats suggèrent donc que la réduction de l'allure de course (et donc la stratégie d'allure décroissante associée) était reliée à une fatigue d'origine centrale. Martin et al. (2010) suggèrent que cette stratégie était destinée à préserver la fonction périphérique face aux dommages engendrés par ce type d'épreuves. Si ces résultats apportent des informations décisives dans la compréhension des phénomènes de fatigue à l'origine des variations de vitesse observées lors de ce type d'épreuves, de nouvelles études semblent nécessaires pour mieux comprendre comment optimiser la stratégie d'allure lors de ce type d'épreuves.

3.1.2. LES STRATEGIES D'ALLURE DECREMENTALE AVEC DEPART A INTENSITE MAXIMALE

Lors des épreuves sportives de courte durée réalisée avec un départ arrêté, le coût énergétique associé à l'accélération influence fortement la stratégie d'allure requise pour réaliser la meilleure performance possible (van Ingen Schenau et al. 1992). Tibshirani (1997) a par exemple mis en évidence qu'environ 50 à 60% de l'énergie dépensée par un coureur lors d'un sprint sur 100m est consommée lors de la phase d'accélération. En effet, l'énergie pour maintenir une vitesse de course constante est moindre que celle nécessaire pour accélérer, a fortiori lorsque l'inertie est grande, comme c'est le cas lorsqu'il s'agit de mettre en mouvement la masse corporelle de l'athlète lors d'un départ arrêté. Etant donné que la quantité d'énergie requise pour accélérer est incompressible et que cette phase initiale représente une part importante du temps d'épreuve global, on considère qu'il est plus intéressant de concentrer celle-ci lors du départ d'épreuves de courte durée ; toutes stratégies consistant à adopter une vitesse initiale sous-maximale résultent en une moins bonne performance (de Koning et al. 1999; van Ingen Schenau et al. 1992).

Après qu'un athlète ait atteint une haute vitesse de pointe via un départ à allure maximale (stratégie *all-out*), sa vitesse tend à décliner progressivement (Wilberg et Pratt 1988; Wittekind et al. 2009), ce qui potentiellement peut résulter en une performance sous-optimale (de Koning et al. 1999; van Ingen Schenau et al. 1992). Il convient néanmoins de souligner que lors d'une course contre-la-montre, toute vitesse/énergie résiduelle lors du franchissement de la ligne d'arrivée incarne une

quantité d'énergie gaspillée (de Koning et al. 1999; van Ingen Schenau et al. 1992). Ainsi, par rapport à une allure constante, la stratégie *all-out* permet de réduire ces pertes en raison d'une vitesse finale plus faible (de Koning et al. 1999; van Ingen Schenau et al. 1992). Les spécialistes de sprint court semblent ainsi bénéficier de cette stratégie, malgré les plus grandes résistances à l'avancement engendrées par leur haute vitesse initiale. Le choix à opérer entre réduire l'énergie cinétique gaspillée et/ou réduire celle requise pour vaincre les résistances à l'avancement dépend de la quantité d'énergie cinétique perdue à l'arrivée et de l'ampleur des résistances à l'avancement qui s'opposent au sportif (Arsac et Locatelli 2002; de Koning et al. 1999). Plus l'épreuve est longue et moins l'importance de l'énergie cinétique perdue devient relative au coût énergétique associée à la lutte contre les résistances aérodynamiques/hydrodynamiques. En utilisant de multiples modèles mathématiques et constantes physiologiques calculées lors de records du monde, Keller (1974) a déterminé qu'une stratégie *all-out* conduit virtuellement à une performance optimale jusqu'à des épreuves de course d'une distance de 291m. Une limite de ce calcul et d'autres du même genre (Mureika 1997; Tibshirani 1997), est que ces derniers sont fondés sur des constantes physiologiques qui déterminent les capacités maximales d'accélération, de vitesse, d'endurance et de vitesse de développement de la fatigue chez l'athlète, alors que ces constantes influencent largement la distance jusqu'à laquelle il est préférable d'utiliser une stratégie *all-out*. Malgré tout, les résultats de Keller (1974) apparaissent crédibles, étant donné que la quantité d'énergie d'origine anaérobie devient significativement réduite après un exercice maximal de type *all-out* sur une distance supérieure à environ 300m (*i.e.* ~ 30-60s) (Gastin 2001).

3.2. LES STRATEGIES D'ALLURE CROISSANTE

Une stratégie d'allure est considérée comme croissante (*i.e.* stratégie en *negative-split*) lorsqu'une augmentation de la vitesse de déplacement est constatée lors de celle-ci. L'adoption de ce type de stratégie est généralement constatée lors des épreuves de moyenne distance comme le 5000m ou le 10 000m en athlétisme, alors qu'il s'agit de terminer à la meilleure place possible et non de vaincre un record (Tucker et al. 2006a) ([Figure 6](#)). Cette augmentation finale de l'intensité d'exercice est visible habituellement au cours de compétitions lors desquelles les athlètes sont conscients de la distance (St Clair Gibson et al. 2001a; Tucker et al. 2004) ou du temps d'épreuve restant (Kay et al. 2001; Rauch et al. 2005; Tatterson et al. 2000). On considère que cette augmentation finale de l'allure est assurée par un plus grand recrutement neuromusculaire (Tucker et al. 2004) et par une contribution accrue des processus anaérobies de resynthèse de l'énergie (Foster et al. 2004).

D'après certains auteurs, la stratégie d'allure croissante est susceptible d'optimiser la performance lors d'exercice de longue durée en réduisant la vitesse de déplétion des carbohydrates (Palmer et al. 1999) et/ou de limiter l'accumulation des métabolites responsables à l'apparition de la fatigue neuromusculaire lors d'exercices de durée intermédiaire (*i.e.* accumulation des ions hydrogène, du phosphate inorganique, fuite extracellulaire des ions potassium) lors de la phase précoce de l'exercice (Mattern et al. 2001; Robinson et al. 1958). Dans cette perspective, Mattern et al. (2001) ont montré qu'une plus faible lactatémie est observée lors des 9 premières minutes d'un contre-la-montre de 20km chez des coureurs cyclistes lorsque ceux-ci augmentent progressivement leur allure par rapport à d'autres stratégies consistant à partir plus vite. Les résultats rapportés par cette étude ont de plus révélé une amélioration significative de la performance lorsque la puissance de pédalage initiale spontanée adoptée était réduite de 15%.

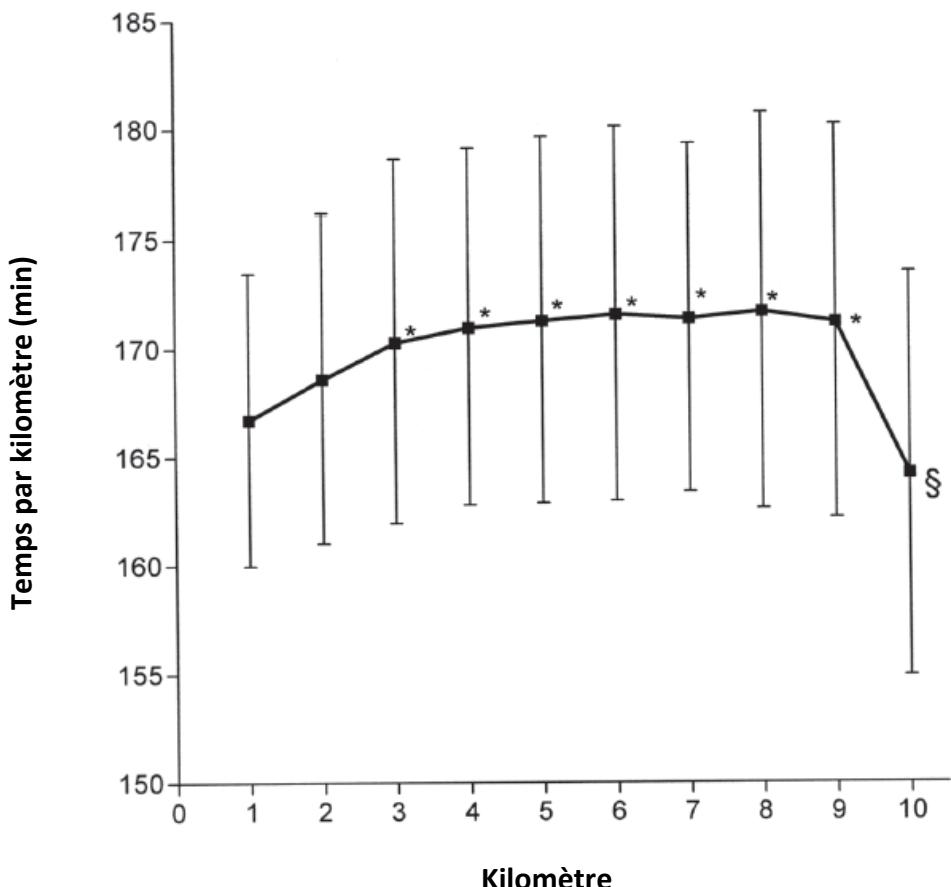


Figure 6. Evolution du temps par kilomètre lors des 34 records du monde du 10 000m battus entre 1921 et 2004. *Significativement plus grand que lors des kilomètres 1, 2 et 10 ($p < 0.05$). §Significativement plus faible que lors des 9 kilomètres précédents ($p < 0,005$). *D'après* Tucker et al. (2006a).

3.3. LES STRATEGIES D'ALLURE CONSTANTE

Si la stratégie de départ adoptée est susceptible d'influencer significativement la performance lors des épreuves d'une durée inférieure à la minute, l'impact de celle-ci semble moins important pour les activités de longue durée, étant donné la part relative plus faible représentée par la phase d'accélération initiale (Foster et al. 2005; Foster et al. 1994). En conséquence, il est suggéré que dans des conditions externes stables (*i.e.* environnement et topographie), l'emploi d'une stratégie d'allure constante est optimale pour les épreuves de locomotion de longue durée comme la course à pied, la natation, l'aviron, le patinage de vitesse et cyclisme (de Koning et al. 1999; Thompson et al. 2003, 2004). Wilberg et Pratt (1988) ont montré que les coureurs cyclistes sur piste de niveau national et international spécialistes de la poursuite adoptent une stratégie d'allure plus constante que celle démontrée par des coureurs moins experts. Une autre étude ayant suggéré les bénéfices d'une stratégie d'allure constante a été présentée par Padilla et al. (2000a), à partir de l'analyse d'un record du monde de l'heure en cyclisme sur piste. De cette analyse il est ressorti que le cycliste étudié (*i.e.* Miguel Indurain) avait été capable de maintenir une vitesse de déplacement très stable tout sa course record, ne démontrant que de très faibles variations de vitesse autour de la vitesse-cible planifiée ($53,0\text{km.h}^{-1}$) (Figure 7).

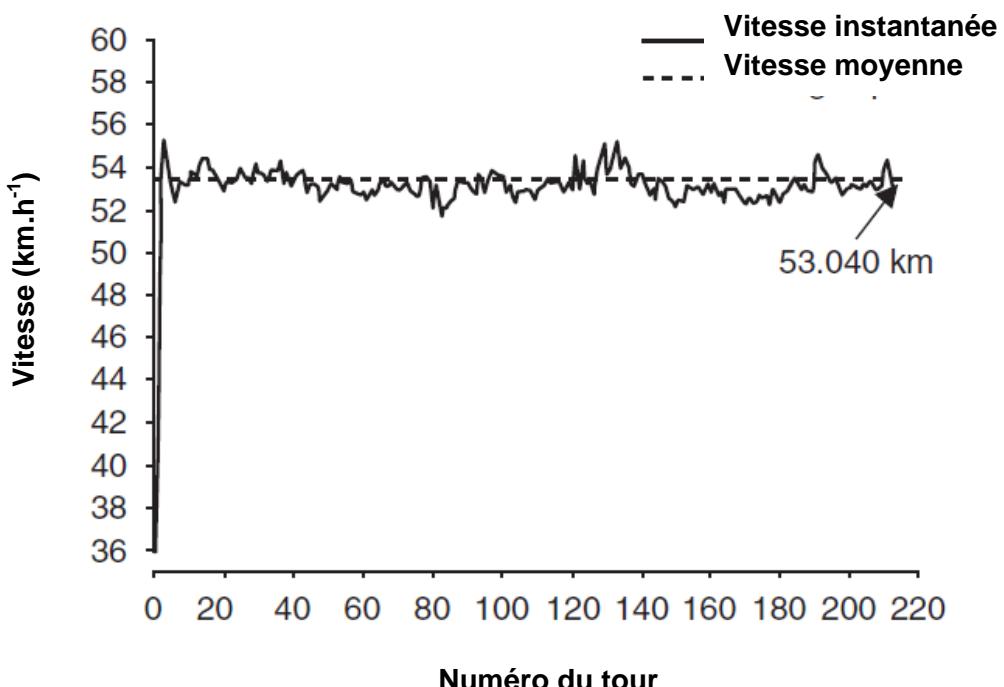


Figure 7. Evolution de la vitesse instantanée de Miguel Indurain lors de son record de l'heure en 1994
D'après Padilla et al. (2000a).

Etant donné qu'à vitesse élevée ($> 40\text{km.h}^{-1}$), les résistances aérodynamiques représentent la quasi-totalité des résistances à l'avancement qui s'opposent au cycliste et que ces dernières évoluent en

fonction du carré de la vitesse de déplacement, il apparaît en effet moins coûteux sur le plan biomécanique de maintenir une vitesse constante plutôt que d'adopter une stratégie variable (di Prampero et al. 1979). Fukuba et Whipp (1999) ont par ailleurs montré que la performance d'un athlète est compromise si le travail qu'il produit lors d'une épreuve de longue durée dépasse ses limites physiologiques (*i.e.* « seuil de fatigue » ou « puissance critique ») à un quelconque moment de celle-ci. Comme de faibles fluctuations de vitesse peuvent de surcroît engendrer une augmentation du coût énergétique de la locomotion en raison de l'augmentation des résistances à l'avancement (Zamparo et al. 2005), il est possible que la performance lors d'épreuves prolongées soit optimisée par une minimisation des phases d'accélération et de décélération (Swain 1997).

3.4. LES STRATEGIES D'ALLURE PARABOLIQUE

Historiquement, les recherches sur la régulation de la dépense énergétique lors d'un exercice ont étudié cette distribution à travers des périodes de temps relativement prolongées et/ou sur des distances relativement longues. Ces études ont souvent examiné les différences de performance entre la première et la seconde moitié de l'épreuve (Atkinson et al. 2007; van Ingen Schenau et al. 1992). Cependant, ce type d'analyse ne permet qu'une analyse globale de la stratégie d'allure (croissante, décroissante ou constante) et ne permet pas d'étudier avec précision la variabilité de l'allure lors d'une compétition. Le développement de systèmes de mesure de vitesse ou de puissance a permis progressivement de lever ce type de problème méthodologique et de décrire avec une plus grande précision les stratégies d'allure adoptées par les sportifs en situation de compétition (Abbiss et al. 2006; Atkinson et Brunsell 2000; Garland 2005). Grâce à l'utilisation de ces technologies, plusieurs études ont révélé que, dans certaines disciplines, les athlètes diminuent progressivement leur allure de déplacement avant d'augmenter celle-ci en fin d'épreuve (Garland 2005; Tucker et al. 2004) ([Figure 8](#)). Ce type de stratégie, modélisée par des courbes en U, en J ou en J inversé (Abbiss et Laursen 2008) a déjà été rapporté par Garland (2005) chez des rameurs de haut niveau suivis lors des Jeux Olympiques de Sydney 2000, les Championnats du Monde 2001 et 2002 ainsi que lors des championnats britanniques indoor 2001 et 2002 ([Figure 8](#)). Lors de ces épreuves, les rameurs ont systématiquement réalisé les 500 premiers mètres plus vite que le reste de l'épreuve, avant de ralentir lors des 1000m médians et d'accélérer lors des 500 derniers mètres (5,1s plus vite que les autres portions de la course). Ce type de stratégie se caractérise par une courbe en forme de J inversé.

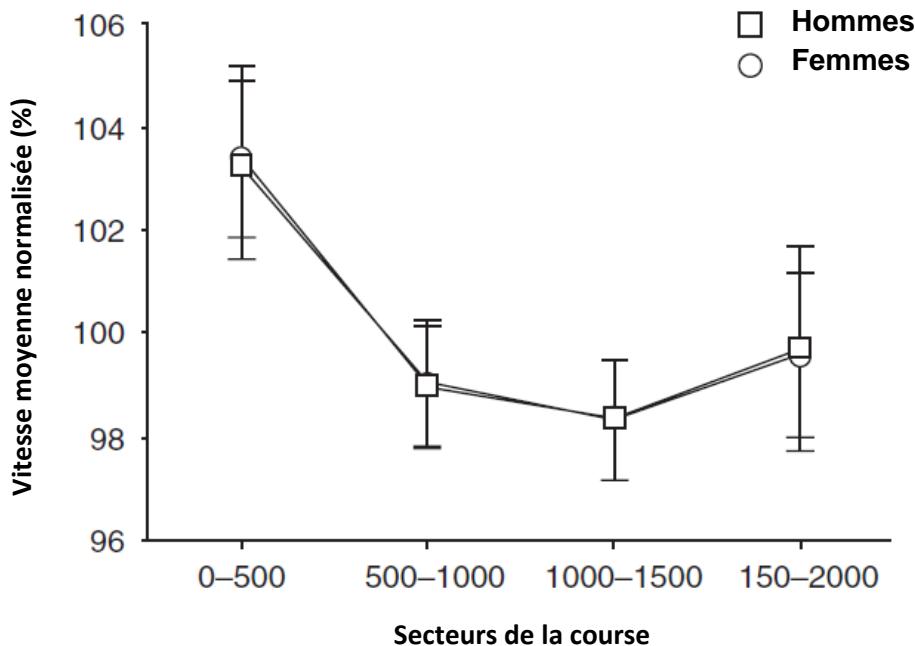


Figure 8. Exemple de stratégie d'allure en J inversé classiquement observée lors des compétitions internationales d'aviron. D'après Garland (2005).

Tucker et al. (2004) ont montré que des cyclistes engagés dans une épreuve contre-la-montre de 20km réalisée en ambiance chaude réduisent progressivement leur puissance de pédalage tout au long de l'exercice avant de l'augmenter à nouveau lors des derniers 5% de la course, malgré l'atteinte d'une température interne jugée critique ($39,2 \pm 0,6^\circ\text{C}$). On considère que cette augmentation finale de l'intensité d'exercice est le résultat d'une augmentation du recrutement neuromusculaire (Tucker et al. 2004) relié à la capacité du sportif à resynthétiser l'énergie par voie anaérobie en fin d'épreuve (Foster et al. 2004). Ainsi, le choix de la stratégie d'allure n'apparaît pas dicté uniquement par la modification des afférences physiologiques engendrées par l'exercice, mais est aussi fonction de l'expérience passée et de la durée d'effort à fournir estimée (Abbiss et Laursen 2005). Toutefois, ce type d'études transversales ne permet pas de caractériser un lien de cause-à-effet entre la stratégie d'allure adoptée et ces différentes variables. Ces résultats expérimentaux demandent à être croisés avec une approche holistique et multidimensionnelle pour mieux comprendre comment le travail est régulé au cours d'une épreuve sportive.

3.5. LES STRATEGIES D'ALLURE VARIABLE

La recherche concernant la description des stratégies d'allure est souvent compliquée par un grand nombre de facteurs externes tels que la durée de la course (Foster et al. 2004), le profil du

parcours (Swain 1997) et des conditions environnementales comme le vent (de Koning et al. 1999) et la température ambiante (Tucker et al. 2006b; Tucker et al. 2004). Pour cette raison, la majorité des études sur les stratégies d'allure a été conduite dans un cadre standardisé (Atkinson et Brunskill 2000; Foster et al. 2004; Mattern et al. 2001). Il apparaît pourtant très rare dans certaines disciplines que ces conditions soient effectivement parfaitement stables, notamment dans les sports pratiqués en extérieur (Atkinson et Brunskill 2000). Lorsque les conditions externes varient lors de l'épreuve, il a été suggéré qu'une stratégie variable, consistant à faire fluctuer le travail produit au cours de l'épreuve, est optimale (Atkinson et Brunskill 2000; Liedl et al. 1999). Il convient de noter à cet égard que la plupart des études qui ont examiné les stratégies d'allure variables ont analysé les variations de puissance davantage que les variations de vitesse survenant au cours de la compétition (Atkinson et Brunskill 2000; Atkinson et al. 2007; Liedl et al. 1999). En effet, étant donné qu'une stratégie d'allure variable est généralement adoptée pour contrebalancer les variations des conditions externes d'exercice (pente, vent, etc.) (Swain 1997), l'analyse des variations de puissance est susceptible de mieux rendre compte de la variabilité du travail produit lors de l'exercice que l'analyse des variations de vitesse (Abbiss et Laursen 2008).

Dans cette perspective et à partir de l'utilisation d'un modèle mathématique (di Prampero et al. 1979), Swain (1997) a montré qu'il est possible d'améliorer la performance lors d'une épreuve cycliste contre-la-montre de 10km en augmentant la puissance de pédalage dans les portions ascendantes et en la diminuant dans les portions descendantes, plutôt qu'en maintenant une puissance strictement constante tout au long de l'épreuve (22,8 vs. 24,3min, respectivement). Ce stratégie est basée sur le postulat que sur un circuit vallonné, une plus grande portion du temps de course global est passée dans les portions ascendantes que dans les portions descendantes, à condition que celles-ci soient d'un dénivelé identique (Swain 1997). En augmentant le travail produit dans les sections en montée et en le diminuant dans celles en descente, les cyclistes sont ainsi capables de maintenir une allure plus constante, se concrétisant par une meilleure performance globale (Swain 1997).

Les implications physiologiques d'une stratégie d'allure variable sont à prendre en considération, étant donné que l'augmentation de l'intensité d'exercice modifie la demande métabolique associée à la réalisation de l'exercice (Sandals et al. 2006; Swain 1997; Thompson et al. 2000; Thompson et al. 2003). Atkinson et al. (2007) ont montré que 2 sujets sur 7 n'étaient pas capables de maintenir une stratégie d'allure variable consistant à varier la puissance de pédalage de $\pm 5\%$ autour de la puissance moyenne sur une épreuve cycliste contre-la-montre consistant à dépenser 800kJ.

Les mécanismes physiologiques responsables de cette incapacité à adopter une stratégie d'allure variable de ce type demeurent à clarifier. Les résultats des études de Liedl et al. (1999) et d'Atkinson

et al. (2007) démontrent que des variations de puissance de pédalage de $\pm 5\%$ de la puissance de pédalage moyenne développée lors de l'épreuve ne modifient pas significativement la fréquence cardiaque moyenne, $\dot{V}O_2$, $[La^-]_s$, la difficulté d'effort perçue et la fréquence de pédalage au cours d'une épreuve maximale d'une heure (réalisée à $\sim 75\%$ de $\dot{V}O_{2\max}$). Lors d'un protocole imposant une plus grande variabilité de la puissance de pédalage, Palmer et al. (1999) ont toutefois démontré qu'une stratégie stochastique ($\sim 40\text{-}80\%$ $\dot{V}O_{2\max}$ de 140min) engendre une plus haute valeur de $[La^-]_s$ par rapport à une stratégie constante ($\sim 65\%$ de $\dot{V}O_{2\max}$), malgré l'absence de différence significative pour les valeurs de FC, $\dot{V}O_2$ et de difficulté d'effort perçue. De nouvelles études semblent nécessaires pour mieux caractériser et comprendre l'intérêt et les éventuels effets d'une stratégie d'allure variable sur la fatigue et la performance sportive.

3.6. LES STRATEGIES D'ALLURE EN TRIATHLON DISTANCE OLYMPIQUE

Peu de recherches ont étudié les stratégies d'allure adoptées par les triathlètes lors de compétitions « distance Olympique ». Pourtant, la pratique de cette discipline à haut niveau impose des spécificités physiologiques qui la distinguent nettement des disciplines qui la constituent mais aussi des courses amateurs et des épreuves longues distances. Lors de ces compétitions, les triathlètes sont en effet autorisés à s'abriter derrière un ou plusieurs concurrent(s) durant les trois disciplines. Cette stratégie permet d'économiser une grande quantité d'énergie par rapport à une condition de pratique isolée (Chatard et al. 1998; Hausswirth et al. 1999; Hausswirth et al. 2001). Pour cette raison, la plupart des triathlètes tentent en compétition de se positionner derrière d'autres concurrents légèrement plus performants qu'eux. Vleck et al. (2002) ont analysé les résultats des sections isolées de natation, de cyclisme et de course à pied ainsi que les performances réalisées par 50 triathlètes au cours des 38 épreuves de Coupe du Monde ayant rapporté des points pour la qualification aux premières épreuves Olympiques à Sydney en l'an 2000. Ces auteurs ont mis en évidence que les triathlètes mal positionnés à l'issue de la natation sont obligés d'adopter une vitesse significativement plus élevée que la tête de course lors de la phase initiale de la partie cycliste. Cependant, l'impact d'une telle stratégie sur la performance en course à pied et la performance globale n'avait alors pas été envisagé.

Dans cette perspective, Vleck et al. (2006) ont mesuré les vitesses de locomotion de l'ensemble des participants masculins au cours des trois disciplines de l'épreuve de Coupe du Monde de triathlon de Lausanne en 2002. Leurs résultats ont mis en évidence que les 400-500 premiers mètres de la natation étaient parcourus significativement plus vite que les autres sections de la natation et que la performance réalisée lors de cette phase était significativement corrélée à la performance globale. La recherche d'une optimisation du *drafting* (les moins bons nageurs cherchant à se positionner avec les

meilleurs nageurs) et la limitation des contacts à la première bouée a semblé expliquer ce résultat. Par ailleurs, ces auteurs ont mis en évidence que moins la position à l'issue de la natation est bonne (qui elle-même est fortement corrélée avec la position à la première bouée), plus la vitesse moyenne sur la section initiale de la partie cycliste est élevée et plus la performance pédestre et la position à l'arrivée sont médiocres. Il semblerait ainsi que la meilleure tactique consiste à adopter un départ rapide en natation pour pouvoir s'économiser lors de la partie cycliste (via notamment un départ peu agressif) en vue de la course à pied terminale, qui détermine pour grande part la position à l'arrivée. Ces résultats, dont la transférabilité devra être établie par d'autres études sur d'autres compétitions, suggèrent par ailleurs que la stratégie d'allure adoptée dans chacune des disciplines du triathlon est conditionnée par la performance dans les disciplines précédentes.

Vleck et al. (2006) ont de plus révélé que les triathlètes adoptent une stratégie d'allure en J inversé lors de la course à pied, caractérisée par un départ rapide sur le premier 1,5km, une progressive décélération jusqu'au 9km avant une nouvelle accélération sur le dernier kilomètre (Figure 9). Les bénéfices d'une telle stratégie apparaissent néanmoins discutables, étant donné que d'autres auteurs ont préalablement suggéré que la phase initiale de la course à pied d'un triathlon s'accompagne en contrepartie d'une augmentation transitoire du coût énergétique (Hausswirth et al. 1996; Hausswirth et al. 1997a) et nécessite un délai pour que soit assurée la redistribution des masses sanguines vers les régions du tronc et des membres supérieurs plus sollicités en course à pied qu'en cyclisme (Kreider et al. 1988c).

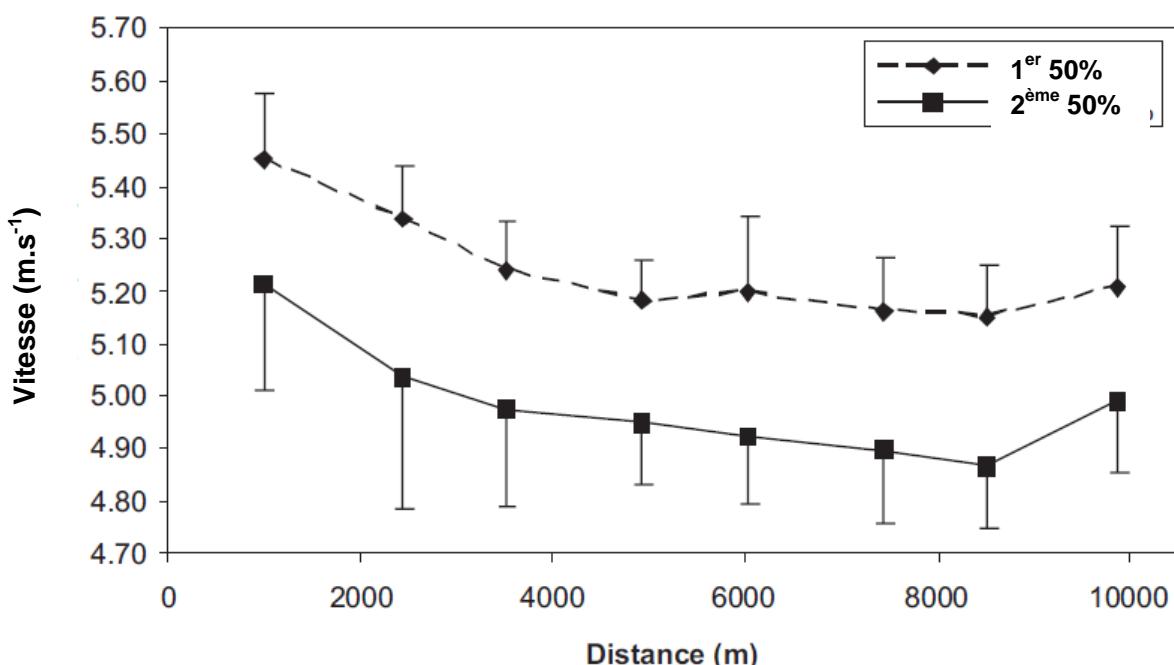


Figure 9. Evolutions de la vitesse de course moyenne des premiers et des derniers 50% des compétiteurs engagés lors de l'épreuve de Coupe du Monde de triathlon de Lausanne en 2002. La vitesse était significativement différente entre les deux groupes sur toutes les portions du parcours pédestre ($p < 0.01$). D'après Vleck et al. (2006).

Etant donné que les résultats présentés par Vleck et al. (2006) n'étaient fondés que sur l'analyse d'une seule compétition et que les conditions externes (vent, parcours, adversaires, scénarii de course, etc.) sont susceptibles de largement influencer les stratégies d'allure adoptées par les triathlètes « élite » en compétition, de nouvelles recherches sont toutefois requises pour mieux comprendre et optimiser les stratégies adoptées en triathlon distance Olympique à haut niveau.

Ce qu'il faut retenir

La littérature révèle que la performance réalisée lors des épreuves de locomotion cyclique peut être significativement influencée par la stratégie d'allure adoptée. Les études montrent qu'il existe plusieurs types de stratégies possibles, dont les bénéfices dépendent principalement des caractéristiques de l'épreuve concernée. Ces stratégies se différencient en fonction de l'intensité d'effort initiale consentie, des variations d'intensité au cœur de l'épreuve et de l'évolution de la vitesse à l'approche de la ligne d'arrivée. Cinq modèles de stratégies ont ainsi été décrits ; il s'agit des stratégies d'allure constante, croissante, décroissante, variable et parabolique. En triathlon à distance Olympique, il apparaît que les compétiteurs « élite » adoptent une stratégie d'allure systématiquement décroissante dans les trois disciplines. Si les bénéfices d'un départ rapide en natation et en cyclisme semblent liés aux gains associés au *drafting*, ceux-ci demeurent à clarifier pour la course à pied.

4. LES FACTEURS D'INFLUENCE DES STRATEGIES D'ALLURE

Si l'analyse des performances sportives à haut niveau révèle une grande hétérogénéité des stratégies d'allure adoptées en compétition, la sélection par l'athlète de celles-ci ne semble pour autant pas liée au hasard mais davantage déterminée par un ensemble de facteurs qui concernent les caractéristiques intrinsèques du sportif, l'activité pratiquée et l'environnement d'évolution. La compréhension et l'intégration de l'ensemble de ces paramètres semblent incontournables pour déterminer la stratégie d'allure optimale à adopter lors d'une épreuve sportive donnée.

4.1. LES CARACTERISTIQUES INTRINSEQUES DE L'ACTIVITE SPORTIVE PRATIQUEE

4.1.1. LA DUREE DE L'EPREUVE

Qu'elle soit analysée en conditions écologiques de pratique ou lors d'un protocole expérimental en laboratoire, la stratégie d'allure adoptée par un athlète apparaît fortement influencée par la durée de l'exercice. Durant les épreuves de courte durée (< 4min), on observe généralement l'adoption d'une stratégie d'allure décroissante, consistant en l'adoption d'un départ rapide puis en une baisse de la puissance développée (Abbiss et Laursen 2008). Par exemple, lors d'une épreuve cycliste contre-la-montre de 1500m réalisée sur piste (approximativement 2min), on constate que la puissance pic et que la vitesse pic sont atteintes lors des 300 premiers mètres de l'épreuve avant que leurs valeurs ne décroissent tout au long de la course, de sorte que la plus faible vitesse est atteinte lors du franchissement de la ligne d'arrivée (Hettinga et al. 2010).

L'analyse des épreuves de sprint (100m, 200m, 400m) lors des 7^{ème} Championnats du Monde d'athlétisme (Séville 1999) a révélé que tous les athlètes engagés avaient adopté une stratégie décroissante, caractérisée par l'atteinte précoce de leur vitesse maximale avant que leur allure ne diminue jusqu'à la ligne d'arrivée (Ferro et al. 2001). Tucker et al. (2006a) ont étudié les stratégies d'allure adoptées lors des records du monde sur des distances allant du 800m au 10 000m ([Figure 10](#)). Il a été observé que lors du 800m, la stratégie typique consistait à courir le premier 400m plus rapidement que le second. Ce constat a été opéré lors de 26 des 28 records du monde analysés par Tucker et al. (2006a) entre 1921 et 2004.

Lorsque la durée d'exercice est plus longue (> 4min), la stratégie d'allure adoptée apparaît plus constante. Toutefois, il apparaît fréquemment lors de ce type d'épreuves une augmentation significative de la puissance développée ou de la vitesse de déplacement à l'approche de la ligne d'arrivée (Marino 2004; St Clair Gibson et al. 2001a; Tucker et al. 2006a). Plus spécifiquement, ces épreuves débutent typiquement par une puissance initiale relativement plus haute que la puissance

moyenne développée lors de l'exercice. Ensuite, celle-ci diminue lors de la section médiane de l'épreuve, avant d'augmenter à nouveau à l'approche de la ligne d'arrivée (Albertus et al. 2005; Tucker et al. 2006a).

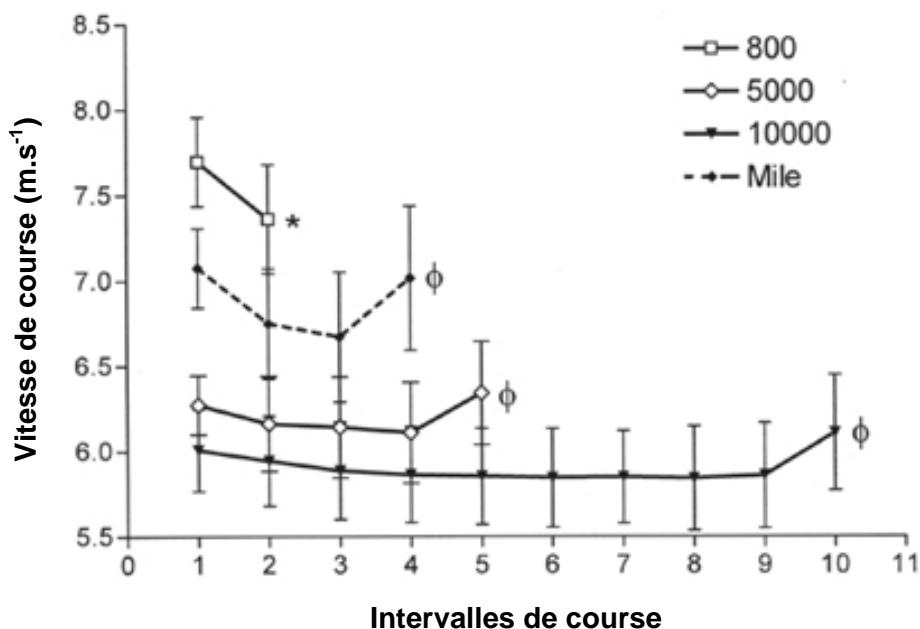


Figure 10. Vitesse de course moyenne sur chaque intervalle de course lors des records du monde du 800m, du 1500m, du mile et du 10 000m entre 1921 et 2004. *Significativement plus faible que lors du premier intervalle ($p < 0,005$). ϕ Significativement plus élevée que les intervalles précédents. *D'après Tucker et al. (2006a).*

Peu d'études ont en revanche examiné les stratégies d'allure lors d'épreuves d'ultra-endurance ($> 6h$). Lambert et al. (2004) ont mis en évidence que l'allure de course adoptée par des coureurs était relativement constante lors de la première moitié d'une épreuve sur 100km mais qu'elle déclinait progressivement ensuite. Aussi, les meilleurs coureurs étaient ceux qui révélaient la plus faible perte de vitesse sur la seconde section de la course.

4.1.2. L'INFLUENCE DES RESISTANCES A L'AVANCEMENT

Dans toutes les disciplines, l'air ou l'eau s'oppose au déplacement du corps avec une force proportionnelle (Ra exprimé en Newton N) au carré de la vitesse (di Prampero et al. 1979), comme l'exprime l'équation :

$$Ra = 0,5 * S * Cx * \rho * v^2$$

où S représente la surface de projection frontale en m^2 , Cx est le coefficient de forme, et ρ la masse volumique du fluide en $kg.m^{-3}$. L'énergie métabolique dépensée pour vaincre cette force est elle aussi

proportionnelle au carré de la vitesse. Par conséquent la puissance métabolique, représentant le produit de l'énergie métabolique par la vitesse de déplacement, varie avec le cube de la vitesse (di Prampero 1986).

Ainsi, dans les activités où la vitesse de locomotion est grande ($> 20\text{km.h}^{-1}$) ou dans lesquelles la densité du fluide dans lequel se déplace l'athlète est élevée, les variations de vitesse engendrent des résistances à l'avancement supérieures à celles associées à une stratégie constante. Ceci explique pourquoi les variations de vitesse lors d'activités comme la natation et le cyclisme ont un effet significativement plus délétère sur la performance qu'en course à pied, où l'énergie dépensée pour lutter contre les résistances à l'avancement ne représente qu'une faible proportion de l'énergie totale dépensée.

4.2. LES FACTEURS PHYSIOLOGIQUES

Les stratégies d'allure ont été définies par Tucker et Noakes (2009) comme « l'optimisation de l'utilisation des ressources énergétiques lors d'une épreuve sportive, de sorte à atteindre le plus haut niveau de performance possible sans engendrer de défaillances physiologiques graves et irréversibles ». Dans cette perspective, il apparaît nécessaire pour comprendre les stratégies d'allure adoptées par un athlète en situation de compétition, de cerner les interactions entre les variations d'allure et la réponse physiologique à l'exercice, eût égard au type d'épreuve réalisée et aux conditions environnementales de pratique.

4.2.1. LES PARAMETRES METABOLIQUES

4.2.1.1. L'INFLUENCE DE LA FRACTION EN OXYGENE INSPIRÉE SUR LA STRATEGIE D'ALLURE

Plusieurs études ont mis en évidence que le contenu en oxygène de l'air inspiré influence la stratégie d'allure (Brosnan et al. 2000; Peltonen et al. 1995) et l'évolution du recrutement neuromusculaire lors d'un exercice, dont l'intensité est librement choisie par le sujet. En 1997, Peltonen et al. ont étudié l'activité électromyographique (EMG) de 7 muscles actifs lors d'une épreuve d'aviron de 2500m réalisée sur ergomètre. Ces auteurs ont montré que l'inspiration d'un air appauvri en oxygène ($F_i\text{O}_2 = 15,8\%$) engendre une dégradation de la performance par rapport à une épreuve identique réalisée en normoxie. Leurs résultats ont révélé que la baisse de puissance développée était significativement plus grande dans la condition « hypoxie » par rapport à la condition « normoxie ». De plus, cette baisse de puissance était associée à une réduction du recrutement neuromusculaire, ce qui a suggéré que le niveau d'activation consenti par les sujets était influencé par la fraction en O_2 de l'air inspiré.

Kayser et al. (1994) ont par ailleurs montré que lorsque des cyclistes inspirent un air enrichi en oxygène alors qu'ils arrivent au point associé à l'atteinte d'un état d'épuisement en normoxie, ils sont capables de prolonger leur effort et de développer une plus grande puissance de pédalage. La poursuite de cet exercice est associée à une augmentation de l'activité EMG des muscles actifs (*vastus lateralis*), ce qui suggère que l'activation musculaire lors d'un exercice peut être influencée par la valeur de F_iO_2 .

De façon intéressante, Peltonen et al. (1997) n'avaient pas constaté de modification de l'activité EMG dans la condition « hyperoxyie » par rapport à la condition « normoxie », alors que la performance et la stratégie d'allure étaient différentes dans ces deux conditions. Ce résultat a été associé à « d'autres facteurs reliés à la disponibilité de l'oxygène » ou à une possible limitation du recrutement neuromusculaire, dans l'hypothèse où les sujets avaient atteint leur niveau d'activation maximal lors de la condition de pratique en normoxie. Toutefois, l'analyse des données expérimentales issues de cette étude indiquent que l'activité EMG n'était jamais supérieure à 75% de celle enregistrée lors d'un cycle de rame unique réalisée à puissance maximale (contre une résistance maximale). Ce résultat démontre que le niveau d'activation neuromusculaire était clairement sous-maximal pour l'ensemble des sujets au moment où ces derniers ont arrêté l'exercice. Il semble en fait plus probable que les méthodes de mesure et d'analyse EMG adoptées lors de cette étude n'étaient pas suffisamment sensibles pour détecter la variabilité de l'activité EMG dans les deux conditions mesurées.

Plus récemment, Tucker et al. (2007) ont montré que la performance lors d'une épreuve cycliste contre-la-montre de 20km est améliorée lorsque la valeur de F_iO_2 est augmentée artificiellement à 40% par rapport à une condition réalisée en normoxie (20,9%). Ce résultat était relié à une modification de la stratégie d'allure, de sorte que la puissance de pédalage adoptée initialement était davantage maintenue constante dans la condition « hyperoxyie » que dans la condition « normoxie ». Parallèlement, un plus haut niveau de recrutement neuromusculaire était observé en condition d'hyperoxyie par rapport à la situation contrôle, suggérant qu'une plus grande disponibilité de l' O_2 permet le maintien d'un recrutement neuromusculaire plus élevé lors d'une épreuve de longue durée.

La conception selon laquelle les niveaux d'activation neuromusculaire et l'intensité d'exercice seraient régulés différemment en fonction de F_iO_2 ne rompt cependant pas avec la perspective, selon laquelle la modification des concentrations cellulaires et plasmatiques en métabolites résulterait en des « signes électromyographiques de la fatigue », caractérisés par une augmentation de l'activité EMG sans modification du niveau de force produite (Kayser 2003; Kayser et al. 1994; Taylor et al. 1997). Par exemple, Taylor et al. (1997) ont montré que l'activité EMG est

significativement plus grande en conditions hypoxiques ($F_iO_2 = 11,6\%$) qu'en normoxie pour une puissance de pédalage donnée. De plus, les résultats de cette étude ont révélé que le ratio force/activité EMG diminue progressivement en hypoxie. Ce constat suggère qu'une augmentation du recrutement neuromusculaire permet de maintenir la puissance de pédalage imposée malgré la réduction progressive de la capacité de production de force musculaire. Toutefois, étant donné les augmentations de la puissance de pédalage et l'activité EMG constatées en fin d'épreuve indépendamment de la valeur de F_iO_2 , il n'est pas possible de considérer que la baisse de puissance observée en milieu d'épreuve lors de cette étude était uniquement reliée à une dégradation de la contractilité musculaire. Ces résultats suggèrent fortement que cette baisse était au moins pour part reliée à un processus de régulation opéré au niveau central.

De façon générale, ces études supportent l'hypothèse selon laquelle le recrutement neuromusculaire (et donc la stratégie d'allure) est régulé durant l'exercice en fonction du contenu en oxygène de l'air inspiré (Kayser et al. 1994; Peltonen et al. 1997).

4.2.1.2. L'INFLUENCE DE LA DISPONIBILITE GLYCOGENIQUE SUR LA STRATEGIE D'ALLURE

La disponibilité des substrats énergétiques est souvent identifiée comme un facteur limitant de la performance sportive. L'épuisement durant un exercice de longue durée est souvent expliqué dans la littérature par la déplétion du stock glycogénique hépatique (Bergstrom et al. 1967; Havemann et al. 2006; Rauch et al. 2005). Dans cette perspective, si la stratégie d'allure est effectivement régulée de sorte à prévenir la survenue de défaillances physiologiques graves, alors la stratégie d'allure adoptée lors d'une épreuve maximale, où celle-ci est laissée libre, est susceptible d'être influencée par des stratégies nutritionnelles conduisant à une modification du stock glycogénique (aux niveaux musculaire et hépatique).

Dans cette perspective, Havemann et al. (2006) ont montré que la performance lors de sprints répétés au cours d'une épreuve cycliste maximale contre-la-montre de 100km est dégradée après un régime hyperlipidique de 7jours (3560 cal dont 68% des apports quotidiens d'origine lipidique pendant 6jours puis un jour à 90% d'origine glucidique), par rapport à un régime hyperglucidique (3550 cal dont 68% des apports quotidiens d'origine glucidique pendant 6jours puis un jour à 90%) respecté sur une durée similaire. L'écart de performance moyen de 3min44s rapporté entre ces deux conditions expérimentales n'était cependant pas significatif. Les auteurs de cette étude ont suggéré que la dégradation du niveau de performance lors des sprints répétés était expliquée par une plus grande activité sympathique et donc à une plus grande difficulté d'effort perçue associée à la réalisation de l'exercice réalisé après un régime hyperlipidique (Havemann et al. 2006; Stepto et al. 2002). De façon intéressante, la difficulté d'effort perçue n'était toutefois pas différente entre les

deux conditions. Ainsi, si un régime hyperlipidique influence effectivement l'activité sympathique et la difficulté d'effort perçue, il est probable que l'intensité d'exercice sélectionnée ait été régulée de sorte à maintenir la difficulté d'effort perçue à un niveau prédéterminé.

D'autres études fondées sur des protocoles similaires n'ont pas rapporté d'effet significatif sur la performance réalisée lors d'une épreuve contre-la-montre (Burke et al. 2002; Carey et al. 2001). Cette absence de résultats significatifs est souvent reliée à une grande variabilité interindividuelle de la réponse aux différents régimes alimentaires, qui diminue la puissance statistique. Par exemple, dans l'étude de Havemann et al. (2006), 5 des huit sujets avaient amélioré leur performance après avoir respecté un régime hyperglucidique. En revanche, dans les études de Carey et al. (2001) et Burke et al. (2002), la plupart des sujets amélioraient leur performance lors d'épreuves de longue durée après un régime hyperlipidique, possiblement grâce à l'économie de leur stock glycogénique et à une plus grande activité de la lipolyse à l'exercice. De ces études, il ressort finalement que la modification du régime alimentaire influence significativement la stratégie d'allure lors d'une épreuve de longue durée en modifiant le stock glycogénique pré-exercice et l'utilisation des substrats énergétiques.

Rauch et al. (2005) ont montré que la performance lors d'une épreuve contre-la-montre d'une heure est significativement améliorée grâce à un régime hyperglucidique (non détaillé) par rapport à un régime habituel (non détaillé) n'impliquant pas de surcharge glucidique. De façon intéressante, la puissance de pédalage adoptée après le régime hyperglucidique était significativement plus élevée que lors de la situation-contrôle à tout moment du test, dès la première minute de l'épreuve. La stratégie d'allure n'était ainsi pas modifiée seulement une fois que le stock de glycogène était déplété, mais par anticipation, avant même l'atteinte de cet état. Rauch et al. ont de plus mis en exergue que les sujets terminaient l'épreuve avec des stocks glycogéniques identiques, indépendamment du régime nutritionnel suivi au préalable. Ainsi, il apparaît que les participants de cette étude avaient régulé leur stratégie d'allure de sorte à n'atteindre un stock glycogénique critique qu'à la fin de l'épreuve. D'après Rauch et al. (2005), la manière dont un sujet gère l'évolution du travail lors d'un exercice de longue durée dépend de feedbacks afférents qui renseignent son système nerveux central sur l'évolution du stock glycogénique, et lui permettent de prévenir une déplétion précoce de celui-ci.

En conclusion, de grandes différences interindividuelles sont constatées concernant l'influence du stock de glycogène sur la stratégie d'allure adoptée par un athlète lors d'un exercice de longue durée. L'ensemble de ces résultats suggère néanmoins que l'intensité consentie par un athlète lors d'une épreuve est régulée en fonction de l'évolution du stock de glycogène disponible, de sorte à ce

que l'exercice puisse être mené à son terme sans qu'un épuisement total des réserves glycogéniques endogènes ne soit atteint.

4.2.1.3. L'INFLUENCE DE L'ACCUMULATION DES METABOLITES D'ORIGINE ANAEROBIE SUR LA STRATEGIE D'ALLURE

Contrairement à l'accélération finale fréquemment rapportée durant les épreuves de longue durée, plusieurs études ont montré que ce type de stratégie n'est pas intéressant lors des épreuves de courte durée (< 2min) en kayak (Bishop et al. 2002), en cyclisme (Foster et al. 1993), en natation (Thompson et al. 2003) et en course à pied (Tucker et al. 2006a). On constate en effet une diminution significative et irréversible de l'intensité développée tout au long de l'épreuve lors de la pratique de ces activités au plus haut niveau. Classiquement, ce constat est expliqué par la réduction progressive de la capacité de production de force due à l'accumulation des métabolites issues des processus de resynthèse anaérobies (Nummela et al. 1992; Taylor et al. 1997).

Nummela et al. (1992) ont par exemple observé que la performance lors d'un saut en contre-mouvement est diminuée de 39% après une épreuve maximale de course sur 400m, et que cette réduction est inversement corrélée à la valeur de $[La^-]_s$ atteinte à la fin de la course. L'analyse EMG réalisée lors de cette étude a de plus révélé que le recrutement neuromusculaire des muscles actifs des membres inférieurs avait significativement augmenté lors de la course. Ceci suggère que des unités motrices supplémentaires ont été progressivement recrutées, afin de compenser la baisse de contractilité musculaire engendrée par l'accumulation des métabolites. Cette hypothèse a conforté la perspective selon laquelle la diminution de puissance constatée lors d'une course maximale de courte durée est la conséquence d'une baisse de la contractilité musculaire.

De façon similaire, Kayser et al. (1994) ont rapporté que l'activité EMG augmente progressivement lors d'une épreuve cycliste réalisée à puissance constante. Ces auteurs ont interprété ce résultat comme un « signe myographique de la fatigue musculaire », étant donné que la masse musculaire sollicitée et l'intensité d'exercice étaient suffisamment grandes pour engendrer une fatigue d'origine métabolique. D'autres auteurs (Taylor et al. 1997) ont en effet ensuite montré que lors d'un exercice cycliste maximal de courte durée réalisé en normoxie, le ratio force/activité EMG diminue progressivement, suggérant ainsi qu'un recrutement additionnel d'unités motrices est nécessaire pour maintenir la puissance de pédalage lors de ce type de test, tandis que la contractilité musculaire est peu à peu réduite.

4.2.2. LES PARAMETRES THERMOREGULATEURS

La température ambiante est depuis longtemps considérée comme un facteur déterminant de la performance dans les activités de longue durée. Il est reconnu que dans une ambiance chaude

(30-40°C), la performance en cyclisme et en course à pied est susceptible d'être largement dégradée par rapport à des conditions plus fraîches (3-20°C) (Drust et al. 2005; Fink et al. 1975; Nielsen et al. 1990; Nybo et Nielsen 2001b; Savard et al. 1988).

Anciennement, il était considéré que la dégradation du niveau de performance dans une ambiance chaude est causée par une réduction du flux sanguin musculaire, engendrée par la réduction du débit cardiaque (Rowell et al. 1966) et par une plus grande distribution des masses sanguines vers la peau pour assurer les mécanismes de thermorégulation (Fortney et Vroman 1985).

Toutefois, d'autres études ont depuis montré que l'arrêt de l'exercice en ambiance chaude n'est ni provoqué par la baisse du débit cardiaque ou du flux sanguin musculaire, ni par une déplétion plus rapide du stock de glycogène, ni par l'accumulation d'ions lactate ou potassium (Drust et al. 2005; Gonzalez-Alonso et al. 1999; Nielsen et al. 1993; Nielsen et al. 1990; Savard et al. 1988). Plusieurs études ont révélé que la fatigue survient en fait lorsque la température corporelle est d'environ 40°C (Galloway et Maughan 1997; Nielsen et al. 1993; Nielsen et al. 1990; Nybo et Nielsen 2001a), indépendamment du niveau d'acclimatation (Nielsen et al. 1993; Nielsen et al. 1997), de la température corporelle pré-exercice (Gonzalez-Alonso et al. 1999) et de la cinétique de la température corporelle lors de l'exercice (Gonzalez-Alonso et al. 1999). Chez des sujets peu entraînés, cette « limite » semble plutôt se situer aux alentours de 38,7°C, indépendamment du niveau d'hydratation ou d'acclimatation (Cheung et McLellan 1998).

Les symptômes communément associés à l'épuisement volontaire associé à l'exercice en ambiance chaude incluent la confusion mentale, la perte de coordination et la syncope (Cheung et McLellan 1998), ce qui suggère une implication du système nerveux central au sein de ce type de fatigue. Dans cette perspective, il a été suggéré que la fatigue engendrée par l'exercice en ambiance chaude est potentiellement associée à « une température corporelle critique qui limite la capacité de performance » (Bruck et Olschewski 1987; Fuller et al. 1998; Gonzalez-Alonso et al. 1999) en perturbant les fonctions du système nerveux central et notamment la capacité du sujet à maintenir un niveau de recrutement musculaire suffisant pour rendre possible la poursuite de l'exercice (Nybo et Nielsen 2001a, b).

En 2001, Nybo et Nielsen ont montré que la production de force et le ratio d'activation maximale volontaire vers les groupes musculaires actifs (extenseurs du genou) sont diminués lors d'une contraction isométrique maximale volontaire consécutive à un exercice de pédales réalisé dans une ambiance chaude (*i.e.* 40°C, provoquant l'atteinte d'une température corporelle de 40°C chez les participants) par rapport à une condition contrôle consistant à réaliser le même exercice dans une ambiance tempérée (*i.e.* 18°C, engendrant une température corporelle finale de 38°C). En revanche, aucune différence significative de force maximale n'était observée entre les deux situations, dès lors

d'une stimulation électrique était surimposée à la contraction maximale volontaire. Ce résultat a suggéré que la capacité de production de force des muscles actifs n'est pas affectée par l'augmentation de la température corporelle engendrée par l'exercice. Il a été alors conclu que l'hyperthermie induite par l'exercice engendre un phénomène de fatigue centrale, de sorte que l'atteinte d'une haute température corporelle (40°C) engendre une baisse du recrutement neuromusculaire par le cortex moteur, qui résulte en une réduction de la capacité de production de force.

D'autres recherches (Nielsen et al. 2001a; Nybo et Nielsen 2001b; Rasmussen et al. 2004) ont montré qu'il existe un effet potentiel de l'hyperthermie sur le niveau de vigilance en comparant les signaux électroencéphalographiques mesurés pendant l'exercice en ambiance chaude (40°C) ou tempérée (19°C). Les participants de cette étude devaient pédaler à une puissance imposée jusqu'à l'épuisement volontaire, tandis que le ratio entre les ondes α et β (indicateur de l'état de vigilance des sujets) était mesuré tout au long de l'exercice. Les résultats ont révélé une augmentation de ce paramètre tout au long de l'épreuve, suggérant que le niveau de vigilance des sujets diminuait au cours de l'épreuve. De façon intéressante, il a été observé que l'augmentation du ratio α/β était fortement corrélée à celles de la température corporelle et de la difficulté d'effort perçue (Nybo et Nielsen 2001b; Rasmussen et al. 2004). La force et la robustesse de cette corrélation ($r^2 = 0,98$, $p < 0,001$) suggère que le niveau de vigilance des sujets a progressivement diminué lors de l'exercice, et non qu'il a brutalement été diminué quand la température corporelle a atteint 40°C . Ainsi, une légère augmentation de la température corporelle à $38,5^{\circ}\text{C}$ engendrée par un exercice en ambiance tempérée suffit à réduire le niveau de vigilance par rapport à une température corporelle normale de repos à $37,5^{\circ}\text{C}$.

Etant donné que cette étude était fondée sur une allure imposée, celle-ci n'a cependant pas permis de mettre en évidence la manière dont un athlète gère son allure en fonction de l'augmentation de sa température corporelle. En effet, ces résultats montrent que la performance d'un athlète dans une ambiance chaude est déterminée par le moment où celui-ci atteint une température critique de 40°C . Toutefois, il convient de noter que la difficulté d'effort perçue était fortement corrélée à la fois à la température corporelle ($r = 0,98$, $p < 0,001$) et au ratio α/β ($r = 0,98$, $p < 0,001$). En d'autres termes, les augmentations de la température corporelle et du ratio α/β étaient les meilleurs prédicteurs de l'augmentation de la difficulté d'effort perçue, c'est-à-dire que l'augmentation de ces paramètres était associée avec une difficulté de plus en plus grande à maintenir une intensité d'exercice imposée (Rasmussen et al. 2004). Ainsi, puisqu'une augmentation de la difficulté d'effort perçue suggère que l'intensité d'exercice était de plus en plus difficile à maintenir, il est probable que les participants auraient progressivement réduit leur puissance de pédalage lors de l'épreuve, si l'intensité d'exercice avait été librement gérée lors de ce protocole.

Une autre perspective émerge lorsque l'athlète a la possibilité de modifier l'intensité d'exercice (*self-paced exercise*). Des études ont en effet révélé que la puissance de pédalage (Kay et al. 2001; Tatterson et al. 2000) et la vitesse de course (Marino et al. 2004; Marino et al. 2000) sont réduites plus précocement après le début de l'exercice lorsque celui-ci est réalisé dans une ambiance chaude par rapport à une ambiance neutre. Par ailleurs, il apparaît que ces variations d'intensité surviennent avant qu'un état physiologique critique ne soit effectivement atteint (Nielsen et al. 1997; Nybo et Nielsen 2001a). Par exemple, Tucker et al. (2004) ont mis en évidence que la puissance de pédalage et l'activation neuromusculaire était réduite durant les 6 premiers kilomètres d'une épreuve cycliste contre-la-montre de 20km réalisée dans une ambiance chaude (35°C) par rapport à une condition thermique neutre (15°C). La température rectale, la fréquence cardiaque et la difficulté d'effort perçue n'ont toutefois pas révélé de différence significative tout au long des deux conditions testées. En raison de la plus grande baisse de puissance de pédalage observée dans la condition expérimentale « ambiance chaude », la température corporelle est restée similaire à celle de la condition contrôle jusqu'à la fin de l'épreuve. De façon intéressante, les sujets ont démontré une augmentation significative de leur puissance de pédalage et de l'activité électromyographique du muscle *vastus lateralis* lors du dernier kilomètre, indépendamment de la condition d'exercice. Par rapport au début de l'épreuve, les cyclistes ont ainsi été capables d'accélérer à l'approche de la fin de l'épreuve, malgré l'augmentation de leur température corporelle jusqu'à 39,2°C au 19^{ème} km. Il apparaît donc que lors d'un exercice réalisé en ambiance chaude, le recrutement neuromusculaire (et le travail associé) est régulé de manière anticipée, de sorte à prévenir une accumulation excessive de chaleur (Tucker et al. 2004).

Morrison et al. (2004) ont mesuré le niveau d'activation maximal volontaire lors d'un exercice réalisé en ambiance chaude durant lequel la gestion de l'intensité était laissée libre. Ces auteurs ont étudié l'effet des températures corporelle et cutanée sur la force isométrique maximale volontaire lors d'une extension maximale du genou chez des sujets dont la température corporelle était passivement augmentée de 37,5°C à 39,5°C puis abaissé de nouveau à 37,5°C. Une contraction maximale volontaire de 10s était réalisée à chaque augmentation de 0,5°C de la température corporelle. Deux stimulations électriques étaient par ailleurs surajoutées afin de déterminer le niveau d'activation maximal volontaire atteint par les sujets lors de chaque contraction. Les résultats ont révélé qu'une décroissance progressive et graduelle était observable alors que la température corporelle augmentait et que ce phénomène était inversé, lorsque la température corporelle retrouvait sa valeur initiale. Il apparaît ainsi que le cerveau active progressivement moins d'unités motrices quand la température interne augmente et non que la baisse du niveau d'activation maximale volontaire survient ponctuellement, une fois qu'une température critique a été atteinte à l'exercice (Morrison et al. 2004).

Ces résultats infirment l'hypothèse selon laquelle une réduction du recrutement neuromusculaire interviendrait lorsqu'une température corporelle critique est atteinte (Marino et al. 2004; Morrison et al. 2004; Tucker et al. 2004). A l'inverse, ils suggèrent que ce recrutement est régulé par anticipation lors d'un exercice prolongé réalisé en ambiance chaude, tandis que la température corporelle croît et que la commande centrale diminue progressivement.

Todd et al. (2005) ont attribué la fatigue induite par l'hyperthermie à une combinaison de facteurs qui concernent autant le système musculaire que le cortex moteur. Ces auteurs ont montré qu'il existe une réduction du niveau de force survenant lors d'une augmentation passive de la température corporelle alors que des unités motrices additionnelles pourraient être recrutées et permettre une augmentation du niveau de force développé. Ainsi, la fatigue surviendrait au cours d'un exercice réalisé en ambiance chaude, sans que le cortex moteur n'ait atteint son niveau de recrutement maximal et que toutes les unités motrices ne soient activées (Morrison et al. 2004; Nybo et Nielsen 2001a), ce qui suggère que le cerveau joue un rôle de régulation dans ce type de conditions.

Tucker et al. (2006b) ont constaté que lorsque la difficulté d'effort perçue est fixée à une valeur constante lors de l'exercice, la sélection de l'intensité diffère en fonction de l'ambiance thermique dans laquelle se déroule l'épreuve. Lors de ce type de protocole, la puissance développée baisse plus rapidement en ambiance chaude qu'en ambiance neutre, ce qui se traduit par une accumulation de chaleur similaire du noyau central dans les deux conditions. Ces auteurs ont suggéré que l'intensité d'exercice (et donc la stratégie d'allure) est régulée en fonction des feedbacks afférents qui renseignent le système nerveux central sur la cinétique de la température corporelle lors de l'exercice, de sorte celle-ci est continuellement régulée en fonction de la difficulté d'effort perçue et qu'un niveau critique ne soit pas atteint avant la fin de l'épreuve.

Duffield et al. (2010) ont récemment étudié l'effet d'une stratégie de *pre-cooling* (*i.e.* immersion des membres inférieurs dans une eau froide) sur la performance lors d'une épreuve cycliste contre-la-montre de 40min réalisée en ambiance chaude et humide. De façon intéressante, tandis que les températures cutanée et corporelle étaient significativement plus basses dans la situation *pre-cooling* par rapport à la situation contrôle durant la première moitié de l'épreuve, aucune différence de puissance développée ou de stratégie d'allure n'était constatée ([Figure 11](#)). La puissance développée lors des 10 dernières minutes était en revanche progressivement augmentée dans la situation *pre-cooling* tandis qu'une tendance à la baisse était rapportée pour la situation contrôle ([Figure 11](#)). Etant donné qu'aucune différence n'était rapportée avant et après ces deux conditions aussi bien pour la force maximale volontaire (extension du genou) que pour la force produite par neurostimulation, Duffield et al. (2010) ont conclu que l'amélioration de la performance

dans la condition *pre-cooling* n'était pas reliée à un meilleur maintien des capacités contractiles. Si les mécanismes explicatifs sous-jacents restent à élucider, il apparaît ainsi que l'amélioration de la performance en ambiance chaude par technique de *pre-cooling* des membres inférieurs est principalement reliée à la capacité du système nerveux central à assurer un plus grand recrutement musculaire à la fin de l'épreuve par rapport à une situation contrôle.

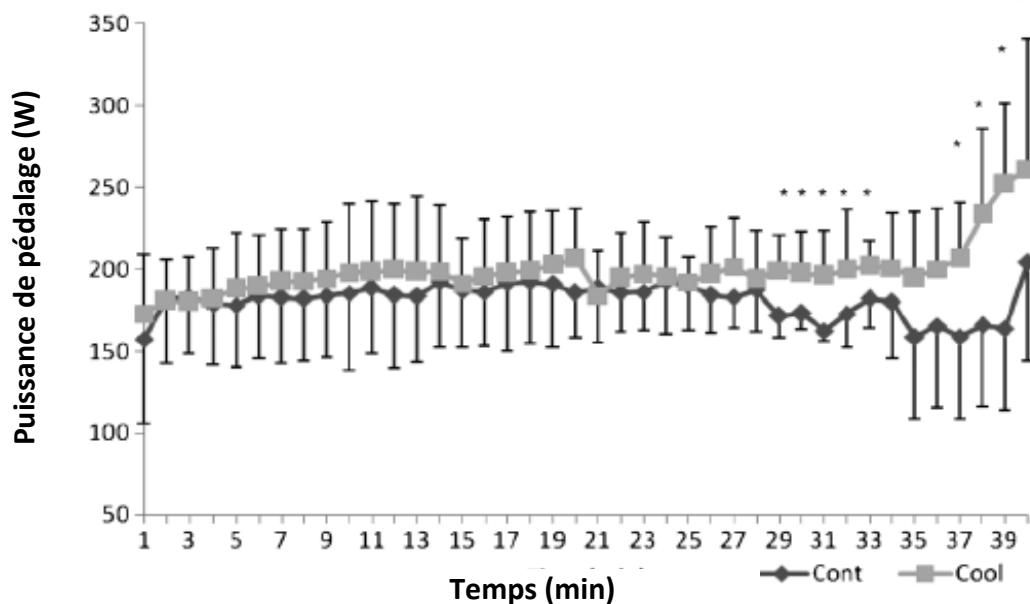


Figure 11. Evolution de la puissance de pédalage dans les conditions contrôle (Cont) et *pre-cooling* (Cool) lors d'une épreuve maximale de 40min réalisée sur ergocycle en conditions chaudes et humides. *Différence significative entre les deux conditions ($p < 0,05$). D'après Duffield et al. (2010).

Certains résultats expérimentaux suggèrent toutefois que la température rectale, qui est souvent utilisée pour mesurer la température corporelle dans les études précédentes (Duffield et al. 2010; Marino et al. 2004; Tucker et al. 2006b; Tucker et al. 2004), démontrerait un décalage par rapport aux variations de température interne étant donné que la perfusion du rectum est moindre que celle du noyau central à l'exercice (Gagnon et al. 2010). Si tel est le cas, il est envisageable qu'il faille recourir à l'avenir à l'utilisation d'autres systèmes de mesure de la température corporelle pour confirmer et expliquer l'influence de ce paramètre physiologique sur le choix de la stratégie d'allure en ambiance chaude.

4.2.3. LES PARAMETRES MUSCULAIRES

Plusieurs études (Armstrong et al. 1983; Schwane et Armstrong 1983) ont montré que la course à pied sur le plat repose approximativement sur le même nombre d'actions concentriques

qu'excentriques. En revanche, lorsque la course a lieu sur une portion descendante, on constate une augmentation de la composante excentrique du mouvement (Lindstedt et al. 2001). Un plus faible nombre de fibres est recruté lors des actions excentriques, quand bien même le poids supporté est le même que lors des contractions concentriques (Smith 1991), ce qui engendre une augmentation des microlésions musculaires engendrées par la course en descente par rapport à la course sur le plat (Mizrahi et al. 2000).

Baron et al. (2009) ont comparé les stratégies d'allure adoptées en course à pied par des sujets réalisant des séries de 10 sprints sur 60m sur le plat, en descente (-4,7%) et en montée (+4,7%). Leurs résultats ont révélé une plus faible vitesse en descente que sur le plat ainsi qu'une plus grande diminution de la vitesse lors des 10 sprints dans la condition « descente » par rapport aux conditions « plat » et « montée » (Figure 12).

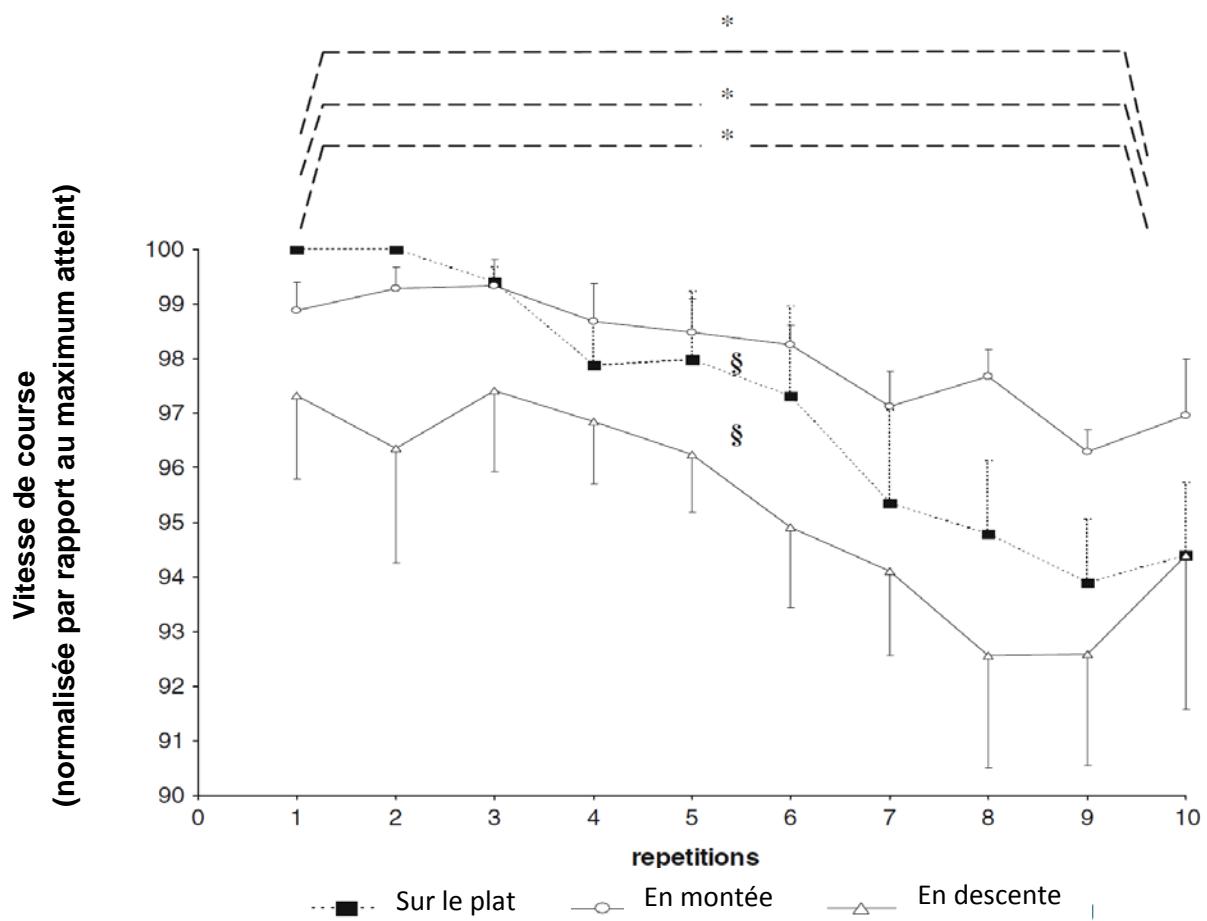


Figure 12. Evolutions de la vitesse de course moyenne lors de 10 sprints de 60m réalisés sur le plat, en montée et en descente. *Différence significative entre la dernière et la 1^{ère} répétition ($p < 0,05$). §Différence significative entre les 10 répétitions d'une même série. *D'après Baron et al. (2009).*

Ce résultat suggère que la quantité de travail excentrique influence la stratégie d'allure (Baron et al. 2009). Pour Baron et al., la plus grande réduction de la vitesse constatée lors des sprints réalisés en descente suggère que la vitesse de course est régulée en fonction des feedbacks émis par les

mécanorécepteurs de sorte à prévenir des dommages musculaires trop importants. De manière intéressante, cette hypothèse a récemment été avancée par d'autres auteurs pour expliquer la réduction de la vitesse de course lors d'épreuves de course d'ultra-endurance, durant lesquelles les dommages musculaires engendrés peuvent être importants (Martin et al. 2010; Morin et al. 2010). Envisagés collectivement, ces résultats suggèrent que la stratégie d'allure en course à pied lors d'un triathlon distance Olympique est potentiellement influencée par les changements de pente du parcours pédestre susceptibles d'accroître le travail excentrique imposé aux groupes musculaires des membres inférieurs. De prochaines études devront confirmer cette hypothèse.

Ce qu'il faut retenir

Lors d'une épreuve de longue durée, les facteurs de la performance sont multiples et sont intimement reliés aux conditions environnementales de pratique (e.g. chaleur, dénivelé, altitude). De nombreuses recherches ont investigué la manière dont ces variables influencent la régulation de l'intensité au cours d'épreuves maximales. Leurs résultats suggèrent que si des perturbations de l'état d'homéostasie sont possibles (augmentation de la température centrale, microlésions musculaires, diminution de la saturation artérielle en oxygène, baisse des réserves glycogéniques, etc.), l'intensité d'exercice est toujours régulée de sorte à ce que l'épreuve puisse être menée à son terme, sans que ces modifications n'atteignent un seuil critique au-delà duquel des défaillances physiologiques sévères et irréversibles pourraient survenir.

4.3. LES FACTEURS NEUROPHYSIOLOGIQUES ET PERCEPTUELS

Les résultats des études menées dans le domaine de la physiologie sur la compréhension des stratégies d'allure suggèrent que l'intensité d'exercice est toujours régulée de sorte à ce que l'épreuve puisse être menée à son terme, sans qu'aucun système physiologique ne soit conduit effectivement à une défaillance sévère et irréversible (Tucker et Noakes 2009). Dans cette perspective, la régulation de l'intensité d'effort consentie serait fortement reliée aux variations de la difficulté d'effort perçue durant l'exercice. Ainsi, lorsqu'un athlète produit un travail important, il doit en retour accepter la difficulté d'effort associée à la stratégie qu'il adopte, jusqu'au franchissement de la ligne d'arrivée. L'acceptation mentale de la difficulté d'effort perçue associée à l'intensité d'exercice doit être continuellement gérée en fonction de la distance restant à parcourir et de ce qu'est capable de consentir l'athlète sur le plan psycho-perceptuel (Tucker 2009). L'objectif de ce chapitre est de présenter les bases psychophysiologiques, neurophysiologiques et perceptuelles

qui permettent de comprendre la manière dont l'intensité d'exercice est régulée par l'athlète lors de l'exercice.

4.3.1. L'ETAT AFFECTIF ET LE NIVEAU DE MOTIVATION

4.3.1.1. L'INFLUENCE DES AFFERENCES PHYSIOLOGIQUES ET DES EMOTIONS SUR L'ACTIVATION DU SYSTEME NERVEUX CENTRAL

Durant l'exercice, le système nerveux central est activé pour réguler les réflexes physiologiques de sorte à ce que ces derniers répondent à la demande énergétique imposée (St Clair Gibson et al. 2006). Pour plusieurs de ces mécanismes homéostatiques, la principale voie physiologique trouve origine au niveau des afférences viscérales qui entrent dans le système nerveux central par le noyau du tractus solitaire (Bailey et al. 2006). Cette information afférente est projetée vers différents sites incluant le tronc cérébral, la moelle épinière et l'hypothalamus (Guyenet 2006; Pilowsky et Goodchild 2002). Ceci engendre de multiples réflexes depuis le noyau paraventriculaire de l'hypothalamus qui intègre les réponses à l'exercice de natures neuroendocrine, cardiovasculaire, métabolique et homéostatique (Brown et al. 2007; Chen et Toney 2003; Dampney et al. 2005; Herman et al. 2003; Pilowsky et Goodchild 2002).

A l'exercice, l'activité sympathique augmente tandis que le tonus parasympathique diminue, de sorte à répondre à la demande énergétique imposée par l'exercice en intégrant les afférences en provenance tant de l'organisme que du cerveau (Aubert et al. 2003). Ainsi, l'hypothalamus module la réponse physiologique de l'organisme en réponse aux stress de nature physique, environnementale, mentale ou autres que subit l'athlète (Arai et al. 1989; Nakamura et al. 1993). Ces données physiologiques suggèrent un rôle crucial du système nerveux central à l'exercice, étant donné que celui-ci assure l'adaptation de la réponse physiologique à la demande énergétique imposée par l'exercice. La manière dont le cerveau contrôle l'intensité d'exercice consentie, notamment à travers la production des symptômes de la fatigue, reste toutefois encore à élucider.

Les mécanismes par lesquels les feedbacks sensitifs en provenance du système périphérique interagissent avec les fonctions mentales supérieures ont été largement investigués. Récemment, Gray et al. (2007) ont suggéré que le traitement des informations viscérales est étroitement relié aux aspects émotionnels et motivationnels du comportement. Damasio et al. (2000) ont spécifié les réseaux à la base des émotions, du sentiment de soi et de la conscience des sentiments et mis en valeur que le corps est la principale source des émotions, soit directement, soit par les représentations qu'en font les aires somato-sensorielles du cerveau. De plus, Pollatos et al. (2005)

ont montré qu'il existe une forte relation entre le traitement cortical des stimuli émotionnels et la perception que l'individu a de son propre état physiologique.

Malheureusement, les mécanismes qui déterminent la perception de l'effort au cours d'un exercice demeurent encore largement incompris. Il est néanmoins accepté qu'il existe un système d'interprétation des feedbacks afférents qui identifie l'intensité d'exercice à un niveau subconscient et que son interprétation définit la perception de l'effort (Hampson et al. 2004). En effet, la difficulté d'effort perçue est reconnue pour être reliée à la masse musculaire active (Pandolf 1982), aux contraintes musculaires (Stamford et Noble 1974; Takai 1998), à FC (Skinner et al. 1973), à $\dot{V}O_2$, à FR et \dot{V}_E (Noble et al. 1973). Cette variable n'est toutefois pas déterminée par un seul et unique paramètre physiologique à l'exercice mais par l'ensemble des afférences physiologiques intégrées par le système nerveux central, faisant de ce paramètre un système intégratif complexe (Hampson et al. 2004).

4.3.1.2. LE ROLE DES REPONSES AFFECTIVES ET DE LA MOTIVATION SUR LE CHOIX DES STRATEGIES D'ALLURE

D'après Noakes et al. (2004b), lorsqu'un exercice est mené à l'épuisement volontaire, l'augmentation de la difficulté perçue et l'inconfort ressenti diminuent progressivement le désir conscient du sujet de poursuivre l'exercice, de sorte que l'intégrité physique de ce dernier n'est jamais effectivement mise en danger. L'évolution des affects négatifs ressentis lors de l'exercice semble dans cette perspective être un facteur à prendre en compte pour mieux comprendre les stratégies d'allure.

Certaines études considèrent le possible rôle de la valence émotionnelle (plaisir – déplaisir). Ainsi, si une valence négative existe, il est aussi envisageable qu'une valence positive existe elle aussi (Baron et al. 2010). Ceci est supporté par de nombreuses études qui ont mis en évidence que la réponse affective à l'exercice est dépendante de l'intensité de celui-ci (Lind et al. 2009). La valence affective demeure ainsi positive lorsque l'intensité est faible à modérée, tandis que l'exercice intense ou maximal est davantage associé à une réponse affective négative (déplaisante) (Lind et al. 2009). Ainsi, lorsque l'intensité augmente, la difficulté d'effort perçue croît progressivement tandis que la réponse affective positive diminue. De la même manière, la difficulté d'effort perçue augmente progressivement lors d'un exercice à intensité constante menée jusqu'à épuisement (Crewe et al. 2008).

Dans cette perspective, il semble nécessaire de prendre en compte autant les réponses affectives positives que les réponses négatives, lorsque l'on cherche à comprendre l'influence de l'état psycho-affectif sur le choix de la stratégie d'allure. Baron et al. (2010) proposent ainsi de mesurer la charge

émotionnelle lors de l'exercice en utilisant l'échelle de Borg « catégorie-ratio » (CR-10) de sorte à prendre en compte la bivalence de celle-ci en la cotant entre -10 et +10. En effet, au début d'un exercice d'intensité modérée, les réponses affectives négatives seraient proches de zéro tandis que les réponses positives seraient quasi-maximales, de sorte que la charge affective se situerait proche de l'indice -10. Toutefois, si l'exercice était mené jusqu'à épuisement, ce score se rapprocherait de +10.

Dans ce contexte, Baron et al. (2010) proposent que l'athlète ne prend pas compte uniquement des réserves physiologiques dont il dispose mais aussi de la charge affective reliée à l'exercice afin qu'aucune mise en danger effective ne survienne avant la fin de l'épreuve, tant sur le plan physiologique qu'émotionnel.

Le modèle du Gouverneur/Contrôleur central (Noakes et al. 2004b) propose que l'inconfort vécu lors de l'exercice diminue progressivement le désir conscient de vouloir dépasser ce mécanisme de protection. Cette théorie invite donc à prendre en compte le rôle de la motivation dans le choix des stratégies d'allure. Les psychologues et physiologistes qui ont étudié la motivation s'accordent pour dire que la motivation est dirigée vers un but et est exprimée dans le cadre de situations autodéterminées (Baron et al. 2010). Les individus développent ainsi des stratégies destinées à leur permettre d'atteindre leurs buts. Les phénomènes émotionnels représentent dans cette perspective des mécanismes centraux d'autorégulation qui permettent à l'être humain de s'adapter à l'environnement au sein duquel il vit (Damasio 2000).

Hulleman et al. (2007) ont montré qu'une motivation extrinsèque fournie avant un exercice cycliste contre-la-montre n'améliore pas la performance lors d'une épreuve sur 1500m, suggérant ainsi que les stratégies d'allure sont identiques quel que soit le niveau de motivation de l'athlète. Toutefois, la motivation extrinsèque n'était associée dans cette étude qu'au gain d'une petite somme d'argent. D'autres sources de motivation extrinsèque semblent plus susceptibles d'influencer la stratégie d'allure d'un athlète, notamment la présence d'autres compétiteurs et/ou la perspective d'une victoire importante. Aucune étude n'a cependant permis de valider cette hypothèse. Pour Baron et al. (2010), le désir de soutenir un haut niveau de difficulté d'effort perçue durant l'exercice dépend de la différence entre la charge affective maximale tolérée et le niveau de charge affective effectivement ressenti durant l'exercice ([Figure 13](#)). Plus la réponse affective est positive durant l'exercice, plus le désir sera grand de maintenir voire d'augmenter l'intensité d'effort. A l'inverse, plus la réponse affective est négative et moins le désir de soutenir l'intensité fixée est grand (Baron et al. 2010).

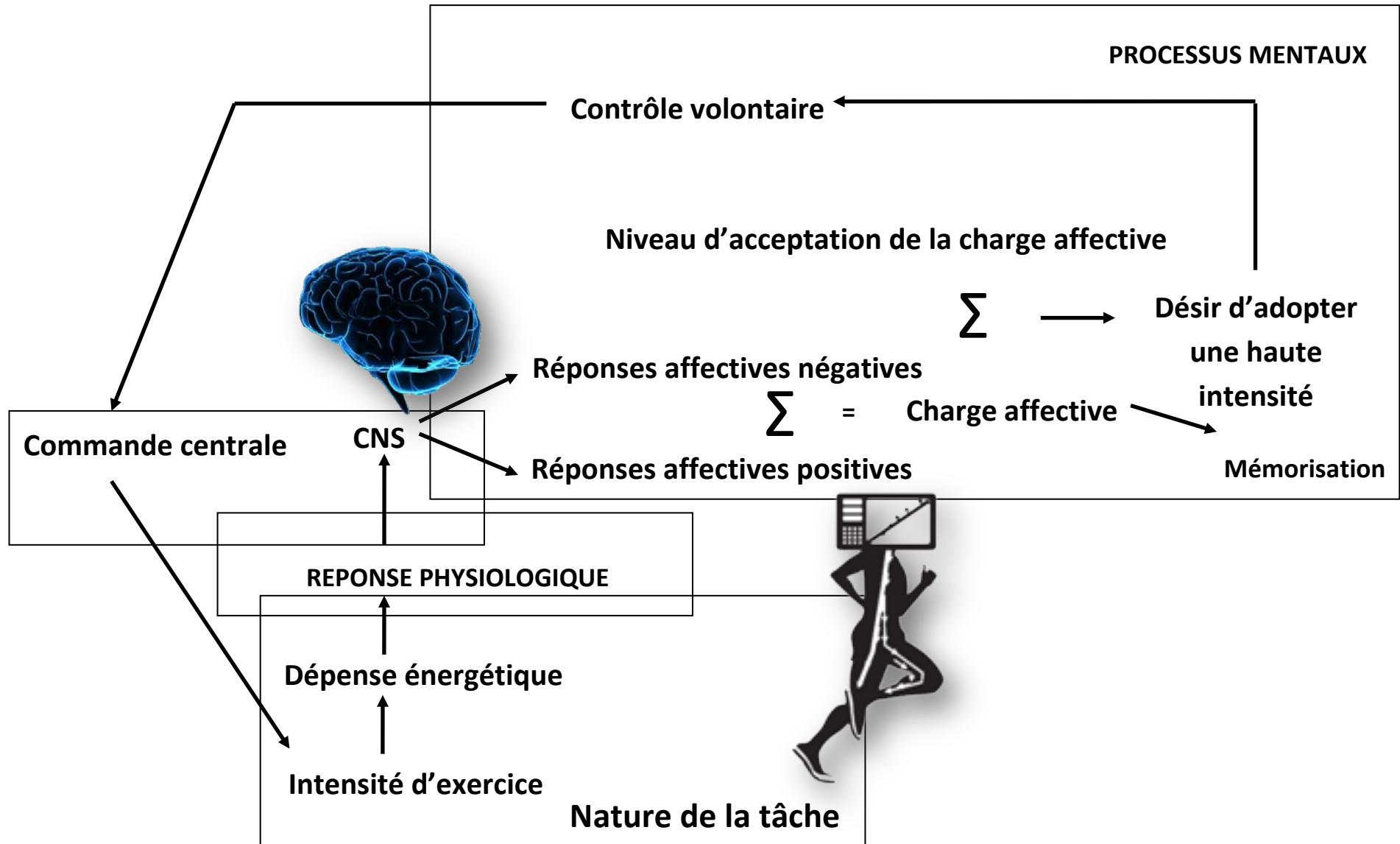


Figure 13. Mécanismes interactionnels entre la nature de la tâche, la réponse physiologique et les processus mentaux lors du choix de la stratégie d'allure. Le niveau d'acceptation est défini comme la plus haute charge affective pouvant être supportée au regard de la durée d'effort anticipée. Ce paramètre est susceptible d'être modulé par des paramètres psychologiques avant et pendant l'exercice. *D'après Baron et al. (2010).*

Ainsi, lorsque l'exercice est mené jusqu'à l'épuisement volontaire, les afférences physiologiques sont susceptibles d'augmenter la charge affective et de réduire le désir de l'athlète de maintenir l'intensité d'exercice, de telle sorte que la commande centrale vers les muscles est progressivement réduite et que la vitesse diminue. En revanche, lorsque l'exercice est réalisé à une faible intensité et que les afférences physiologiques sont faibles, la charge affective est faible et augmente le désir d'adopter une intensité d'exercice élevée. De manière similaire, lorsque la motivation est limitée par rapport à son niveau maximal, l'intensité d'exercice est plus faible pour une charge affective donnée (Baron et al. 2010).

4.3.1.3. LE ROLE DES EMOTIONS SUR LE CHOIX DE LA STRATEGIE D'ALLURE

Les stratégies d'allure optimales sont généralement démontrées par des athlètes de haut niveau qui ont développé une planification appropriée de l'évolution de la puissance produite en fonction de la durée/distance de l'épreuve à réaliser (Foster et al. 2009; Hettinga et al. 2006). Des résultats récents ont suggéré que cet apprentissage s'effectue très tôt dans la carrière de l'athlète (Foster et al. 2004; Foster et al. 2009), de sorte que les émotions développées et mémorisées par l'entraînement influencent l'intégration de la stratégie d'allure jugée optimale (Baron et al. 2010) ([Figure 13](#)).

Ainsi, lorsqu'un sujet n'a pas d'expérience sur une épreuve donnée, ses représentations de la tâche à accomplir sont imprécises car il ne possède aucun élément de comparaison en mémoire lors d'une épreuve réalisée préalablement. Aucune estimation précise du temps nécessaire pour couvrir la distance ne peut donc être réalisée.

Foster et al. (2009) ont mis en évidence récemment que la manière dont un sujet stabilise une stratégie d'allure pour une épreuve donnée est reliée à l'augmentation de sa confiance dans le fait qu'il pourra terminer l'épreuve sans que des niveaux irraisonnables de difficulté d'effort perçue ou de risques de blessure ne soient atteints. Dans cette perspective, les stratégies d'allure peuvent être considérées comme un processus complexe au sein duquel l'athlète gère l'intensité d'exercice à chaque instant en prenant en considération l'état des ressources physiologiques et psychologiques qu'il possède encore et la durée d'exercice qu'il estime demeurer, s'il maintient la même intensité jusqu'à la ligne d'arrivée (Garcin et al. 1999).

Il est envisageable que les sessions d'entraînement influencent les stratégies d'allure d'un athlète en associant un niveau de charge affective avec la capacité de celui-ci à maintenir cet effort pour une durée donnée sans qu'aucune baisse de performance importante ne survienne (Baron et al. 2010). Ainsi, chaque émotion mémorisée lors de chaque session d'entraînement améliorerait la quantité et la qualité des informations enregistrées ([Figure 13](#)) (Foster et al. 2009; Mauger et al. 2009). En

utilisant ces données, l'athlète serait capable de comparer la charge affective ressentie lors d'un exercice précédent avec celle générée par l'exercice en cours. De la sorte, l'athlète deviendrait capable de mieux contrôler l'intensité d'exercice (St Clair Gibson et al. 2006), en sélectionnant un niveau de charge affective approprié pour soutenir l'intensité d'exercice lors de la durée d'exercice planifiée. La stratégie d'allure semble être donc dépendante d'une programmation préétablie très robuste, qui nécessite beaucoup de temps et de pratique pour être modifiée (St Clair Gibson et Foster 2007).

4.3.2. LES FEEDBACKS

La majorité des travaux explicatifs sur les stratégies d'allure ont étudié l'influence de la variabilité des paramètres physiologiques identifiés comme causes possibles de la fatigue induite par l'exercice sur l'évolution de l'intensité d'exercice consentie. Pour Tucker et Noakes (2009), l'allure lors d'un exercice serait modifiée par le système nerveux central de sorte à empêcher la survenue de potentielles défaillances psychophysiologiques avant la fin de l'épreuve (Baron et al. 2010; Tucker 2009; Tucker et Noakes 2009). Implicitement, la connaissance de la ligne d'arrivée doit donc être effective au début de l'exercice, car à défaut, aucun processus anticipationnel ne peut être mis en place (Baden et al. 2005). Si les variations d'intensité survenant lors de l'exercice permettent de prévenir la survenue de perturbations critiques de l'homéostasie avant la fin de l'exercice, alors la connaissance de la durée d'exercice constitue le « point d'ancrage » par rapport auquel la régulation du travail est opérée tout au long de l'épreuve (Baden et al. 2005; Tucker 2009).

Pour confirmer ce postulat, deux hypothèses ont dû être validées. Tout d'abord, si un sujet est correctement informé de la durée d'exercice à venir et que des informations erronées en termes de temps d'exercice écoulé ou de distance à parcourir lui sont fournies, alors la performance doit être modifiée, si la discordance entre les feedbacks apportés et la distance réelle parcourue/le temps réel écoulé est suffisamment grande pour être perçue par le sujet (Tucker 2009). Ensuite, si un athlète est incorrectement informé de la durée d'exercice qu'il doit réaliser, alors sa performance doit être dégradée si la discordance lui est révélée ou qu'il la détecte (consciemment ou inconsciemment), en raison de l'inadéquation entre le recrutement musculaire consenti et la durée d'exercice envisagée avant que celui-ci ne débute (Tucker 2009). Réciproquement, si l'athlète est incorrectement informé de la durée d'exercice écoulée, mais que la discordance entre la durée d'effort annoncée et la durée réelle est trop faible pour qu'il la perçoive, alors sa performance ne doit pas être affectée (Tucker 2009).

Pour tester cette hypothèse, Albertus et al. (2005) ont demandé à des cyclistes entraînés de réaliser cinq épreuves contre-la-montre de 20km, lors desquelles des informations correctes ou incorrectes

leur étaient transmises tous les kilomètres sur la distance parcourue depuis le départ. Ainsi, lors des épreuves durant lesquelles des feedbacks erronés étaient transmis, la longueur des kilomètres effectivement parcourus était augmentée/réduite de 250m. Les résultats ont montré que ni la performance globale, ni la difficulté d'effort perçue n'étaient modifiées à un quelconque moment de l'épreuve. Ces données indiquent que la stratégie d'allure est robuste, non affectée par la provision de feedbacks incorrects et qu'elle semble déterminée principalement au début de l'exercice en fonction de la durée prévue de l'épreuve. Probablement, si la discordance entre les informations erronées fournies et la distance réellement parcourue avait été plus grande, ou si les sujets avaient été conscients de l'inexactitude de celles-ci, il est probable que leur stratégie d'allure aurait été modifiée par rapport à la situation-contrôle (*i.e.* réalisée en recevant des feedbacks exacts).

Ansley et al. (2004) ont étudié si la performance est dégradée lorsque la durée d'exercice anticipée diffère de celle effectivement réalisée. Ces auteurs ont montré que lorsque des cyclistes réalisent une épreuve maximale sur 36s après avoir été informés d'une durée d'effort de 30s, la puissance de pédalage développée lors des 6 dernières secondes est significativement plus faible que lorsque la durée exacte de l'effort leur a été annoncée au préalable. Ce résultat suggère que la stratégie d'allure est préprogrammée et régulée au niveau central, quand bien même la durée de l'effort à produire est courte. Une discordance de 20% entre la durée d'effort planifiée et celle effectivement soutenue engendre une dégradation du niveau de performance, probablement reliée à une mauvaise gestion de la dépense énergétique au cours de l'exercice. Cela suggère que la stratégie d'allure adoptée par un athlète lors d'une épreuve donnée est choisie en fonction de son expérience passée.

Une troisième preuve du fait que la stratégie d'allure adoptée lors d'une épreuve dépend directement de la durée d'exercice annoncée a été apportée par Nikolopoulos et al. (2001). Ceux-ci ont étudié les stratégies d'allure adoptées par des cyclistes expérimentés lors de trois épreuves contre-la-montre de distances annoncées toujours égales à 40km, alors que celles-ci étaient en réalité de 34, 40 et 46km. Aucune différence significative n'a été observée entre ces trois épreuves aussi bien en termes de puissance moyenne développée que de stratégie d'allure adoptée, suggérant que ces cyclistes étaient capables de maintenir leur puissance de pédalage en fonction de la distance planifiée en début d'exercice (40km). Pour Tucker (2009), ces résultats suggèrent qu'une différence de $\pm 15\%$ entre la distance annoncée et la distance réellement parcourue était insuffisante pour que les cyclistes détectent cette discordance et régulent différemment leur travail au cours de l'épreuve. Les feedbacks fournis aux sujets concernaient de surcroît le pourcentage de la distance totale restant à parcourir, de sorte que l'écart de 6km entre le début et la fin de l'épreuve ne cessait de se réduire au cours du temps.

4.3.3. LE NIVEAU D'EXPERIENCE

Des études récentes ont mis en évidence que l'intégration et la stabilisation d'une stratégie d'allure lors d'une épreuve physique donnée est le résultat d'un apprentissage qui nécessite de la répétition (Foster et al. 2009; Micklewright et al. 2010). Foster et al. (2009) ont étudié la manière dont se construit la pré-programmation de l'intensité d'exercice en confrontant des sujets à la réalisation répétée de 4 épreuves différentes : 6 épreuves cyclistes contre-la-montre de 3km (A), 3 épreuves contre-la-montre de 2km sur ergorameur (B), 4 épreuves contre-la-montre de 2km sur ergorameur avec une période d'entraînement entre les tentatives 2 et 3 (C), 3 épreuves cyclistes contre-la-montre de 10km (D). Les résultats ont révélé des améliorations de 6 et 10% de la performance lors des séries de 3 et 6 épreuves, respectivement. Pour chaque forme d'épreuves, une augmentation de la puissance développée était observée lors des phases initiale et médiane (Figure 14).

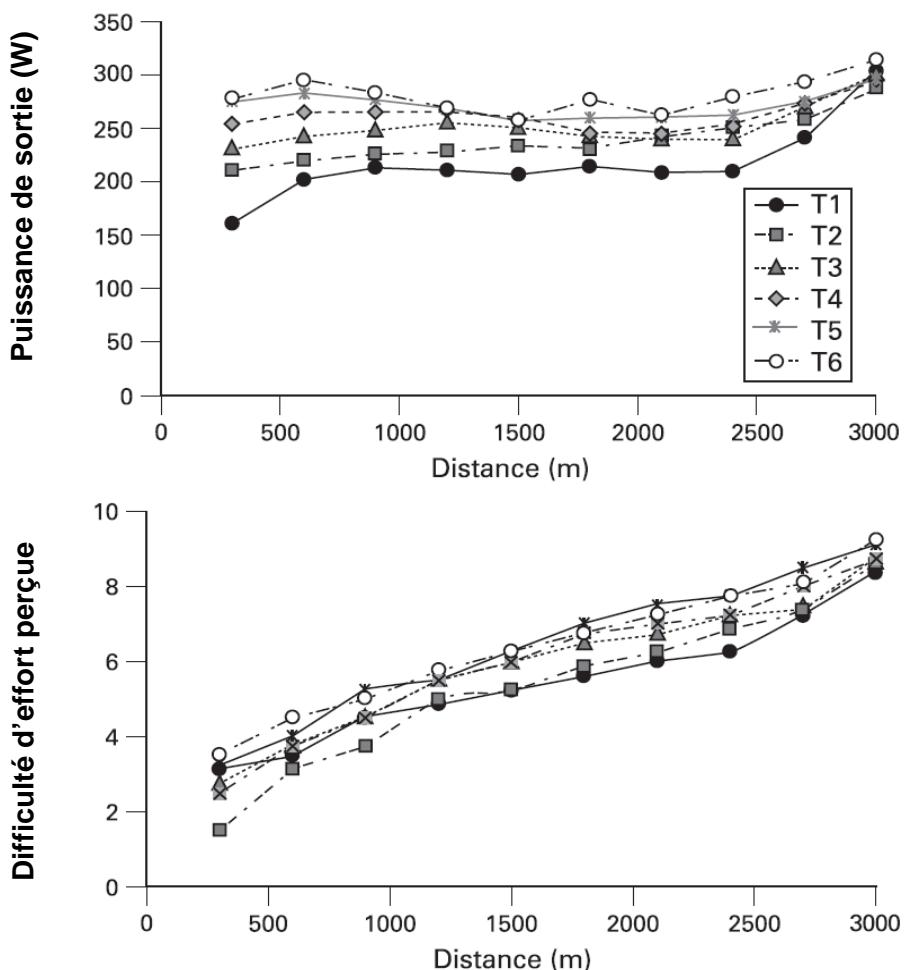


Figure 14. Evolutions de la puissance développée et de la difficulté d'effort perçue lors d'une performance maximale de 3000m sur ergocycle réalisée 6 fois par des sujets novices. Il faut noter l'augmentation progressive de la puissance développée lors des 600 premiers mètres et l'augmentation de la difficulté d'effort perçue lors de cette même période au cours des 6 essais consécutifs. *D'après Foster et al. (2009).*

Les stratégies adoptées par les sujets demeuraient toutefois différentes de celles constatées chez des spécialistes de la discipline (Foster et al. 2009). Cette étude a de la sorte mis en exergue que l'amélioration de la stratégie d'allure est initialement impulsée par l'augmentation de la confiance du sujet dans le fait qu'il peut terminer l'épreuve sans atteindre son niveau maximal de pénibilité tolérable avant la fin de celle-ci, ni risquer de se blesser. Cette recherche a montré par ailleurs que la manière dont se construit la programmation de la gestion de l'intensité d'exercice lors d'une épreuve contre-la-montre est conditionnée par l'expérience passée de l'athlète et par la variété des feedbacks que reçoit celui-ci au cours de l'exercice (Foster et al. 2009). Pour autant, ce processus d'apprentissage semble nécessiter une quantité de répétitions supérieures à 6 essais pour que la stratégie d'allure stabilisée devienne optimale (Foster et al. 2009).

De même, Mauger et al. (2009) ont mis en évidence que des cyclistes sont capables de s'approcher de leur record personnel sur un contre-la-montre de 4km alors qu'aucun feedback sur la distance parcourue ne leur est fourni. Pour qu'ils y parviennent, il leur est néanmoins nécessaire d'avoir répété au préalable suffisamment de fois l'épreuve (*i.e.* 4 essais dans cette étude) pour démontrer une stratégie d'allure similaire à celle qu'ils mettent en place lorsque des feedbacks sur la distance parcourue leur sont fournis.

L'ensemble de ces résultats suggère que la programmation de la gestion de l'intensité d'exercice lors d'une épreuve contre-la-montre n'est pas établie *a priori* mais qu'elle nécessite un temps suffisant pour pouvoir se développer. De prochaines études sont nécessaires pour caractériser la manière dont ce processus d'apprentissage se construit et identifier quelles procédures interventionnelles sont susceptibles d'optimiser la stratégie d'allure adoptée par un athlète en compétition.

Ce qu'il faut retenir

Les stratégies d'allure semblent pouvoir être modélisées comme un mécanisme complexe par lequel le cerveau de l'athlète contrôle continuellement l'intensité d'exercice en fonction des réserves physiologiques et psychologiques disponibles, tout en comparant le temps limite anticipé avant épuisement avec le temps demeurant avant le franchissement de la ligne d'arrivée. Des processus inconscients/physiologiques et conscients/émotionnels semblent interagir tout au long de l'exercice, de sorte à déterminer l'intensité d'exercice optimale pouvant être maintenue jusqu'à la ligne d'arrivée.

En simulant les réponses physiologiques vécues en compétition, l'entraînement concourt à l'identification par l'athlète de la stratégie d'allure optimale à stabiliser lors d'une épreuve donnée. Les informations sur la distance restant à parcourir et l'expérience passée incarnent ainsi des facteurs déterminant de la stratégie d'allure, en permettant à l'athlète de comparer l'évolution de sa difficulté d'effort perçue avec l'évolution optimale planifiée au cours de l'épreuve.

4.4. LES FACTEURS ENVIRONNEMENTAUX

La description et la compréhension des stratégies d'allure adoptées par les athlètes en situation de compétition sont souvent complexifiées par de multiples facteurs environnementaux comme la température, l'humidité ambiante, le vent, le profil du parcours ou encore la présence d'adversaires. Etant donné que bon nombre d'activités sportives cycliques, à l'image du triathlon, sont pratiquées dans des conditions où seule la distance de course est standardisée, la caractérisation de l'influence des facteurs environnementaux sur la stratégie d'allure paraît essentielle pour comprendre et identifier la stratégie optimale pour une épreuve sportive donnée.

4.4.1. LE VENT ET LES COURANTS MARINS

Peu d'études ont à notre connaissance investigué l'influence des paramètres météorologiques sur les stratégies d'allure adoptées par les sportifs. Pour autant, un grand nombre de disciplines, à l'image du triathlon, sont pratiquées en milieu extérieur, de sorte que les intempéries, le vent ou encore les courants marins sont susceptibles de modifier significativement le coût énergétique de la locomotion et la vitesse de déplacement de l'athlète. Dans cette perspective, Atkinson et Brunskill (2000) ont étudié l'effet de la stratégie d'effort sur la performance lors d'une épreuve cycliste contre-la-montre de 16,1km dont la moitié était parcourue face au vent et l'autre moitié avec un vent favorable. Leurs résultats ont révélé qu'il est préférable d'augmenter de 5% la puissance de pédalage sur les sections où le vent freine la progression et de la diminuer d'autant sur les portions où il agit dans un sens identique à celui du déplacement du cycliste, plutôt que d'adopter une puissance de pédalage strictement constante tout au long de l'épreuve. Par ailleurs, Atkinson et Edwards (1997) ont montré que lors des championnats cyclistes britanniques de course contre-la-montre, les meilleures cyclistes étaient celles qui avaient perdu le moins de temps dans la portion parcourue face au vent.

En triathlon, le courant marin ou le vent sont ainsi susceptibles de largement influencer les stratégies adoptées par les compétiteurs et doivent nécessairement être pris en compte par les triathlètes pour optimiser leur stratégie d'allure. Au regard des résultats précités, il apparaît que la meilleure stratégie est d'optimiser les bénéfices du *drafting* et de consentir une légère augmentation de l'intensité d'exercice (+5%) dans les portions face au vent/au courant tout en réduisant celle-ci sur les portions où le vent/le courant ont une action positive.

4.4.2. LE PROFIL DU PARCOURS

Ebert et al. (2005) ont étudié la distribution des puissances développées par des cyclistes professionnelles féminines lors de 27 épreuves de Coupe du Monde, dont 19 étaient planes et 8 montagneuses. Leurs résultats ont révélé que les étapes de plaine étaient parcourues à une vitesse et une puissance de pédalage moyenne supérieures à celles mesurées lors des épreuves montagneuses ($37,6 \pm 2,6 \text{ km.h}^{-1}$ et $192 \pm 21 \text{ W}$ vs. $33,9 \pm 2,7 \text{ km.h}^{-1}$ et $169 \pm 17 \text{ W}$, respectivement). Aussi, tandis qu'une plus grande fraction du temps était passée au dessus de 500W lors des épreuves de plaine, un plus grand pourcentage du temps de course était dépensé entre 100 et 300W lors des épreuves de montagne. Ces résultats révèlent que le profil du circuit influence significativement l'évolution de l'intensité d'exercice lors d'une épreuve sportive. Ces résultats ont été prolongés par une étude publiée en 2006 à partir du suivi de 31 coureurs cyclistes australiens de niveau national sur 206 compétitions réalisées sur une période de 6ans (Ebert et al. 2006). Ces auteurs ont montré que les coureurs avaient développé une puissance de pédalage moyenne plus élevée lors des critériums que lors des épreuves de plaine et de montagne (262 ± 30 , 203 ± 32 , $188 \pm 30 \text{ W}$, respectivement) et qu'ils passaient plus de temps au-dessus de $7,5 \text{ W.kg}^{-1}$ durant celles-ci ($15,5\% \pm 4,1\%$, $3,8\% \pm 1,7\%$, $3,5\% \pm 1,4\%$, pour les critériums, les épreuves de montagne et de plaine, respectivement). Le temps passé en-dessous de 5 W.kg^{-1} était de 67%, 80% et 85% pour les critériums, les épreuves montagneuses et les épreuves en plaine, respectivement. Enfin, environ 70, 40 et 20 sprints supérieurs à la puissance maximale aérobie étaient réalisés lors des critériums, des épreuves de montagne et des courses de plaine, respectivement.

Récemment, Abbiss et al. (2010) ont mis en évidence qu'il est possible d'optimiser l'analyse des variations de puissance lors des épreuves cyclistes au regard du profil de l'étape en utilisant des représentations graphiques en trois dimensions exprimant les puissances de pédalage développées en fonction des zones d'intensité d'effort mais aussi la durée des périodes de temps passées au sein de celles-ci (**Figure 15**). Ce type d'analyse permet de mieux caractériser la répartition temporelle des efforts fournis, ce qui s'avère déterminant d'une part pour mieux comprendre les exigences de la performance à haut niveau et optimiser la planification de l'entraînement. La répartition des phases de récupération au sein d'une épreuve lors de laquelle l'intensité présente une évolution stochastique est susceptible d'influencer largement les exigences énergétiques de l'activité pratiquée (Glaister 2005; Glaister et al. 2005). Glaister et al. (2005) ont par exemple mis en évidence une dégradation plus importante de la puissance moyenne développée lors d'une série de 20 sprints maximaux de 5s sur ergocycle entrecoupés de 10s de récupération passive par rapport à une série de sprints similaires entrecoupés de 30s de récupération active. Ce résultat suggère que la distribution

temporelle des efforts supra-maximaux lors d'une épreuve d'intensité stochastique est susceptible d'en influencer significativement les exigences sur les plans énergétique et musculaire.

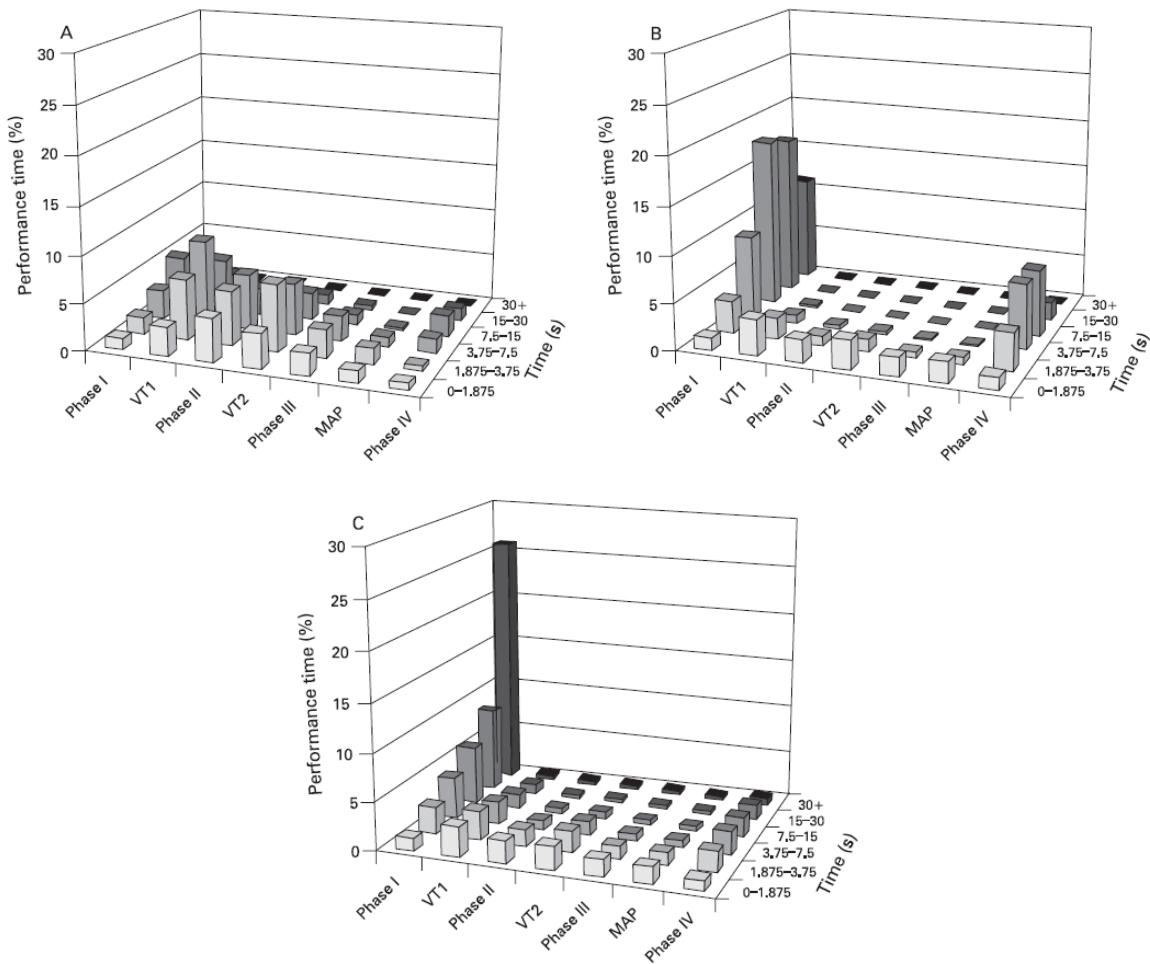


Figure 15. Analyse de la distribution des puissances développées par des cyclistes féminines lors de trois compétitions internationales sur route : épreuve contre-la-montre (A), critérium (B) et course en ligne (C). *D'après Abbiss et al. (2010).*

Ce qu'il faut retenir

Si la majorité des études scientifiques sur les stratégies d'allure ont été menées dans des conditions de laboratoire standardisées, de multiples facteurs environnementaux sont susceptibles d'influencer la stratégie d'allure adoptée par un athlète en situation de compétition. Dans ces circonstances, il apparaît que la modification des contraintes environnementales liées aux variations du vent, de la pente, les changements de direction constituent des paramètres d'influence à nécessairement prendre en compte pour expliquer et optimiser les stratégies d'allure adoptées par les sportifs en compétition. Les résultats révèlent par ailleurs que plus ces contraintes sont variables, plus l'athlète a intérêt à adapter son intensité d'effort, de sorte à minimiser le temps passé dans les portions où ces contraintes s'opposent à son déplacement. Il convient pour autant de déterminer avec précision l'amplitude jusqu'à laquelle ces variations d'intensité demeurent tolérables sur le plan physiologique.

4.5. LES AUTRES FACTEURS D'INFLUENCE

4.5.1. LE SEXE

La majorité des études sur les stratégies d'allure a été menée sur des sportifs masculins. Or, la manière dont ces résultats peuvent être transférés aux femmes demeure à clarifier. À notre connaissance, seules quatre études sur la natation (Thompson et al. 2000), l'aviron (Garland 2005), le cyclisme (Lim et al. 2010) et le triathlon (Vleck et al. 2008) ont analysé si le sexe influence les stratégies d'allure adoptées par les sportifs de haut niveau en situation de compétition. Les études de Thompson et al. (2000) et Garland et al. (2005) n'ont pas mis en évidence d'effet significatif. De même, Lim et al. (2010) ont rapporté que si les cyclistes féminines révèlent des valeurs de puissance de pédalage moyennes significativement inférieures à celles de compétiteurs masculins de même calibre engagés sur les mêmes parcours, aucune différence n'est constatée lorsque ces valeurs sont relativisées par rapport aux zones d'intensité délimitées par les puissances aux seuils ventilatoires et la puissance maximale aérobique. Vleck et al. (2008) ont en revanche avancé que si les triathlètes féminines adoptent des stratégies d'allure similaires à celles des hommes lors d'une compétition internationale de triathlon « distance Olympique » (où le *drafting* est autorisé en cyclisme), elles tentent moins de réduire les écarts séparant les packs lors de la section cycliste. Leurs résultats ont suggéré que c'est cette stratégie qui accroît l'impact de la partie cycliste sur la performance globale chez les triathlètes féminines par rapport à leurs homologues masculins. Cette étude (Vleck et al. 2008) était néanmoins limitée dans sa caractérisation de la variabilité de la charge de travail lors d'épreuves internationales de triathlon par l'absence de données concernant la charge de travail effectivement développée (à travers la fourniture de valeurs de fréquence cardiaque ou de puissance atteintes). De nouvelles investigations sont donc nécessaires pour mieux caractériser les différences et les similitudes entre hommes et femmes concernant les stratégies en triathlon, de sorte à éventuellement différencier la programmation de l'entraînement en fonction du sexe.

4.5.2. LES FACTEURS ANTHROPOMETRIQUES

Peu d'études ont concerné l'influence de ces facteurs sur les stratégies d'allure. Toutefois, une étude originale de Marino et al. (2004) a comparé l'influence de la température ambiante sur la performance réalisée par des coureurs africains de petite taille et des coureurs caucasiens plus grands et plus lourds au cours d'une épreuve de course à pied maximale sur 8km réalisée après 30min à 70% de $\dot{V}O_{2\max}$. Les résultats ont révélé que si aucune différence n'était constatée dans la situation thermique neutre ($\sim 27\text{min} ; 15^\circ\text{C}, 60\% \text{ d'humidité}$), les coureurs africains démontraient une performance significativement meilleure lorsque l'épreuve était réalisée dans une ambiance chaude

(33,0 vs. 29,7min, pour les Caucasiens et les Africains, respectivement ; 35°C, 60% d'humidité) ([Figure 16](#)).

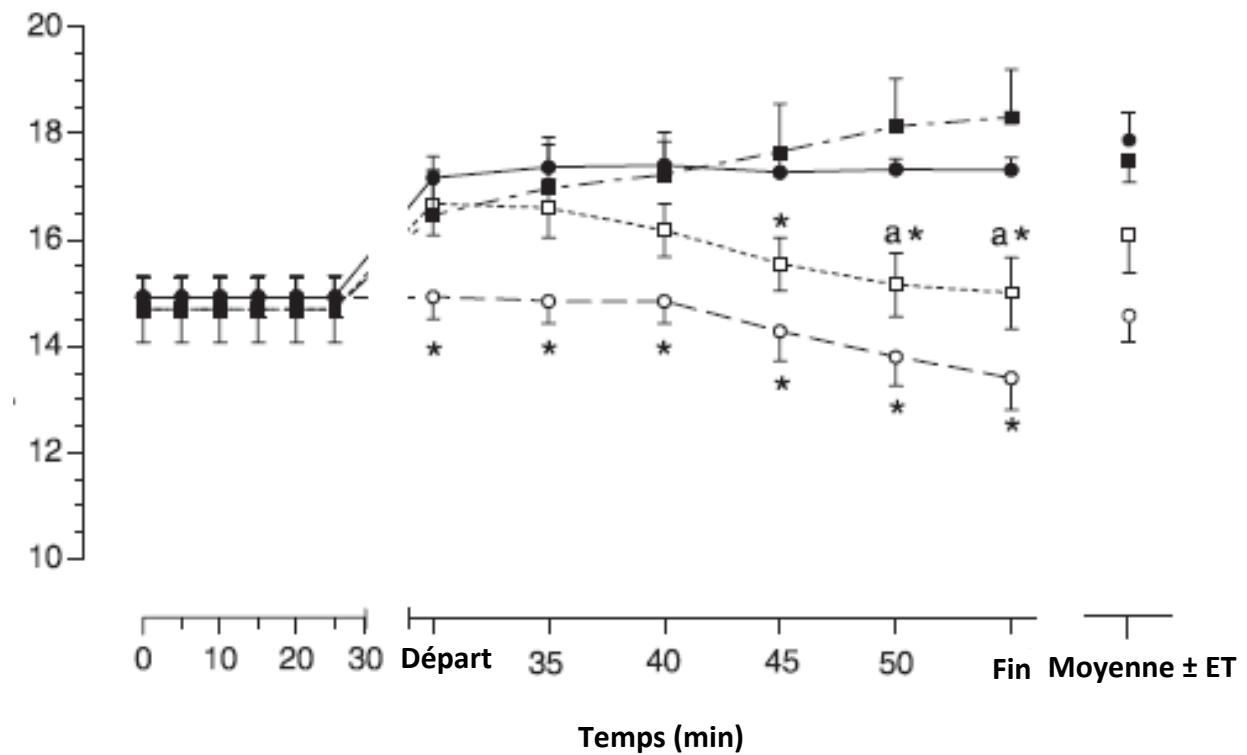


Figure 16. Evolution de la vitesse de course moyenne lors des 30min à 70% de $\dot{V}O_{2\max}$ et les 8km à allure libre chez les coureurs caucasiens et africains, en ambiances neutre et chaude. Les moyennes des coureurs caucasiens sont représentées par des ronds et celles des coureurs africains par des carrés (noir : ambiance neutre ; blanc : ambiance chaude). Les symboles à la fin de l'axe des abscisses représentent la valeur moyenne sur l'ensemble du 8km. *D'après Marino et al. (2004)*.

De façon intéressante, aucune différence de température rectale n'était constatée entre les deux groupes à l'issue des deux situations, mais les coureurs caucasiens démontraient un stockage de chaleur plus rapide que les coureurs africains dans la condition chaude ([Figure 17](#)). Les résultats ont par ailleurs révélé que la plus grande baisse de vitesse constatée chez les coureurs caucasiens en ambiance chaude par rapport à la course en ambiance neutre était visible dès le début de la course. Celle-ci n'était donc pas reliée à un départ plus rapide chez ces derniers, qui aurait pu engendrer l'apparition d'un état de fatigue prématué. Etant donné que la réponse des deux groupes était identique en termes de réponse thermorégulatrice, Marino et al. (2004) ont fait l'hypothèse qu'en ambiance chaude, les coureurs de petite taille profitent de leur petit gabarit pour limiter plus facilement l'augmentation de leur température corporelle. Dans cette perspective, à niveau de performance identique, les coureurs de petite taille sont susceptibles de maintenir plus facilement leur allure de course en ambiance chaude (et donc de tendre vers une stratégie d'allure constante) grâce à leur plus grande capacité de thermolyse. De nouvelles études sont nécessaires pour confirmer ces résultats préliminaires.

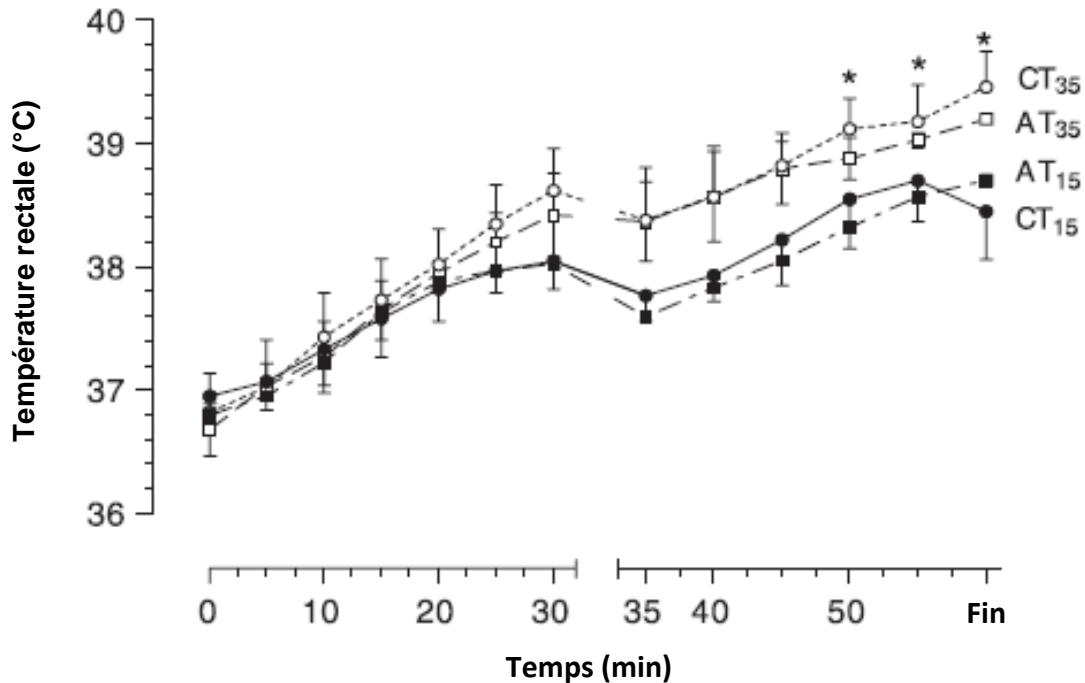


Figure 17. Evolution de la température rectale moyenne lors des 30min à 70% de $\dot{V}O_{2\max}$ et les 8km à allure libre chez les coureurs caucasiens et africains, en ambiances neutre et chaude. Les moyennes des coureurs caucasiens sont représentées par des ronds et celles des coureurs africains par des carrés (noir : ambiance neutre ; blanc : ambiance chaude). *Significativement différent des coureurs Caucasiens en ambiance neutre (CT₁₅), $p < 0,05$. D'après Marino et al. (2004).

4.5.3. LES FACTEURS SOCIO-CULTURELS

Aucune étude scientifique n'a, à notre connaissance, été publiée sur ce sujet. Pourtant, certaines analyses rapportées par Tucker (2009) révèlent des résultats intéressants. Cet auteur a étudié l'évolution des stratégies d'allure adoptées par les détenteurs des records du monde d'athlétisme sur 5km et 10km depuis 1920. Son analyse révèle une évolution progressive de la stratégie d'allure adoptée en montrant que les détenteurs du record du monde ont progressivement délaissé une stratégie variable (départ et fin rapides encadrant une allure plus faible lors du milieu de la course) pour tendre vers une stratégie de plus en plus constante (Figure 18).

Etant donné la large période considérée (*i.e.* environ 90ans), cette évolution souligne le caractère robuste des stratégies d'allure et leur empreinte socioculturelle. En d'autres termes, le fait qu'une tactique de course soit partagée par l'ensemble des coureurs d'une période et qu'elle nécessite des décennies pour être transformée suggère que celle-ci est déterminée pour partie par un héritage culturel (Tucker et al. 2009). L'inertie avec laquelle ces changements s'opèrent suggère de surcroît

que la stratégie d'allure optimale identifiée pour une épreuve donnée est fondée sur des représentations sociales robustes qui nécessitent des années pour être transformées.

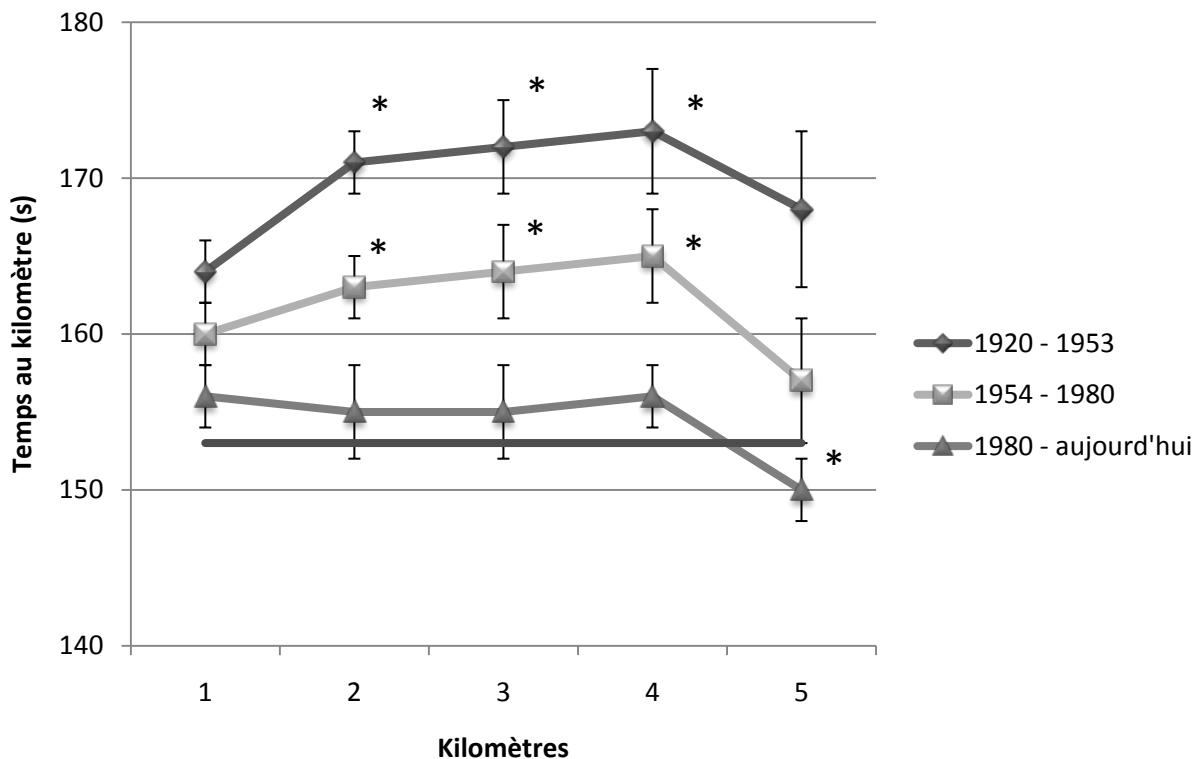


Figure 18. Evolution du temps moyen par kilomètre lors des records du monde de course à pied sur 5km depuis 1920. La droite représente l'évolution du temps par kilomètre lors d'une course-hypothétique strictement constante qui reproduirait l'allure moyenne adoptée lors des records du monde 1980 à aujourd'hui. *Significativement de l'allure lors du 1^{er} kilomètre, $p < 0,05$. D'après Tucker et al. (2009).

Il apparaît dans cette perspective que si la manière dont un athlète préprogramme sa gestion de l'intensité de l'exercice lors d'une épreuve sportive donnée, celle-ci est largement conditionnée par l'héritage culturel dont il bénéficie, qui est susceptible de largement influencer les contenus d'entraînement qui concernent l'apprentissage de cette gestion en compétition.

5. VERS UN MODELE EXPLICATIF DES STRATEGIES D'ALLURE

R. Tucker (2009) a récemment proposé un modèle explicatif des stratégies d'allure adoptées par les athlètes en situation de compétition, en s'inspirant directement des travaux princeps de T.D. Noakes. D'après celui-ci, l'intensité d'exercice lors des épreuves librement gérées est continuellement régulée par le cerveau à partir de l'intégration des afférences physiologiques en provenance de l'organisme. Le cerveau régulerait ainsi le recrutement musculaire de sorte à optimiser le niveau de performance tout en prévenant l'apparition de défaillances physiologiques graves et irréversibles durant l'exercice.

5.1. LA DIFFICULTE D'EFFORT PERÇUE : LE PARAMETRE CLE ?

5.1.1. LA DIFFICULTE D'EFFORT PERÇUE, VARIABLE REGULATRICE DE LA PERFORMANCE LORS DES EXERCICES A INTENSITE CONSTANTE

Souvent utilisée comme indicateur de la difficulté d'effort subjective associée à l'exercice physique, la difficulté d'effort perçue est classiquement reliée à des paramètres physiologiques comme la force musculaire (Cafarelli 1982), la fréquence cardiaque, la ventilation, la fréquence respiratoire, la consommation d'oxygène et la lactatémie (Robertson 1982). Borg (1982) a établi que la difficulté d'effort perçue constitue « le meilleur indicateur simple de l'effort physique », et « intègre de nombreuses informations, notamment les multiples signaux périphériques renvoyés par les muscles actifs, les articulations, les systèmes cardiovasculaire et respiratoire ainsi que le système nerveux central lui-même ». La difficulté d'effort perçue intègre aussi des paramètres de natures psychologique et affective (Hardy et Rejeski 1989; Rejeski et Ribisl 1980), de sorte que la sensation globale d'effort mesurée durant l'exercice constitue la manifestation consciente/verbale de l'intégration de ces signaux d'origines psychologique et physiologique (Hampson et al. 2001).

Le lien biologique entre la sensation subjective d'effort et les changements physiologiques qui surviennent durant l'exercice est d'une importance cruciale, car il détermine un mécanisme par lequel, la difficulté d'effort perçue pourrait, en théorie, contribuer à réguler la performance, la limite de l'exercice et la stratégie d'allure adoptée. En reprenant les données collectées par Baldwin et al. (2003), Noakes (2004) a montré que lors d'un exercice de longue durée réalisé à puissance constante jusqu'à l'arrêt volontaire, la performance est déterminée par la cinétique de la difficulté d'effort perçue, de sorte que l'exercice est stoppé lorsqu'un niveau maximal de difficulté d'effort tolérable est atteint. Dans cette étude, des cyclistes devaient réaliser deux épreuves temps-limite après avoir suivi de manière randomisée un régime hyperglucidique ou hypoglucidique. Les résultats ont mis en

évidence que si la difficulté d'effort perçue augmentait significativement plus vite dans la condition où les sujets débutaient avec un stock de glycogène bas, aucune différence significative n'était rapportée en termes de difficulté d'effort perçue au début et à la fin de leurs tests (Figure 19A). De façon intéressante, lorsque les valeurs de difficulté d'effort perçue étaient normalisées par rapport à la durée d'effort soutenue lors de chaque test, une évolution linéaire et similaire de ce paramètre était constatée dans les deux conditions expérimentales (Figure 19B).

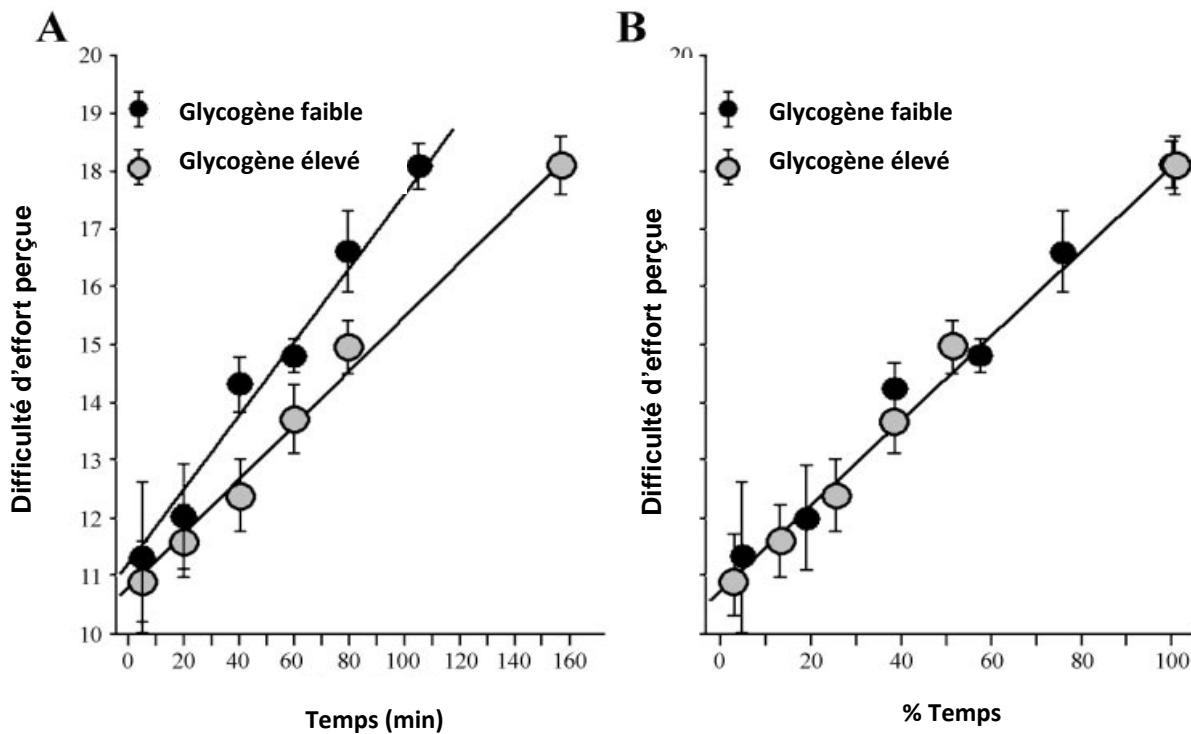


Figure 19. Evolutions de la difficulté d'effort perçue en fonction de la durée d'exercice lors d'une épreuve de pédalage à 70% de $\dot{V}O_{2\max}$ menée à épuisement chez des cyclistes ayant suivi un régime pauvre ou riche en hydrates de carbone (A : en temps d'effort absolu ; B : en temps d'effort relatif). D'après Noakes *et al.* (2004a) à partir des données originales de Baldwin *et al.* (2003).

Cette découverte a engendré deux implications importantes. Tout d'abord, ce résultat a renforcé l'hypothèse selon laquelle la difficulté d'effort perçue est influencée par les feedbacks physiologiques afférents, puisque ce paramètre augmentait plus rapidement lorsque le départ était pris avec un stock en glycogène bas. Noakes (2004) a suggéré que la difficulté d'effort perçue mesurée lors d'une épreuve de longue durée reflète « la vitesse à laquelle les réserves glycogéniques sont déplétées ». Il semble toutefois plus approprié de spéculer que la difficulté d'effort perçue à un moment donné de l'exercice est déterminée par le stock de glycogène restant à ce moment (Tucker 2009). Comme nous l'avons déjà présenté, des études ont montré que la difficulté d'effort perçue est aussi fortement corrélée avec la température corporelle et que les valeurs maximales de ce paramètre sont atteintes pour une température critique de 40°C, indépendamment de la cinétique de ce paramètre (Nielsen *et al.* 2001a; Nybo et Nielsen 2001b). De même, une réduction de FiO_2 engendre une augmentation

plus rapide de la difficulté d'effort perçue et diminue le niveau de performance réalisée lors d'une épreuve temps-limite menée à épuisement (Linossier et al. 2000).

De l'ensemble de ces résultats, il émerge donc que l'épuisement volontaire lors d'un exercice à intensité constante coïncide avec l'atteinte d'une difficulté d'effort tolérable considérée comme maximale (Tucker 2009). Cette hypothèse semble pouvoir s'accorder avec la plupart des modèles explicatifs de la fatigue mais suggère cependant que la difficulté d'effort perçue incarne le facteur clé d'un système qui permet de protéger l'individu tout au long de l'exercice, en interdisant la mise en danger de son intégrité physique (à travers par exemple l'atteinte d'une température corporelle trop élevée).

Aussi, l'observation selon laquelle la difficulté d'effort perçue augmente progressivement lors d'un exercice de longue durée mais selon des cinétiques différentes en fonction de l'état des réserves glycogéniques initiales suggère que la perception de l'effort augmente selon une composante anticipée, jusqu'à l'atteinte d'une valeur tolérable maximale qui fixe l'arrêt de l'exercice (Noakes et al. 2004a). Si au contraire, l'arrêt de l'exercice était déterminé directement par l'épuisement des réserves de glycogène, alors la difficulté d'effort perçue n'augmenterait qu'à la fin de l'épreuve, alors que le stock de glycogène tendrait vers l'épuisement.

5.1.2. LA DIFFICULTE D'EFFORT PERÇUE, VARIABLE REGULATRICE DE LA PERFORMANCE ET DES SYSTEMES PHYSIOLOGIQUES LORS DES EXERCICES LIBREMENT GERES

Peu d'études ont étudié si ce modèle s'applique aux exercices lors desquels l'intensité est librement gérée par l'athlète. Tucker (2009) suggère qu'au lieu de simplement maintenir une haute intensité d'exercice jusqu'à ce que la difficulté d'effort perçue atteigne une valeur quasi-maximale, un athlète réduit toujours son allure par anticipation lorsque sa température corporelle atteint une valeur élevée ($> 39^{\circ}\text{C}$) (Nielsen et al. 2001a; Nybo et Nielsen 2001b) ou que son stock de glycogène atteint un niveau faible (Baldwin et al. 2003). Cette hypothèse suggère que la difficulté d'effort perçue incarne le médiateur-clé de la régulation de l'intensité d'exercice. Etant donné que les stratégies d'allure permettent d'optimiser et de réguler les changements physiologiques engendrés par l'exercice, la difficulté d'effort perçue semble ainsi constituer une variable essentielle pour protéger l'organisme lors de l'exercice (Tucker 2009).

Pour valider ce postulat, Tucker et al. (2006b) ont utilisé des protocoles imposant une difficulté d'effort constante. Lors de ce type d'exercice, l'intensité d'exercice est libre de varier, mais l'athlète

reçoit pour consigne de maintenir sa difficulté d'effort perçue à un niveau préalablement fixé. Tucker et al. (2006b) ont ainsi utilisé l'échelle de Borg (6-20) et imposé à des cyclistes de réaliser une épreuve sur ergocycle lors de laquelle la difficulté d'effort perçue devait être constamment maintenue à « 16 » (entre « difficile » et « très difficile »). Ces épreuves étaient réalisées dans trois conditions : une en ambiance fraîche (15°C), une en ambiance neutre (25°C) et une en ambiance chaude (35°C). Le caractère novateur de ce protocole était que les variations de puissance de pédalage ne devaient intervenir qu'afin de maintenir la difficulté d'effort perçue toujours égale à la valeur imposée. Ainsi, il a été possible à partir de ce protocole d'étudier l'influence des perturbations physiologiques engendrées par le milieu environnant (en l'occurrence l'ambiance thermique) sur la difficulté d'effort perçue et sur le niveau de performance.

Dans ce contexte, les résultats ont montré que lors des premières minutes d'un exercice réalisé en ambiance chaude, la puissance de pédalage diminue plus rapidement que dans des ambiances neutre et fraîche. Pour maintenir la difficulté d'effort perçue au niveau imposé, les participants devaient réduire leur intensité d'exercice en ambiance chaude, et non dans les ambiances fraîche et neutre. Maintenir une intensité d'exercice constante aurait en effet probablement mené à une augmentation de la difficulté d'effort perçue dans cette condition. De manière intéressante, et à l'image de précédentes études menées sur l'exercice en ambiance chaude (Marino et al. 2004; Tucker et al. 2004), cette modification de la puissance de pédalage est intervenue alors que la température corporelle et la fréquence cardiaque n'étaient pas significativement différentes de celles mesurées en ambiances fraîche et neutre. La température rectale était inférieure à 38°C lorsque la puissance de pédalage a diminué par rapport aux deux autres conditions. La seule différence observée au moment où la stratégie d'allure était modifiée dans la condition « chaude » par rapport aux deux autres conditions thermiques concernait la vitesse de stockage de la chaleur. Cette dernière était significativement plus grande en ambiance chaude que dans les deux autres ambiances d'exercice testées, en raison du fait que la température cutanée avait augmenté significativement plus vite lors des premières minutes de l'exercice en ambiance chaude que dans les deux autres conditions investiguées. Les résultats ont révélé que cette baisse de la puissance de pédalage avait engendré une réduction de la vitesse de stockage de la chaleur lors des 20min subséquentes. De la sorte, la cinétique de stockage de la chaleur était identique dans les trois conditions d'exercice testées, mais le temps d'exercice était significativement plus faible en ambiance chaude qu'en ambiances fraîche et neutre (l'exercice était arrêté lorsque la puissance de pédalage diminuait en dessous de 70% de la valeur initiale).

Cette étude a ainsi mis en évidence que l'intensité d'exercice adoptée en ambiance chaude est régulée dès les premières minutes de l'épreuve en fonction de la vitesse de stockage de la chaleur

corporelle. Dans ce type de conditions, le travail consenti était régulé de sorte à maintenir la difficulté d'effort perçue à la valeur fixée et la diminution de la puissance de pédalage observée permettait aux sujets de réduire la vitesse de stockage de la chaleur. Tucker et al. (2006b) en ont conclu que la difficulté d'effort perçue permet à l'athlète d'ajuster sa stratégie d'effort de manière anticipée en fonction de l'amplitude des modifications physiologiques qu'engendre l'exercice. De nouvelles recherches sont requises pour appliquer ce modèle à d'autres interventions, fondées par exemple sur la modification de la disponibilité de l'oxygène, la déplétion des substrats énergétiques ou l'utilisation de drogues capables de modifier la sensation de fatigue engendrée par l'exercice.

5.1. LE MODELE « ANTICIPATION – DIFFICULTE D’EFFORT PERÇUE – FEEDBACKS » (TUCKER, 2009)

5.1.1. APPLICATION AUX EXERCICES A INTENSITE FIXE

La [Figure 20](#) décrit le modèle récemment proposé par Tucker (2009) pour la régulation de la performance lors d'un exercice à puissance constante mené à l'épuisement volontaire. Celui-ci concerne notamment les exercices incrémentés, classiquement utilisés pour mesurer $\dot{V}O_{2\max}$. Au début de l'exercice, les informations afférentes en provenance de multiples systèmes physiologiques et les signaux externes/environnementaux (A) sont utilisés par le cerveau pour prévoir la durée d'exercice qui peut être maintenue sans engendrer de dérangements critiques de l'homéostasie (B). Les feedbacks physiologiques afférents dépendent de l'intensité d'exercice et des conditions environnementales, comme la température et la pression partielle en oxygène dans l'air inspiré. Simultanément, la vitesse initiale d'augmentation de la difficulté d'effort perçue est déterminée en fonction d'un calcul subconscient de la durée d'exercice prévue (C). Cette planification initiale de la durée d'exercice et de la vitesse d'augmentation de la difficulté d'effort perçue constitue la composante anticipée du modèle « Anticipation – Difficulté d'Effort Perçue – Feedbacks » (Tucker 2009).

Parce que l'exercice se termine quand une difficulté d'effort perçue maximale est atteinte (D), la durée menant à l'arrêt de l'exercice est déterminée par la cinétique d'augmentation de la difficulté d'effort perçue, qui elle-même est continuellement modifiée en fonction de l'intégration continue des feedbacks afférents en provenance des systèmes physiologiques (E). La durée d'exercice maximale (*i.e.* ne mettant pas en danger l'intégrité psychophysiologique de l'athlète) est ainsi déterminée en fonction de la combinaison d'une prévision et des afférences physiologiques modifiées au fur et à mesure de l'exercice. La difficulté d'effort perçue maximale (D) est atteinte avant que des changements trop sévères de l'homéostasie n'ocurrent.

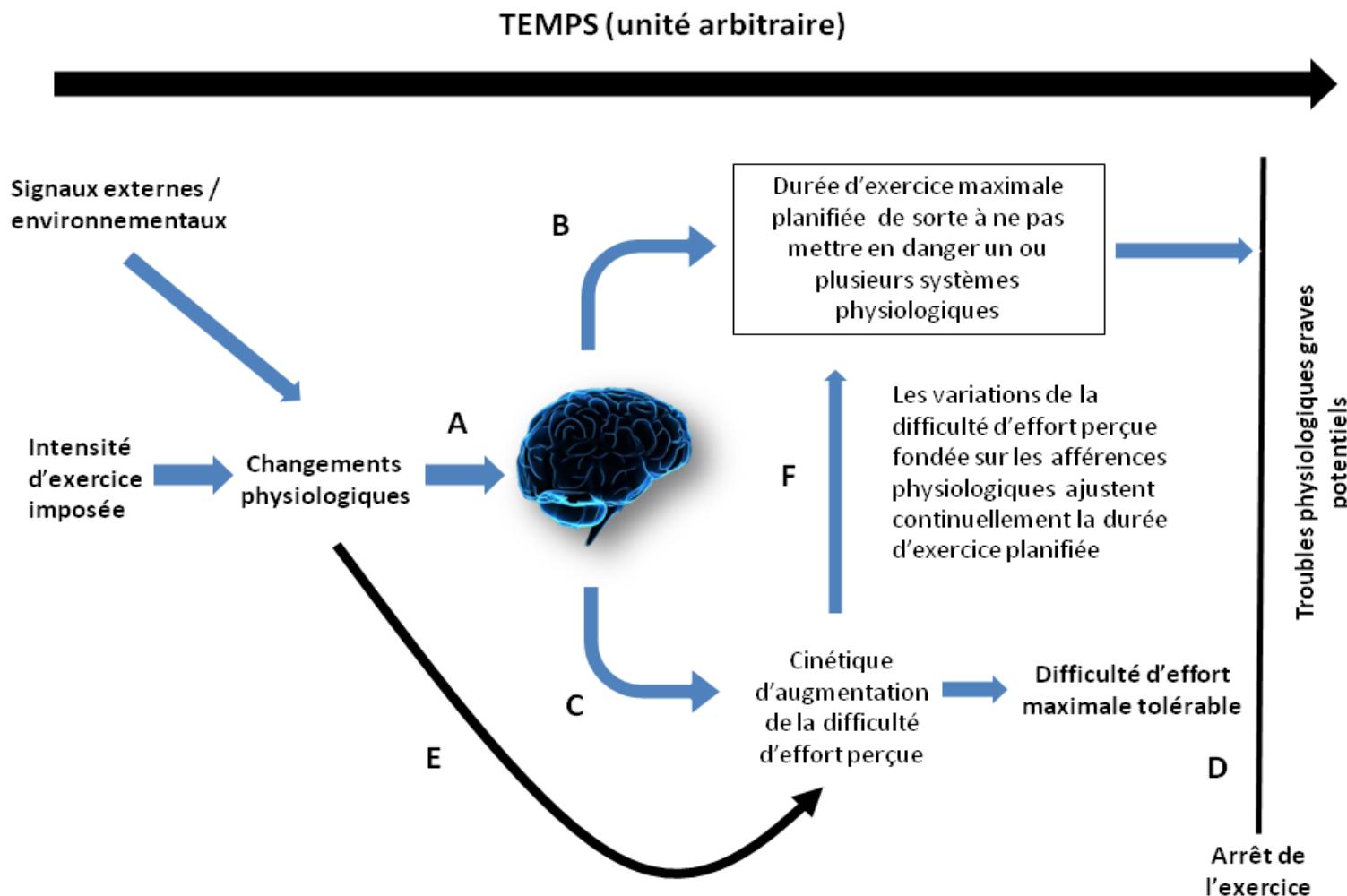


Figure 20. Application du modèle « Anticipation – Difficulté d'Effort Perçue – Feedbacks » aux exercices où l'intensité est constante et imposée. *D'après Tucker (2009).*

Le caractère novateur de ce modèle réside dans le fait que les changements physiologiques engendrés par l'exercice ne limiteraient pas directement la capacité de l'athlète à poursuivre l'exercice (Noakes et St Clair Gibson 2004; Noakes et al. 2004b) et ne seraient pas la cause singulière de l'augmentation de la difficulté d'effort perçue au cours de l'épreuve. Au contraire, les feedbacks afférents, la durée d'effort anticipée et les variations physiologiques survenant lors de l'exercice seraient utilisées par le système nerveux central pour prévoir la future réponse physiologique. A partir de la modification de ces feedbacks, la difficulté d'effort perçue augmenterait selon une cinétique qui détermine la durée d'exercice que l'athlète peut soutenir sans mettre en danger l'un de ses systèmes physiologiques. Ce modèle peut ainsi s'appliquer aux études qui ont montré l'influence de l'ambiance thermique (Nielsen et al. 2001a; Nybo et Nielsen 2001a, b) ou des réserves glycogéniques (Baldwin et al. 2003; Noakes 2004) sur la performance lors d'un exercice réalisé à intensité constante, mené à l'épuisement volontaire.

5.1.2. APPLICATION AUX EXERCICES LIBREMENT GERES

Le modèle précédent ([Figure 20](#)) n'est applicable qu'aux exercices réalisés à une intensité fixe, lors desquels l'athlète ne peut pas modifier son allure et détermine uniquement la fin de l'exercice. Si l'intensité d'exercice est libre, alors des interventions expérimentales comme la modification de la pression partielle en oxygène dans l'air inspiré, la manipulation de l'état des réserves glycogéniques ou la fourniture de feedbacks erronés sur la distance parcourue modifient la stratégie d'allure, alors que la cinétique d'augmentation de la difficulté d'effort perçue reste identique par rapport à une situation-contrôle (Albertus et al. 2005; Baldwin et al. 2003; Marino et al. 2004; Peltonen et al. 1997; Tatterson et al. 2000; Tucker et al. 2004).

Dans la [Figure 21](#), la difficulté d'effort perçue est déterminée par le cerveau au début de l'exercice, et le temps-limite d'exercice est fixé par la cinétique selon laquelle ce paramètre augmente pour atteindre une valeur maximale tolérable. En revanche, lors d'un exercice librement géré réalisé sur une distance connue à l'avance, l'intensité peut être modifiée par le sujet en réponse à l'atteinte d'une difficulté d'effort jugée trop haute ou subjectivement intolérable. Dans cette perspective, le cerveau intégrerait les informations afférentes en provenance de multiples origines physiologiques (décrivées précédemment) pour générer la difficulté d'effort perçue, et régulerait en retour l'intensité d'exercice de sorte à ce que la difficulté d'effort perçue n'augmente pas de manière excessive avant l'approche de la ligne d'arrivée et n'engendre un arrêt prématué (Noakes 2004; Tucker et al. 2006b). De façon intéressante, pour que la difficulté d'effort reste dans une zone « tolérable », il est nécessaire qu'il existe une difficulté d'effort jugée acceptable et planifiée pour chaque période de

l'exercice, de sorte à ce que l'athlète puisse la comparer à la difficulté d'effort effectivement perçue à chaque période de l'épreuve. Cette évolution programmée de la difficulté d'effort perçue (*RPE template*) serait générée à partir de l'expérience passée du sujet et de sa connaissance de la durée d'exercice à réaliser (Foster et al. 2009; St Clair Gibson et al. 2006). Il convient toutefois de noter que cette évolution planifiée de la difficulté d'effort perçue est un postulat théorique qui ne peut être directement mesuré, mais qui est indispensable pour comprendre comme la difficulté d'effort perçue effectivement ressentie est interprétée au cours de l'exercice.

Selon le modèle de Tucker (2009) présenté dans la [Figure 21](#), la régulation de l'intensité durant un exercice librement géré est fixée par une combinaison de feedbacks (qui déterminent la difficulté d'effort perçue) et de projections anticipées (qui fixent l'évolution prévue de la difficulté d'effort perçue à laquelle la perception de l'effort effectivement ressentie est continuellement comparée lors de l'épreuve).

La composante anticipationnelle requiert une expérience passée et donc de l'entraînement (Foster et al. 2009), mais aussi la connaissance d'un ensemble de paramètres physiologiques (comme l'état initial du stock de glycogène ou la température de la peau) (Tucker et Noakes 2009) et de facteurs psychologiques (niveau de motivation, présence/absence d'adversaires, etc.) (A, [Figure 21](#)) (Baron et al. 2010). De plus, au départ d'un exercice librement géré, l'athlète est généralement conscient de la distance de l'épreuve qu'il va devoir réaliser. Tucker (2009) propose ainsi que c'est au regard de l'ensemble de ces paramètres que l'athlète sélectionne l'intensité initiale, qu'il considère comme optimale au regard de la durée d'exercice anticipée (B).

Parallèlement, il existe une planification de l'augmentation souhaitée de la perception d'effort (C). Une performance optimale suppose en effet une augmentation de la difficulté perçue, de sorte à ce qu'une intensité maximale tolérable soit atteinte à la toute fin de l'exercice. Si cette difficulté d'effort maximale est ressentie avant la ligne d'arrivée, alors la performance réalisée est dégradée en raison de la fatigue prématuée engendrée et de la baisse subséquente du travail produit (Noakes 2004). L'évolution planifiée de la difficulté d'effort perçue constitue ainsi un repère grâce auquel la perception de l'effort peut être interprétée à chaque instant de l'exercice.

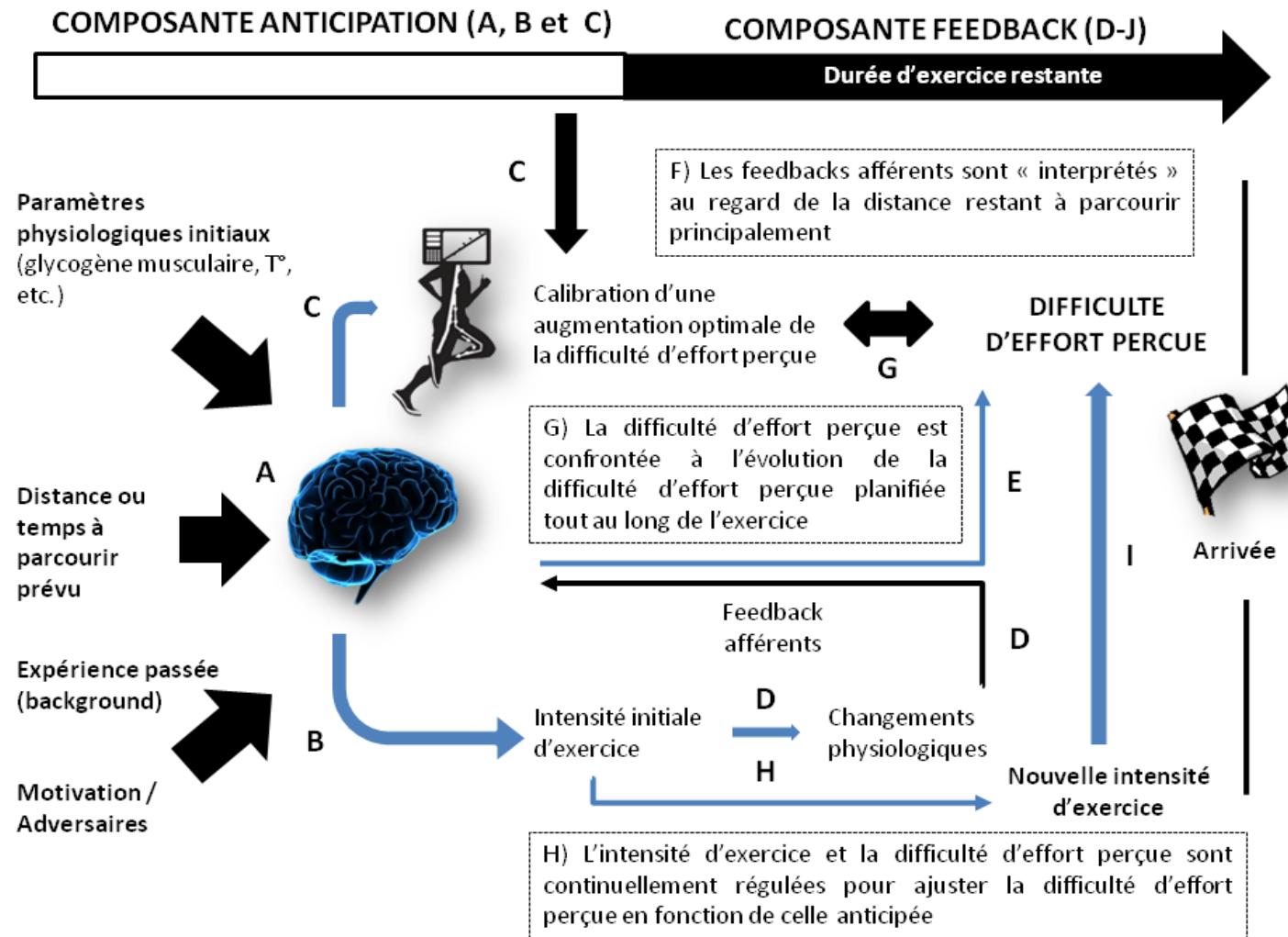


Figure 21. Application du modèle « Anticipation – Difficulté d'Effort Perçue – Feedbacks » aux exercices où l'intensité est librement gérée. Les lignes noires représentent la commande centrale ; les lignes bleues représentent l'intensité d'exercice consentie et les processus efférents. *D'après Tucker (2009).*

Dès lors que l'exercice débute, la modification des paramètres physiologiques, comme la température centrale, la température cutanée, la cinétique d'accumulation de la chaleur, les concentrations en métabolites, le niveau de saturation artérielle en oxygène, l'augmentation du débit ventilatoire, l'élévation du rythme cardiaque et l'activation des mécanorécepteurs musculo-articulaires augmentent la quantité de feedbacks afférents envoyés en direction du cerveau (D). Ces signaux sont interprétés dans le contexte de l'exercice et génèrent la difficulté d'effort perçue (E). La durée d'exercice restante incarne un point de référence-clé face auquel sont interprétés les feedbacks afférents (F). La difficulté perçue est ainsi à la fois conséquence de la durée d'exercice qu'il reste et du travail effectivement produit, qui détermine le niveau des feedbacks afférents (D et F).

L'aspect-clé de ce modèle est que la difficulté d'effort perçue est comparée avec l'évolution planifiée de la perception de l'effort tout au long de l'épreuve (G sur la [Figure 21](#)). Ainsi, l'athlète régule son intensité d'exercice continuellement de sorte à ce que la difficulté qu'il perçoit reste acceptable tout au long de l'épreuve, c'est-à-dire égale à celle qu'il a planifiée, eût égard au temps d'exercice restant prévu. Comme la difficulté perçue est principalement déterminée par la réponse physiologique associée à l'exercice, la régulation de la difficulté d'effort perçue détermine aussi la régulation des paramètres physiologiques durant l'exercice.

Les ajustements du travail produit (H) sont obtenus par des modifications du recrutement neuromusculaire, tel que l'ont démontré des études fondées sur l'analyse électromyographique (Kayser 2003; Kayser et al. 1994; Tucker et al. 2007; Tucker et al. 2004). Finalement, ces régulations préviennent la mise en danger de l'organisme en empêchant la défaillance d'un ou plusieurs systèmes physiologiques avant la fin de l'exercice tout en optimisant la performance réalisée. La difficulté d'effort perçue constitue à cet égard un paramètre de choix pour assurer cette fonction régulatrice étant donné qu'elle intègre l'ensemble des feedbacks afférents en provenance des différents systèmes physiologiques sollicités par l'exercice (St Clair Gibson et al. 2003), qu'elle est spécifique des conditions dans lesquelles est réalisée la performance (Hampson et al. 2001) et qu'elle constitue le seul lien potentiel entre les changements physiologiques engendrés par l'exercice et la conscience qu'a l'athlète de ces changements.

Si, par exemple, l'intensité initiale d'exercice est excessivement haute, celle-ci engendre des changements physiologiques qui génèrent une difficulté perçue supérieure à celle que l'individu aura planifiée comme optimale à cette période de l'épreuve (Tucker 2009). A partir d'un système de contrôle entre l'évolution planifiée de l'effort perçu au cours de l'exercice et les feedbacks afférents, le système nerveux central réduit le recrutement neuromusculaire et le travail produit (H) jusqu'à ce que la difficulté perçue retrouve un niveau considéré « acceptable » (I, [Figure 21](#)). En tant que résultat de l'interaction dynamique et continue entre la composante anticipationnelle et les

feedbacks afférents (G), la puissance produite lors de l'exercice est continuellement modifiée de sorte à réguler la difficulté perçue.

Parce que la difficulté d'effort perçue est influencée par les modifications de la réponse physiologique (Hampson et al. 2001), la comparaison de la valeur effective de ce paramètre avec sa valeur anticipée permettrait de prévenir la survenue de dérangements critiques de l'homéostasie (Tucker 2009). Ainsi, seule l'évolution du travail produit est modifiée lors d'un exercice d'une durée donnée, tandis que l'évolution de la difficulté d'effort perçue reste toujours identique malgré des conditions expérimentales différentes (Tucker et al. 2006b). La stratégie d'allure adoptée par un athlète rend ainsi compte de la manière dont celui-ci affecte ses ressources physiologiques et psychologiques tout en prévenant une augmentation excessive de la fatigue lors d'un exercice donné (Baron et al. 2010).

5.1.3. APPLICATION AUX PROTOCOLES IMPOSANT UNE DIFFICULTE PERÇUE CONSTANTE

Le modèle « Anticipation – Difficulté d'Effort Perçue – Feedbacks » proposé par Tucker (2009, [Figure 21](#)) est susceptible d'être éprouvé par l'utilisation de protocoles consistant à imposer une difficulté d'effort perçue fixe tout au long d'un exercice donné (Tucker et al. 2006b). Figer la difficulté perçue à un niveau prédéterminé remplace effectivement la planification préalable de l'évolution de ce paramètre habituellement mise en place par l'athlète au début de l'exercice (C, [Figure 21](#)). Lors de ce type d'étude, le sujet doit ainsi réguler le travail qu'il produit afin que la difficulté d'effort qu'il perçoit respecte toujours strictement celle imposée (et donc planifiée) (G, [Figure 21](#)).

Ce type de protocole permet de tester deux axes princeps du modèle proposé par Tucker (2009). Concernant l'axe anticipationnel, si l'intensité initiale d'exercice et la difficulté d'effort perçue sont déterminées de manière anticipée (B et C, [Figure 21](#)), alors la puissance développée lors d'une épreuve à difficulté d'effort imposée devrait être similaire quelles que soient les conditions expérimentales imposées (à travers la manipulation par exemple de la température ambiante, de la fraction inspirée en oxygène dans l'air ambiant ou du stock initial de glycogène via un régime alimentaire). A contrario, si l'intensité initiale d'exercice et la difficulté d'effort perçue sont déterminées par des feedbacks afférents, alors des différences de puissance sont susceptibles d'être observées dès le début de l'épreuve, dès lors que les différences entre les conditions expérimentales sont suffisantes pour être détectées par le sujet.

Par ailleurs, l'imposition d'une difficulté d'effort perçue fixe permet d'étudier l'effet des feedbacks afférents sur la régulation de l'intensité d'exercice. Le modèle « Anticipation – Difficulté d'Effort Perçue – Feedbacks » propose que les informations afférentes sont « interprétées » par le cerveau (D, **Figure 21**) et influencent directement la difficulté d'effort perçue. Cette dernière serait ainsi le résultat d'ajustements continus du travail produit de sorte à ce que sa valeur instantanée respecte toujours la valeur considérée comme optimale à chaque moment de l'exercice. Si la difficulté perçue est fixée, alors la puissance développée est susceptible de diminuer de sorte à assurer le maintien de la perception de l'effort imposé. Dans ce cadre, l'hypothèse faite à partir du modèle proposé par Tucker (2009) est que toute intervention engendrant une perturbation de la réponse physiologique (e.g. réduction de F_iO_2 , modification de l'ambiance thermique) est susceptible de modifier les feedbacks afférents et donc d'engendrer de plus importantes variations que lors d'une épreuve contrôle, où aucune intervention n'aurait lieu.

Les résultats obtenus par Tucker et al. (2006) en imposant à des cyclistes la réalisation d'une épreuve à difficulté d'effort perçue constante dans trois conditions environnementales différentes (ambiances fraîche, neutre ou chaude) confirment l'ensemble de ces suggestions. Les résultats ont tout d'abord montré que la puissance de pédalage adoptée au tout début de l'exercice était identique dans les trois conditions, ce qui a suggéré que l'intensité initiale de l'exercice était choisie de manière anticipée (**Figure 21**) en fonction de l'expérience passée plutôt qu'en fonction des afférences physiologiques instantanées (la température initiale de la peau était en effet modifiée lors de cette étude en fonction de l'ambiance thermique dans laquelle le test était réalisé) (Tucker et al. 2006b).

Par ailleurs, la baisse de la puissance de pédalage constatée lors des 10 premières minutes de l'épreuve était similaire dans les trois conditions, supportant là encore que l'intensité initiale d'exercice était fixée de manière anticipée. Toutefois, entre la 10^{ème} et la 30^{ème} minute, la puissance de pédalage a plus rapidement diminué en ambiance chaude que dans les deux autres conditions expérimentales, ce qui a résulté en une performance significativement moins bonne (Tucker et al. 2006b). Sur l'ensemble de la course, la puissance de pédalage a diminué linéairement dans toutes les conditions, mais selon des cinétiques différentes. Ce résultat démontre que la difficulté d'effort perçue n'est pas uniquement un marqueur de l'intensité d'exercice, puisque la puissance développée diminuait différemment tandis que la difficulté perçue était fixée et identique tout au long des trois conditions expérimentales testées.

De plus, la cinétique d'accumulation de la chaleur était significativement plus rapide en ambiance chaude que dans les autres conditions uniquement lors des 10 premières minutes de l'épreuve, de sorte qu'aucune différence n'était plus observée ensuite, malgré la différence de 20°C entre

l'ambiance fraîche (15°C) et l'ambiance chaude (35°C). Ce résultat a été expliqué par une plus grande réduction de la puissance de pédalage dans la condition « ambiance chaude » que dans les deux autres conditions expérimentales. Ceci supporte la composante « feedbacks » du modèle proposé par Tucker (2009) en suggérant que les feedbacks afférents ont causé une augmentation de la difficulté d'effort perçue, qui dans le cadre de cette étude a contraint les sujets à réduire le travail produit de sorte à maintenir la difficulté perçue à un niveau prédéterminé.

Enfin, il est important de souligner que la rapide diminution de la puissance de pédalage dans la condition « ambiance chaude » est intervenue alors que la température corporelle était identique aux deux autres conditions (Tucker et al. 2006b). Cela suggère qu'il existe un contrôle anticipé de l'intensité d'exercice, y compris avant même que les feedbacks afférents ne commencent à influencer la difficulté d'effort perçue. Il n'existe donc pas de transition distincte entre les processus d'anticipation de la stratégie d'allure et de régulation de celle-ci par les feedbacks afférents, mais davantage une intégration continue de ces deux composantes (Tucker 2009).

5.1.4. APPLICATION AU PARADOXE DE L'ACCELERATION FINALE

Le modèle « Anticipation – Difficulté d'Effort Perçue – Feedbacks » est susceptible d'expliquer l'augmentation brutale de l'intensité d'exercice fréquemment constatée en fin d'épreuve chez de nombreux sportifs (*endspurt*) (Albertus et al. 2005; Marino et al. 2004; Marino et al. 2000; St Clair Gibson et al. 2001b; Tatterson et al. 2000). D'après celui-ci, les variations de production de travail observées lors d'un exercice sont le résultat d'une interprétation continue des feedbacks afférents combinée avec des calculs qui identifient la cinétique d'augmentation de la difficulté d'effort perçue et l'intensité initiale d'exercice. En particulier, la connaissance de la durée/distance de l'exercice restante incarne une référence essentielle par rapport à laquelle la difficulté d'effort immédiate est interprétée (F, [Figure 21](#)).

Tout au long de l'épreuve, il existe cependant un « degré d'incertitude » puisqu'il ne peut jamais être précisément connu quand l'exercice sera terminé. L'interprétation des feedbacks afférents et la continue régulation de l'intensité d'exercice sont ainsi sujettes à un niveau d'incertitude qui est d'autant plus grand que la durée de l'épreuve est longue, mais qui se réduit progressivement peu à peu, alors que l'athlète s'approche de la ligne d'arrivée. Etant donné que le rôle des processus de régulation est de prévenir la survenue de perturbations critiques de l'homéostasie, cette incertitude engendre le maintien d'une réserve en unités motrices et en énergie tout au long de l'exercice. Lorsque l'athlète approche de la ligne d'arrivée, l'incertitude se réduit, de sorte que ces réserves

n'ont plus besoin d'être conservées, ce qui autorise l'augmentation du niveau de recrutement neuromusculaire et de la puissance développée. Ceci explique l'accélération finale rapportée par bon nombre d'études scientifiques ayant investigué les stratégies d'allure spontanément adoptées par des athlètes lors d'exercices librement gérés (Noakes et al. 2009; Tucker et al. 2006a).

5.1.5. APPLICATION AUX EFFETS DES DROGUES PSYCHO-ACTIVES SUR LA PERFORMANCE

Le modèle explicatif des stratégies d'allure proposé par Tucker (2009) est susceptible d'expliquer l'effet des inhibiteurs de la recapture de la dopamine et de la sérotonine sur la performance en conditions chaudes rapportée par Watson et al. (2005). Ces drogues sont connues pour augmenter les niveaux d'excitation et de motivation et pour réduire la sensation de fatigue. Au regard de la [Figure 21](#), celles-ci sont susceptibles d'agir au niveau de deux sites potentiels. Tout d'abord, la détermination de l'intensité initiale d'exercice pourrait potentiellement être modifiée par l'augmentation des niveaux de motivation et d'excitation, qui engendrerait le choix d'une plus haute intensité initiale d'exercice (Tucker 2009). Ensuite, la difficulté d'effort perçue associée à une intensité de travail donnée est susceptible d'être réduite, de sorte que l'intensité d'exercice consentie serait augmentée pour que la difficulté perçue atteigne celle planifiée (Tucker 2009). Parallèlement, l'augmentation du travail produit par rapport à une situation contrôle (non accompagnée de la prise de substances psycho-actives) est susceptible de mener à l'augmentation de la production de chaleur, engendrant un phénomène d'hyperthermie (Watson et al. 2005).

Etant donné que le rôle premier du système de contrôle présenté par Tucker (2009) serait de réguler la performance à l'exercice pour prévenir des perturbations physiologiques graves, le modèle « Anticipation – Difficulté d'Effort Perçue – Feedbacks » suggère que l'utilisation de drogues psycho-actives est susceptible de perturber les processus qui contribuent à la régulation de l'intensité d'exercice. En effet, Watson et al. ont observé une augmentation significative de la puissance de pédalage en conditions chaudes (30°C) lorsque des inhibiteurs de la recapture de la dopamine et de la sérotonine (2 x 300mg de bupropion) étaient administrés à des cyclistes lors d'une épreuve contre-la-montre. De manière concomitante, une augmentation significative de la température rectale était constatée. Sept des neuf sujets investigués avaient ainsi été capables de dépasser la température corporelle critique de 40°C, suggérant que les mécanismes habituels de protection de l'organisme n'étaient plus assurés (Patterson et al. 1994). Cette hypothèse est susceptible d'expliquer aussi les effets de l'hypnose et de la prise d'amphétamines sur la performance physique (Tucker 2009).

5.1.6. APPLICATION AUX PROTOCOLES MANIPULANT LES INFORMATIONS FOURNIES AUX SUJETS

Le modèle « Anticipation – Difficulté d'Effort Perçue – Feedbacks » est aussi susceptible d'expliquer les résultats rapportées par des études qui ont investigué l'influence sur la performance de la fourniture de feedbacks erronés sur la durée d'effort restant à soutenir (Ansley et al. 2004; Baden et al. 2005; Nikolopoulos et al. 2001; Peltonen et al. 1997). Ces études permettent de tester la composante anticipationnelle du modèle de Tucker (A, B et C sur la [Figure 21](#)), étant donné que ce type de protocoles perturbe la distance/durée d'exercice planifiée (A, [Figure 21](#)). Or, d'après le modèle, la détermination de l'intensité initiale d'exercice et la planification de l'évolution de la difficulté perçue sont fondées sur la durée d'effort programmée (B et C, [Figure 21](#)).

Par ailleurs, le réajustement continu de la difficulté d'effort perçue et l'interprétation des feedbacks afférents dépendent de la connaissance de la durée d'exercice qu'il reste à accomplir (St Clair Gibson et al. 2006) (C et F, [Figure 21](#)), de telle manière qu'une prévision incorrecte de la distance restant à parcourir empêche la bonne interprétation des afférences physiologiques. Ainsi, la transmission d'informations décevant le sujet sur sa performance engendre de nombreuses erreurs de planification de l'action et d'interprétation des feedbacks afférents.

Dans le cas d'un exercice lors duquel la durée d'effort est plus courte que celle planifiée, une dégradation de la performance doit être attendue, car aussi bien la planification de l'intensité d'exercice que celle de l'évolution de la difficulté perçue et l'interprétation des feedbacks auront été faussées pour avoir été fondées sur un exercice plus long que celui effectivement réalisé. Ce type de protocole aboutit ainsi à une relative sous-utilisation des ressources physiologiques du sujet et à la conservation d'une importante capacité de travail à la fin de l'exercice (Tucker 2009). Dans ces circonstances, on peut par ailleurs supposer que l'athlète sera capable d'une plus grande augmentation de son allure de course à l'approche de la ligne d'arrivée, s'il est averti de la durée réelle de l'exercice, avant la fin de celui-ci. Cette hypothèse nécessite d'être confirmée par de prochaines études, étant donné qu'aucune recherche n'a à notre connaissance mis en place ce type de protocole.

Dans le cas d'un exercice lors duquel la durée d'effort est plus longue que celle initialement annoncée, le choix de l'intensité initiale, la planification de l'évolution de la difficulté perçue et l'interprétation des feedbacks afférents doivent être modifiés, dès lors que la nouvelle distance ou durée d'exercice est connue (Tucker 2009). Ce type de protocole engendre la sélection d'une intensité relativement élevée lors la première partie de l'exercice, de sorte que la difficulté d'effort perçue coïncide avec celle planifiée, jusqu'à ce que la durée d'exercice initialement annoncée soit

atteinte. Dès lors, l'accumulation de feedbacks afférents reliés au maintien d'une intensité d'exercice trop haute engendre une fatigue prématuée, une réduction de la puissance développée et une relative contre-performance par rapport à une situation consistant à parcourir la distance globale annoncée en ayant connaissance de celle-ci dès le début de l'épreuve (Tucker 2009).

Dans cette perspective, Ansley et al. (2004) ont constaté que lorsque des cyclistes réalisent une épreuve maximale de 36s après avoir été informés initialement que l'effort durerait 30s, leur puissance de pédalage est significativement plus basse lors des 6 dernières secondes de l'exercice par rapport aux six dernières secondes d'une épreuve initialement annoncée de 36s. D'après le modèle « Anticipation – Difficulté d'Effort Perçue – Feedbacks », ce résultat s'explique par une mauvaise interprétation des feedbacks afférents lors de l'épreuve, initialement prévue d'une durée de 30s ; les ressources physiologiques étant incorrectement allouées au début de l'épreuve. D'une manière similaire, lorsque des sujets courent sur un tapis roulant à une vitesse fixe et qu'on leur demande de courir plus longtemps que ce qu'ils avaient projeté, leur difficulté d'effort perçue et leur charge affective augmentent soudainement (Baden et al. 2005).

Un autre type de protocole fondé sur la fourniture d'informations inexactes consiste à informer correctement un athlète de la distance qu'il va devoir parcourir tout en lui transmettant des feedbacks inexacts sur la distance parcourue ou le temps écoulé depuis le début de l'épreuve. Albertus et al. (2005) ont mené dans cette logique une étude lors de laquelle des cyclistes expérimentés devaient réaliser plusieurs épreuves contre-la-montre de 20km en recevant des feedbacks exacts ou faux à chaque kilomètre. De façon intéressante, il n'a été constaté de différence significative en termes de performance, de stratégie d'allure ou de difficulté d'effort perçue à aucun moment de l'épreuve entre les conditions testées. Ces résultats ont suggéré que le choix de l'intensité initiale d'exercice et la planification de l'évolution de la difficulté d'effort perçue, sont fondés sur l'expérience passée et la connaissance préalable de l'épreuve à réaliser (A, B et C, [Figure 21](#)). Cette étude a aussi souligné que l'interprétation des feedbacks afférents avait joué un rôle non déterminant, étant donné qu'aucune différence n'était rapportée en termes de performance ou de stratégie d'allure. Il a été à cet égard spéculé que les cyclistes n'avaient pas pris en compte les informations incorrectes fournies sur la distance parcourue mais avaient plutôt fondé le choix de leur stratégie d'allure sur leur expérience passée, la connaissance initiale de la distance à parcourir et les afférences physiologiques reçues tout au long de l'épreuve (D, [Figure 21](#)). Les résultats de cette étude ont par ailleurs fortement supporté l'hypothèse selon laquelle la stratégie d'allure adoptée lors d'un exercice librement géré est prédéterminée pour partie par des calculs anticipés. Etant donné qu'il n'y avait pas d'autre intervention expérimentale que la manipulation des feedbacks fournis, l'interprétation des feedbacks afférents a semblé avoir joué un rôle mineur. Si les épreuves

avaient été réalisées dans la chaleur, ou que la fraction en oxygène avait été réduite, il est probable que la connaissance continue de la distance restant à parcourir ait eu un impact plus important sur la gestion de l'allure lors de l'épreuve (Tucker 2009).

Ce qu'il faut retenir

D'après le modèle « Anticipation – Difficulté d'Effort Perçue – Feedbacks » présenté par R. Tucker, l'athlète planifie l'évolution de la difficulté d'effort qu'il devra percevoir durant l'exercice qu'il va accomplir en se fondant sur son expérience passée, son état physiologique au départ de l'épreuve, l'épreuve à accomplir et les conditions environnementales de pratique. Durant l'exercice, les feedbacks en provenance des différents systèmes physiologiques mis en jeu sont intégrés au niveau central et génèrent une difficulté d'effort perçue, qui est continuellement comparée à une évolution préprogrammée (*RPE template*). Si d'autres facteurs, d'origine principalement psycho-affective (adversaires, motivation) peuvent eux-mêmes influencer l'intensité d'effort consentie, le travail produit est toujours régulé de sorte à interdire la survenue de défaillances physiologiques graves et irréversibles durant l'exercice.

5.2. STRATEGIE D'ALLURE ET COMPREHENSION DE LA FATIGUE AIGÜE ENGENDREE PAR L'EXERCICE : INTERETS ET LIMITES DU MODELE DU GOUVERNEUR CENTRAL (NOAKES ET AL. 2004)

5.2.1. LE MODELE DU GOUVERNEUR CENTRAL

Le modèle « Anticipation – Difficulté d'Effort Perçue – Feedbacks » proposé par Tucker en 2009 est directement fondé sur le modèle du Gouverneur Central présenté par Noakes et ses collaborateurs dans une série d'articles publiés entre 2004 et 2005 dans le *British Journal of Sports Medicine* (Lambert et al. 2005; Noakes et St Clair Gibson 2004; Noakes et al. 2004b; St Clair Gibson et Noakes 2004). Ce modèle, fondé sur la théorie du contrôle central proposée par Ulmer en 1996, envisage la fatigue comme un phénomène complexe, non linéaire, régi de manière ultime par un gouverneur / contrôleur situé dans le cerveau (Noakes et al. 2004b). Selon ce modèle, les variations d'intensité constatées lors d'un exercice librement géré sont continuellement contrôlées par un système de rétroaction où les signaux concernant la force, le déplacement, le temps et le métabolisme énergétique sont transmis via des afférences somatosensibles à un centre régulateur dans le cerveau. Fondé sur l'expérience passée et l'anticipation de la tâche à accomplir, ce système central serait capable d'intégrer différents signaux afférents en provenance des muscles et de

nombreux organes (par l'intermédiaire notamment des voies métaboliques) de sorte à modifier l'intensité d'exercice consentie et optimiser la performance (Ulmer 1996). Noakes et al. ont depuis étendu la théorie d'Ulmer en suggérant que le recrutement neuromusculaire assuré par le système nerveux central est contrôlé par des récepteurs localisés dans le cœur, le cerveau et tout au long du trajet neuromusculaire, afin de protéger les organes vitaux de la survenue de dommages graves et irréversibles (Hampson et al. 2001). D'après Noakes et al. (2004b), l'absence de défaillance physiologique grave à la fin d'un exercice physique mené à épuisement constitue la preuve la plus flagrante du fait que la performance physique (et la fatigue) est toujours régulée de manière ultime par le cerveau, selon un système dynamique complexe, dont la fonction ultime est d'assurer la préservation de l'intégrité physique de l'athlète dans toutes les conditions d'exercice.

Un autre argument avancé par les concepteurs du modèle du Gouverneur Central concerne le niveau de recrutement des unités motrices à l'exercice. D'après Noakes et al. (2004b), les facteurs périphériques ne peuvent pas être les responsables ultimes de la fatigue liée à l'exercice si une partie des unités motrices des muscles actifs reste inactivée au moment de l'arrêt de l'exercice. Dans les activités sportives prolongées, il apparaît ainsi que seules ~30% des unités motrices sont recrutées au moment de l'arrêt de l'exercice chez des athlètes amateurs (Kay et al. 2001; St Clair Gibson et al. 2001b). Bien que les sportifs de haut niveau sont susceptibles d'atteindre des niveaux de recrutement supérieur, il semble improbable que ce niveau de d'activation dépasse 50% chez ceux-ci (Noakes et al. 2004b). Dans ce cadre se pose donc une question logique : pourquoi le cerveau ne recrute-t-il pas d'unités motrices additionnelles dans de telles circonstances de sorte à assurer la poursuite de l'exercice ? L'hypothèse avancée par le modèle du Gouverneur central est que la commande centrale demeure sous-maximale car le recrutement additionnel de fibres musculaires pourrait mettre en danger l'homéostasie de l'organisme et engendrer des dommages physiologiques graves et irréversibles. Ce modèle prévoit que l'augmentation de la difficulté d'effort perçue réduirait progressivement le désir conscient de l'athlète de vouloir dépasser ce processus de contrôle, de sorte que ce mécanisme de protection prévaudrait toujours de manière ultime et assurerait la protection de l'organisme jusqu'à la fin de tout type d'exercice (Noakes 2008a).

Il apparaît par ailleurs que les modèles linéaires qui associent directement la fatigue à des perturbations physiologiques (comme l'atteinte d'une température-critique, la diminution de l'activité centrale, la baisse de l'excitabilité musculaire, les disruptions de l'architecture musculaire ou la déplétion des réserves glycogéniques) ne sont pas capables d'expliquer de manière satisfaisante la manière dont les athlètes gèrent leur effort durant la plupart des épreuves sportives (Noakes et St Clair Gibson 2004). Plusieurs études ont notamment mis en exergue que le travail produit par un sportif est significativement augmenté à l'approche de la ligne d'arrivée (*endspurt*

phenomenon) (Hausswirth et al. 2010; Le Meur et al. in press; Tucker et al. 2006a). Tucker et al. (2009) ont montré que lors des courses au record du monde du 5- et du 10-km, le dernier kilomètre est couru plus vite que les précédents. Clairement, ce type de comportement ne peut pas être expliqué seul par un modèle linéaire de la fatigue où celle-ci serait associée de manière ultime à une défaillance physiologique effective. Il s'agit pourtant là d'un aspect central dans la compréhension de la fatigue associée à l'exercice, lorsque celle-ci est appréhendée dans les conditions écologiques de la pratique sportive. En effet, la manière dont un athlète expérimenté fait varier l'intensité d'exercice qu'il consent traduit la recherche d'un consensus permanent entre la stratégie qu'il adopte, la perception qu'il a des modifications physiologiques associées à ces variations d'allure et la recherche d'une performance maximale. Si la performance d'un sportif était uniquement dictée par la capacité de son organisme à maintenir l'homéostasie de l'organisme le plus longtemps possible ou à l'intensité la plus élevée possible, et que la fatigue était par exemple reliée directement au niveau d'accumulation de certains métabolites qui altèrent l'activité de certaines enzymes intervenant dans la resynthèse de l'ATP ou de la contraction musculaire, alors l'athlète ne pourrait révéler que des stratégies d'allure décroissante. En d'autres termes, alors que l'approche linéaire bioénergétique (Abbiss et Laursen 2005) prévoit que les limitations périphériques surviennent lorsque ces métabolites inhibiteurs sont à leur niveau le plus élevé, la réalité révèle un constat inverse puisque les plus hautes vitesses sont atteintes à l'approche de la ligne d'arrivée dans certaines épreuves de longue durée (Hausswirth et al. 2010; Le Meur et al. in press; Tucker et al. 2006a). Cette prédiction renvoie donc à l'inverse de la réalité, ce qui suggère que si l'accumulation des métabolites influence effectivement l'apparition de la fatigue et donc par ricochet la stratégie d'allure adoptée par un athlète, ce processus est indirect et emprunte des afférences sensitives qui modifie la commande centrale (Tucker et Noakes 2009). Autrement dit, le modèle du Gouverneur Central n'exclue pas que l'accumulation de certains métabolites puisse perturber directement la fonction neuromusculaire mais propose que l'intensité d'exercice produite est toujours contrôlée *in fine* au niveau central. Les perturbations homéostatiques sévères engendrées par l'exercice seraient ainsi perçues par le Gouverneur Central, qui modifierait la commande envoyée aux muscles actifs de sorte à ce que l'exercice puisse être mené à son terme, soit en recrutant un plus grand nombre d'unités motrices pour maintenir le travail produit, soit en diminuant le recrutement musculaire pour prévenir que ces perturbations ne deviennent trop sévères (Tucker 2009). Toutefois, étant donné que le recrutement des unités motrices n'atteint jamais 100%, Noakes et al. (2004b) avancent que la régulation centrale du niveau de performance prévaut toujours, quand bien même il est possible d'observer les preuves d'une fatigue d'origine périphérique (Millet et al. 2002c; Millet et al. 2003a; Millet et al. 2003b; Millet et al. 2003c; Nummela et al. 1992; Nummela et al. 2008). Dans cette perspective, St Clair Gibson et al. (2003) proposent que la fatigue aigue liée à l'exercice est une perception centrale, une sensation,

une émotion et non directement une défaillance physique. L'atteinte d'un état d'épuisement serait ainsi toujours reliée à une stratégie régulée qui est continuellement réajustée de manière dynamique, de sorte à assurer l'atteinte de la meilleure performance possible, au regard du niveau de motivation de l'athlète, sans pour autant mettre en danger l'intégrité physique de l'athlète.

5.2.2. CRITIQUES DU MODELE DU GOUVERNEUR CENTRAL

Quand bien même le modèle du Gouverneur Central semble pouvoir apporter des hypothèses satisfaisantes pour expliquer certains phénomènes liés à la performance humaine, comme les stratégies d'allure, celui-ci demeure actuellement encore largement débattu (Brink-Elfegoun et al. 2007; Marcra 2008; Shephard 2009a, b; Weir et al. 2006). Le principal fondement des critiques adressés à ce modèle renvoie à l'absence de preuves concernant certains de ses corollaires.

5.2.2.1. SUR LE MAINTIEN DE L'HOMEOSTASIE A L'EXERCICE

D'après le modèle du Gouverneur Central, le recrutement musculaire à l'exercice serait toujours régulé de sorte maintenir l'homéostasie de l'organisme (Noakes et al. 2004b). De la sorte, le cerveau, le cœur, les muscles squelettiques et les autres organes mis en jeu par l'activité physique seraient toujours continuellement protégés contre la survenue de problèmes d'ischémie ou d'hyperthermie, et les poumons contre l'apparition d'un éventuel œdème (Hampson et al. 2001; Marino 2004; Noakes 2000; Noakes et al. 2001).

Pourtant, si un tel système de téléo-anticipation existait, Shepard (2009) estime que celui-ci n'aurait qu'une efficacité limité, étant donné que l'on constate parfois des décès par hyperthermie liée à l'exercice chez des sujets pratiquant une activité physique dans une ambiance thermique chaude, comme des joueurs de football américain (Luke et al. 2007) ou chez des coureurs de longue durée (Pugh et al. 1967). La température rectale de certains athlètes engagés dans des activités prolongées en ambiance chaude peut atteindre 42°C (alors que la plupart des comités d'éthique recommandent qu'elle ne dépasse pas 39,5°C), et la mort de 21 joueurs de football américains a été attribuée à un coup de chaleur entre 1995 et 2001 (Mueller et Cantu 2004). Même s'il reconnaît que ces cas tragiques ne concernent que quelques sujets sur les millions de pratiquants d'une activité physique en ambiance chaude, Shepard (2009) suggère que d'après ces données, il n'existe pas de mécanismes de protection contre l'atteinte d'un état d'hyperthermie à l'exercice.

Le modèle du Gouverneur Central prévoit par ailleurs qu'il existe un système de protection de l'individu contre l'atteinte d'un état d'ischémie du myocarde à l'exercice (Noakes et al. 2004b). Pourtant, un exercice de haute intensité accroît 50 fois le risque de survenue d'un accident cardiaque

(Mueller et Cantu 2004). Probablement la plupart des personnes qui succombent dans ce genre de circonstances souffrent d'athérosclérose. Toutefois, même chez les jeunes adultes, la participation à des épreuves d'endurance et d'ultra-endurance engendrent l'apparition de symptômes qui témoignent de la survenue de dommages myocardiques, comme le révèle l'augmentation du taux de troponine myocardique dans le milieu circulant et la dépression de la fonction cardiaque après ce type d'épreuves (Neilan et al. 2006a; Neilan et al. 2006b). Un phénomène de fibrose myocardique est aussi susceptible de survenir dans le cadre de la réalisation répétée de ce type d'épreuves (Whyte 2008). Enfin, les épisodes d'ischémie myocardique engendrés par l'exercice sévère sont très courants chez le sujet âgé (Shephard 1981). Envisagés collectivement, ces donnés suggèrent pour Shepard (2009) qu'il n'existe pas de Gouverneur Central, dont la fonction serait de protéger le cœur de l'apparition d'un état d'ischémie à l'exercice.

De la même manière, la protection des muscles squelettiques à l'exercice apparaît discutable, comme en attestent les importants dommages engendrés par le travail excentrique et les exercices de longue durée (Clarkson 2007). Environ la moitié des ultramarathoniens révèlent ainsi des taux élevés de myoglobine à l'issue de leurs courses (Schiff et al. 1978), ce qui mène parfois à une défaillance du système rénal, comme en attestent l'occurrence de 19 cas de cette pathologie entre 1969 et 1986 lors du Marathon des Comrades (Seedat et al. 1989). Plusieurs revues de littérature ont d'ailleurs souligné les risques potentiels de perturbation des fonctions cérébrale, cardiaque et musculaire après un marathon (Cheung et Sleivert 2004; Gonzalez-Alonso 2007).

Shephard (2009) souligne enfin qu'il n'existe pas de preuves pour démontrer qu'il existe un mécanisme de protection contre l'hypertension pulmonaire à l'exercice. A l'inverse, Zavorsky (2007) a même mis en évidence que sur 137 cas analysés dans la littérature, environ 65% des sujets révélaient un œdème pulmonaire à l'issue d'un exercice maximal prolongé.

L'ensemble de ces résultats démontre que l'exercice physique accroît fortement les contraintes imposés à l'organisme et engendre la perturbation de nombreuses fonctions physiologiques. Si les cas de décès à l'issue d'un exercice maximal demeurent très rares et suggèrent l'existence potentielle de mécanismes de protection de l'organisme lors de l'exercice physique, de nombreuses hypothèses autres que celle fondée sur le Gouverneur Central sont susceptibles d'être avancées (Shephard 2009). Ainsi, Hopkins (2009) a récemment suggéré que la diminution des réserves en adénosine triphosphate (ATP) à l'exercice limite inévitablement à la fois l'activité des muscles squelettiques actifs et l'activité du cœur alors que la fatigue apparaît, tandis que l'apparition d'un œdème pulmonaire à l'exercice affecte négativement la conductance de l'oxygène à l'étage pulmonaire. Ces altérations suffiraient, d'après Hopkins, à réduire progressivement la capacité de travail de l'individu à l'exercice.

De notre point de vue, si ces différentes données montrent qu'il existe différentes hypothèses explicatives de la fatigue à l'exercice, elles n'empêchent en rien l'existence d'un Gouverneur Central. Si le premier corollaire du modèle du Gouverneur Central est que l'intensité d'exercice est toujours régulée de sorte à prévenir la survenue de défaillances physiologiques graves à l'exercice, cela n'interdit en rien qu'il existe des altérations transitoires de certaines fonctions physiologiques à l'exercice, mais uniquement que celles-ci atteignent un niveau critique qui augmenterait considérablement les risques de décès de l'athlète à court terme. Dans cette perspective, la rareté des décès engendrés par une défaillance physiologique irréversible provoquée par l'exercice physique ne permet d'exclure l'existence possible d'un mécanisme central de protection qui limiterait le recrutement musculaire, de sorte à toujours préserver *in fine* les fonctions vitales de l'athlète.

5.2.2.2. SUR L'ATTEINTE D'UNE VALEUR MAXIMALE DU DEBIT CARDIAQUE ET DE LA CONSOMMATION D'OXYGENE

D'après Noakes et Marino (2009), le débit cardiaque maximal atteint à l'exercice serait limité par le Gouverneur Central « par anticipation », de sorte à prévenir un état d'ischémie cardiaque, qui pourrait engendrer une défaillance grave de la fonction cardiaque. Selon cette hypothèse, cette limitation du débit cardiaque par « un mécanisme de rétroaction complexe » expliquerait que la consommation d'oxygène atteinte à la fin d'un exercice incrémenté mené à épuisement démontre un plafonnement, sans que le cœur ne soit pour autant mené à ses limites fonctionnelles absolues (Noakes et Marino 2009).

Pour Shephard (2009), il existe toutefois de nombreuses preuves empiriques du fait qu'il existe un phénomène d'ischémie au niveau cardiaque lors de la réalisation d'un exercice maximal. Chez le jeune adulte, celui-ci se manifeste par de légères modifications de l'électrocardiogramme et par l'augmentation du taux de troponine myocardique dans le milieu circulant (Shephard 1981). Chez les sujets adultes et âgés, de plus importantes modifications de l'électrocardiogramme sont même visibles, ce qui renforce là encore les présomptions concernant la survenue d'un phénomène d'ischémie cardiaque à l'exercice maximal (Shephard 2009). Pour Shephard (2009), la baisse progressive de la fréquence cardiaque maximale constatée lors du vieillissement (Shephard 1997) et lors de l'exposition à un environnement hypoxique (Pugh 1962) renforcerait aussi cette hypothèse.

De notre point de vue, si ces arguments suggèrent qu'un phénomène d'ischémie cardiaque est possible à l'exercice maximal, ils n'interdisent toutefois pas l'existence d'un contrôle central de la valeur du débit cardiaque destiné à prévenir la survenue d'un état ischémique plus sévère, qui mènerait au décès. Quand bien même le débit cardiaque et la consommation d'oxygène atteignent

leurs valeurs maximales lors d'un test maximal incrémenté avant l'arrêt d'exercice, alors que le recrutement musculaire continue d'augmenter, rien n'empêche l'existence d'une limitation centrale de l'activité cardiaque par anticipation, étant donné que les voies nerveuses de recrutement cardiaque et musculaire sont distinctes.

5.2.2.3. SUR LE MAINTIEN D'UN RECRUTEMENT MUSCULAIRE TOUJOURS SOUS-MAXIMAL A L'EXERCICE

L'un des corollaires du modèle du Gouverneur Central est que le recrutement musculaire reste toujours sous-maximal (*i.e.* <100%) à la fin d'une épreuve maximale, de sorte à ce que les contraintes imposées aux différentes fonctions physiologiques de l'organisme à l'exercice n'atteignent pas un niveau, qui engendrerait une défaillance irréversible de l'une d'entre elle (Noakes 2004; St Clair Gibson et al. 2001b). Une étude récente a renforcé cette hypothèse en montrant que des cyclistes réalisant une épreuve contre-la-montre menée à épuisement étaient capables de largement dépasser la puissance de pédalage maintenue à l'issue de celle-ci lors d'un test maximal de 6s réalisé immédiatement à la fin de l'épreuve contre-la-montre (Marcora et Staiano 2010). Ceci suggère que la puissance de pédalage était abaissée par les sujets à la fin de leur épreuve contre-la-montre, alors qu'ils disposaient encore d'une « réserve » en termes de recrutement musculaire (Marcora et Staiano 2010).

Si Shephard (2009) critique ce corolaire du modèle du Gouverneur Central en soulignant qu'un phénomène de fatigue neuromusculaire peut permettre d'expliquer l'arrêt de l'exercice lors d'une épreuve mené à l'épuisement, il n'explique cependant pas pourquoi le recrutement musculaire demeure sous-maximal à l'arrêt de l'exercice. Là encore, aucun argument tangible ne permet, de notre point de vue, d'affirmer qu'il est « temps d'abandonner le modèle du Gouverneur Central » (Shephard 2009), quand bien même de nombreux corollaires de celui-ci demandent encore à être démontrés (Marino 2010).

5.2.2.4. SUR L'APPLICATION DU GOUVERNEUR CENTRAL AUX EXERCICES DE COURTE DUREE

Alors que des augmentations de la vitesse de course sont couramment observées dans les activités de longue durée, aussi bien les études descriptives que celles manipulant la stratégie d'allure révèlent que ce genre de stratégie ne peut s'appliquer lors des épreuves de courte durée (*i.e.* ≤2min). Les analyses révèlent en effet une réduction progressive systématique de la vitesse et de la puissance développée lors de ce type d'épreuves (Bishop et al. 2002; Foster et al. 1993; Thompson et al. 2004). Ceci suggère que l'intensité d'exercice consentie n'y est pas régulée (et donc que le modèle

du Gouverneur Central ne s'y applique pas) (Weir et al. 2006), mais que l'évolution de celle-ci est le résultat d'une baisse progressive de la capacité musculaire à produire de la force (Taylor et al. 1997).

Toutefois, quand bien même certaines recherches ont démontré une réduction de la contractilité musculaire à l'issue de ce type d'épreuves (Nummela et al. 1992), d'autres études ont toutefois parallèlement mis en évidence l'existence de processus d'anticipation au cours de ce type de tâche (Ansley et al. 2004; Wittekind et al. in press). Ainsi, il apparaît notamment que lorsqu'une épreuve maximale de courte durée est entreprise, la puissance de sortie initiale est plus faible que la puissance maximale que le sportif est capable de développer lors d'un effort consistant à développer une puissance maximale du début à la fin de l'épreuve (*i.e.* stratégie *all-out*) sans se préoccuper de l'influence ce type de stratégie sur la performance réalisée (Wittekind et al. in press). Ainsi, une forme de régulation de l'allure existe aussi lors de ce type d'épreuves, quand bien même une réduction progressive de l'intensité développée est constatée, sans qu'aucune accélération finale ne puisse être adoptée.

Par ailleurs, Foster et al. (2003) ont caractérisé l'évolution de la contribution des systèmes de fourniture de l'énergie lors d'épreuves cyclistes maximales d'une durée inférieure à 2 minutes et ont montré que les ressources énergétiques sont utilisées de sorte à rendre possible la contribution des voies de resynthèse anaérobie tout au long de l'épreuve considérée. Ceci suggère là encore que les changements qui occurrent au niveau intracellulaire, comme l'accumulation des métabolites (Allen et al. 2008) ou la déplétion des stocks de phosphagènes sont continuellement évalués de sorte à prévenir l'atteinte de niveaux critiques, à l'image des phénomènes d'anticipation-feedbacks déjà décrits lors des activités de longue durée.

Une autre évidence en faveur de l'application du modèle du Gouverneur Central aux activités de courte durée a été apportée par Ansley et al. (2004). Ces auteurs ont mis en exergue que la performance lors d'un exercice supramaximal n'est dégradée qu'à partir du moment où la durée d'effort réelle dépasse la durée d'effort annoncée (36s effectives contre 30s annoncées). Ce résultat suggère que l'allocation adéquate des ressources physiologiques est essentielle y compris lors d'épreuves de très courte durée et que la réduction de la puissance développée lors des 30 premières secondes est associée à cette allocation subconsciente, puisqu'une baisse plus importante de la puissance développée est constatée (3^{ème} essai) une fois que la stratégie d'allure initiale a été associée à un « échec » (2^{ème} essai).

Envisagés collectivement, ces résultats suggèrent que l'intensité d'effort consenti est toujours contrôlée par le système nerveux central, y compris lors d'épreuves maximales de courte intensité, comme le propose le modèle du Gouverneur Central. Quand bien même les hauts niveaux d'intensité

consentis lors de ce type d'épreuves engendrent une diminution de la contractilité musculaire, l'existence d'une planification de l'effort montre qu'il existe néanmoins une balance gérée par le système nerveux central entre les perturbations de l'homéostasie engendrées par ce type d'effort et la recherche d'une performance optimale. Dans cette perspective, si la stratégie d'allure adoptée par un athlète est un marqueur de la régulation complexe des systèmes physiologiques sollicités par l'exercice et la performance atteinte, alors la stratégie d'allure optimale identifiée n'implique pas pour autant des perturbations physiologiques minimes, étant donné que l'adoption d'un départ plus lent lors d'une épreuve de courte durée (en vue d'une stratégie équilibrée) engendrerait une performance sous-optimale. De manière ultime, il demeure néanmoins que le maintien de l'homéostasie constitue toujours la priorité du système nerveux central, quelles que soient les caractéristiques de l'exercice à réaliser.

5.2.2.5. AVONS-NOUS REELLEMENT BESOIN D'UN GOUVERNEUR CENTRAL POUR EXPLIQUER LA REGULATION CENTRALE DE LA PERFORMANCE A L'EXERCICE ?

Récemment, le Dr. S. Marcora a débattu de l'existence du Gouverneur Central dans une lettre adressée à T. Noakes et ses collègues dans l'*European Journal of Applied Physiology* (Marcora 2008). Si cet auteur postule que l'arrêt de l'exercice (lors d'un exercice temps-limite) et les variations de l'intensité (lors d'une épreuve librement gérée) sont toujours régulés par le cerveau, ce système de régulation ne nécessite pas l'existence d'un Gouverneur Central. Selon Marcora (2008), la performance lors d'un exercice à intensité imposée est fixée par la cinétique de la difficulté d'effort perçue qui est elle-même reliée à l'obligation pour le sujet d'augmenter progressivement son recrutement musculaire (afin de compenser la baisse de la contractilité des muscles actifs), sa fréquence cardiaque (pour assurer les mécanismes de thermolyse) et son débit expiratoire en réponse à la baisse du pH sanguin et l'augmentation de la production de CO₂ par les muscles actifs. Le modèle de l'intensité motivationnelle de Brehm (Wright 1996) prévoit donc lui aussi que l'arrêt de l'exercice survient lorsque le sujet atteint la difficulté d'effort perçue maximale qu'il est prêt à soutenir au regard du niveau de motivation qu'il associe à la tâche qu'il doit réaliser. Pour Noakes et Tucker (2008), ce modèle ne permet toutefois pas d'expliquer la manière dont évolue la difficulté d'effort perçue en fonction de l'ambiance thermique, dans laquelle l'exercice est réalisé (Crewe et al. 2008; Tucker et al. 2006b).

Tucker et al. (2006) ont mis en évidence que lors d'une épreuve de pédalage réalisé à une difficulté d'effort perçue égale à 16, la baisse de la puissance de pédalage est plus importante lorsque l'exercice est réalisé en ambiance chaude par rapport à une situation contrôle en ambiance neutre. En réponse à une augmentation plus rapide du stockage de la chaleur en début d'exercice, les sujets

diminuent leur puissance de pédalage afin de prévenir l'atteinte d'une température corporelle critique et assurer une accumulation identique de la chaleur quelle que soit l'ambiance thermique d'exercice (Tucker et al. 2006b). Tucker et al. (2004) ont par ailleurs mis en évidence que lors d'une épreuve librement gérée réalisée dans différentes ambiances thermiques, la puissance de pédalage est modifiée très tôt lors de l'exercice, de sorte que les sujets terminent l'épreuve à une température corporelle identique et démontrent la même cinétique de difficulté d'effort perçue, indépendamment de la condition d'exercice. Les résultats de ces deux études montrent donc que pour un niveau de difficulté perçue donné, le recrutement musculaire peut être différent dès le début de l'exercice, et non uniquement lorsque le corps a atteint une température critique ou qu'un phénomène de fatigue périphérique apparaisse (Noakes et Tucker 2008). Pour Noakes et Tucker (2008), ces ajustements apparaissent trop précocement lors de l'exercice pour être déterminés par une diminution de l'excitabilité musculaire.

De notre point de vue, l'étude présentée par Baden et al. (2005) invalide par ailleurs l'hypothèse avancée par Marcora (2008), selon laquelle la difficulté d'effort perçue ne serait déterminée que par l'augmentation du recrutement musculaire imposée pour maintenir une intensité d'exercice donnée. Ces auteurs ont en effet montré que la méconnaissance de la durée d'exercice engendre l'atteinte de plus hautes valeurs de difficulté perçue pour une intensité donnée. Selon nous, l'ensemble de ces résultats suggère que l'intensité d'exercice lors d'une épreuve donnée est effectivement gérée par un système complexe « intelligent », qui intègre les afférences physiologiques, les feedbacks sur la distance à parcourir, l'expérience passée du sujet et son niveau motivation (Noakes et al. 2004b).

5.2.2.6. LOCALISATION DU GOUVERNEUR CENTRAL AU NIVEAU ANATOMIQUE

Finalement, il nous semble à l'heure actuelle que la plus grande limite du modèle du Gouverneur Central renvoie au Gouverneur Central lui-même. Aucune preuve tangible n'a en effet été apportée à ce jour pour situer la région cérébrale en charge de ce mécanisme de protection « par anticipation ». St Clair Gibson et al. (2003) suggèrent ainsi que la fatigue constitue davantage une sensation consciente plutôt qu'un phénomène uniquement physiologique. D'après ces auteurs, la sensation de fatigue représente la manifestation consciente des modifications de l'activité des systèmes centraux subconscients, qui contrôlent l'homéostasie de l'organisme et dont l'activité est directement influencée par les réponses physiologiques engendrées par l'exercice (St Clair Gibson et al. 2003). Ces modifications sont perçues par l'individu par l'intermédiaire des structures cérébrales en charge de la genèse de la sensation de fatigue. Dans ce modèle, la fatigue est décrite comme une émotion complexe, influencée par des facteurs psychologiques comme le niveau de motivation, l'expérience passée et d'autres émotions comme la haine ou la peur. Il demeure néanmoins difficile d'identifier

aujourd’hui si l’origine de la sensation de fatigue est déterminée par des structures spécifiques du cerveau, où si celle-ci émerge d’une synchronisation de l’activité électrophysiologique globale du cerveau.

De notre point de vue, si aucun argument décisif ne permet aujourd’hui d’affirmer qu’il faut abandonner le modèle du Gouverneur Central, les preuves de l’existence de celui-ci demeurent donc indirectes. Des progrès technologiques décisifs permettant l’exploration fonctionnelle du cerveau à l’exercice sont donc encore nécessaires pour en démontrer les fondements.

HYPOTHESES DE TRAVAIL & OBJECTIFS DE LA RECHERCHE

L'ensemble des travaux évoqués dans la précédente revue de littérature identifie les stratégies d'allure comme facteur de la performance dans les activités cycliques de locomotion. Pour l'athlète, optimiser la distribution de son travail lors d'une épreuve sportive, c'est gérer les effets délétères de la fatigue engendrée par l'exercice au regard de ses caractéristiques intrinsèques, de la tâche à accomplir et du contexte d'expression de la performance. Pour l'entraîneur, analyser les variations d'allure c'est comprendre les exigences de la compétition à haut niveau et rendre cohérente la programmation de l'entraînement au regard de ces contraintes. Pour le scientifique enfin, interroger les stratégies d'allure, c'est questionner les origines de la fatigue liée à une pratique sportive, en respectant les conditions écologiques d'expression de ce phénomène complexe et multidimensionnel.

Notre travail expérimental reprend ces trois axes en prenant pour objet d'étude les stratégies d'allure adoptées dans le cadre d'une discipline Olympique de longue durée multivariée ; le triathlon. Les premiers travaux disponibles dans la littérature à ce sujet demandent en effet à être complétés, étant donné les multiples facteurs qui influencent le choix des stratégies d'allure en compétition d'une part (profil du circuit, température ambiante, adversaires, sexe, etc.) et ceux qui rendent le triathlon complexe d'autre part (enchaînement de trois modes de locomotion et influence du *drafting* principalement). Nous émettons l'hypothèse générale qu'une meilleure description et une meilleure compréhension des stratégies d'allure en triathlon à haut niveau permet de mieux comprendre les facteurs de la performance dans cette activité. Par ailleurs, nous souhaitons montrer que l'analyse des stratégies d'allure en triathlon oblige à intégrer une analyse multicentrique du phénomène de fatigue lié à la pratique de cette activité.

Notre première hypothèse est que les modalités d'exercice constantes mises en place dans la littérature pour comprendre les facteurs de la performance en triathlon distance Olympique, ne rendent pas compte des exigences de la compétition à haut niveau. Notre premier objectif sera donc de caractériser les variations d'allure en triathlon dans le contexte d'épreuves internationales. Pour ce faire, la première recherche décrit les puissances développées lors de la partie cycliste d'une épreuve de Coupe du Monde de triathlon disputée sur le parcours des Jeux Olympiques 2008. La seconde étude étend cette analyse des variations d'allure aux trois disciplines du triathlon et envisage l'influence du sexe sur celles-ci, étant donné que les épreuves internationales empruntent systématiquement les mêmes parcours pour les femmes et les hommes.

La seconde hypothèse de la partie expérimentale est d'identifier s'il est possible d'accroître le niveau de performance en triathlon distance Olympique par la modification des stratégies d'allure adoptées spontanément par les triathlètes élite. Dans cette perspective, la deuxième partie de ce travail

expérimental, fondée sur deux études, caractérise l'influence de différentes stratégies d'allure en course à pied sur la performance et la réponse physiologique en triathlon.

La troisième et dernière hypothèse concerne la compréhension des paramètres psychophysiologiques responsables des variations d'allure en course à pied en triathlon. Cette partie a pour objectif d'identifier quels paramètre(s) physiologique(s) est (sont) responsable(s) des changements d'allure en course à pied en triathlon, de sorte à mieux comprendre les facteurs de performance dans cette discipline.

MATERIELS ET OUTILS UTILISES LORS DES TRAVAUX EXPERIMENTAUX

1. RECUEIL DES VARIABLES CINEMATIQUES ET BIOMECANIQUES

1.1. MESURE DE LA VITESSE EN NATATION (ETUDE 2)

Lors de la compétition de l'étude n°2, la vitesse en natation a été mesurée pour l'ensemble des concurrents grâce à 3 caméras (Sony HDR-CX12 AVHD) synchronisées avec le système de chronométrage officiel de la course. La fréquence d'échantillonnage était de 25Hz. Ces trois caméras ont été réparties géographiquement autour du parcours et la distance entre chacune d'entre elles a été mesurée avec un système de positionnement satellite d'une précision de 2-3m (Garmin GPSRAP 60 Csx, Garmin Europe, Royaume Uni). Les vitesses de déplacement ont ensuite été calculées grâce à une analyse vidéographique (Dartfish, Fribourg, Suisse).

1.2. MESURES DE LA VITESSE, DE LA CADENCE ET DE LA PUISSANCE DE PEDALAGE EN CYCLISME (ETUDES 1,2 ET 5)

1.2.1. EN LABORATOIRE

Les tests incrémentés des études n°1 et n°2 ont été réalisés sur un ergocycle à frein électromagnétique SRM (Schöberer Rad Meßtechnik, Jülich, Allemagne). Cet ergocycle dispose d'un cintre et d'une selle totalement ajustables dans les deux dimensions du plan sagittal afin de permettre à chaque sujet de retrouver la position qu'il utilise sur son propre vélo. Il permet également de monter des pédales automatiques afin de permettre au cycliste d'utiliser ses propres chaussures.

Cet ergocycle permet de mesurer la puissance développée par le sujet à partir de jauge de contraintes qui enregistrent les déformations au niveau de bandes situées sur le pédalier. L'ergomètre SRM utilisé dans le cadre de ces expérimentations était un modèle constitué de 20 jauge de contraintes validé par Balmer et al. (2000). Les bandes de jauge de contrainte sont fixées entre les 4 bras d'aluminium du pédalier. Le signal enregistré par ces bandes varie en fonction de la contrainte appliquée sur les bras d'aluminium et est converti en fréquence-voltage par les éléments électroniques du pédalier. Cette fréquence, proportionnelle aux forces résultantes appliquées sur les manivelles et à la cadence de pédalage, est transmise par induction (sans friction) à une fréquence d'échantillonnage de 500kHz au capteur fixé dans le boîtier de pédalier. La puissance de pédalage est obtenue à partie de l'équation suivante :

$$\text{Puissance (W)} = \text{Moment de Force (N.m)} \times \text{Vitesse angulaire (rad.s}^{-1}\text{)}$$

Lors de ces études, l'ergocycle SRM a été utilisé à partir du mode hyperbolique, qui permettait aux sujets de choisir leur cadence de pédalage pour une puissance de sortie constante au cours de l'exercice.

1.2.2. EN COMPETITION

Lors des compétitions analysées dans les études n°1 et n°2, le recueil des valeurs de vitesse, de cadence et de puissance de pédalage a été réalisé grâce à un système SRM mobile (SRM Professionnel version route, SRM Training System, Schoberer Rad Messtechnik, Jülich Allemagne) monté sur le vélo de chaque triathlète. Ce système d'un poids de 300g est comparable à un pédalier classique et n'altère pas la performance. Chaque système a été calibré avant la course de manière statique (Gardner et al. 2004). Les données étaient collectées à une fréquence de 1Hz. Après la course, les données étaient transférées à un ordinateur pour être analysées.

1.3. MESURE DE LA VITESSE EN COURSE A PIED (ETUDES 2, 3, 4 ET 5) ET VALIDATION DU SYSTEME POLAR RS800SD®

1.3.1. EN LABORATOIRE

Les épreuves de course à pied incrémentée menées durant les études n°2 et n°5 et celles de l'étude 5 se sont déroulées sur un tapis roulant motorisé (Gymroll, Andrézieux-bouthéon, Roche La Molière, France). Celui-ci était couplé à un système comprenant une cellule photoélectrique captant le passage de 250 bandelettes d'aluminium placées à intervalles réguliers sur la bande de roulement du tapis, permettant de mesurer les variations de vitesse du tapis avec une précision de $0,1\text{km.h}^{-1}$.

1.3.2. EN COMPETITION

Lors des Championnats d'Europe de Triathlon 2009 (étude n°4), la vitesse en course à pied a été mesurée de la même manière qu'était déterminée en natation lors de l'étude n°2.

Lors de l'épreuve de la compétition de l'étude n°2, la vitesse était mesurée en continu pour 9 triathlètes grâce au système Polar RS800sd, que nous avions validé préalablement (Hausswirth C, Le Meur Y, Couturier A, Bernard T, Brisswalter J (2009). Accuracy and repeatability of the Polar® RS800sd to evaluate stride rate and running speed. *Int J of Sports Med* 30 : 354-59). Ce système est composé d'une montre et d'un accéléromètre miniaturisé (3,5 x 5,0 x 0,7 cm, 20g) à disposer sur les lacets de la chaussure de course.

1.4. MESURE DES TEMPS DE CONTACT ET DE VOL EN COURSE A PIED (ETUDE 5)

Les paramètres cinématiques de la foulée (fréquence, amplitude, temps de contact, temps de vol) étaient mesurés dans l'étude n°5 grâce à deux capteurs sensibles à la pression (1,5 x 1,5 x 0,02cm ; Interlink Electronics, Camarillo, Etats-Unis) placés sous la semelle intérieure de la chaussure droite de chaque triathlète, au niveau du premier métatarsal et du talon selon les recommandations de Morin et al. (2005). Ceux-ci étaient connectés à un enregistreur portable (ME6000, Mega Electronics Ltd, Kuopio, Finlande) permettant l'acquisition des données à une fréquence de 1000Hz.

2. RECUEIL DES VARIABLES METABOLIQUES

2.1. RECUEIL DES ECHANGES GAZEUX ET RESPIRATOIRES (ETUDES 1, 2, 3 ET 5)

Lors des études n°1, n°2, n°3 et n°5, l'ensemble des variables métaboliques était recueilli grâce à un système K4b² (Cosmed, Rome, Italie). Cet appareil était porté par les triathlètes au moyen d'un harnais fixé sur le tronc et alimenté par une batterie rechargeable (Ni-MH).

Le K4b² comprend deux unités et un masque placé contre le visage du sujet. Une unité portable de 800g mesure les différents paramètres ventilatoires et gazeux et une unité réceptrice traite et enregistre par télémétrie les signaux recueillis par l'unité portable. Ce système permet de mesurer le débit ventilatoire (\dot{V}_E , exprimé en $L \cdot min^{-1}$) et la fréquence respiratoire (FR, exprimée en $cycles \cdot min^{-1}$) grâce à un débitmètre comprenant une turbine digitale bidirectionnelle de 28mm de diamètre. La vitesse de rotation de la turbine (exprimée en $tours \cdot min^{-1}$), détectée par un système opto-électronique, est proportionnelle à la quantité d'air qui la traverse. Le débitmètre est calibré avant chaque utilisation à partir d'une seringue de 3litres. L'air expiré est véhiculé à travers un tube capillaire flexible (permapure) jusqu'à une microchambre dynamique de prélèvement et de mélange des gaz (située à l'intérieur de l'unité portable). Les concentrations en oxygène (O_2) et en dioxyde de carbone (CO_2) sont alors mesurées à des intervalles de temps réguliers. La fraction d'oxygène contenue dans l'air expiré (F_eO_2) est mesurée par une sonde polarographique tandis qu'une sonde infrarouge permet d'analyser la fraction de gaz carbonique (F_eCO_2). Les analyseurs d' O_2 et de CO_2 sont également calibrés avant chaque expérimentation en fonction de la concentration en O_2 et en CO_2 de l'air ambiant (respectivement 20,93 % et 0,03 %) et d'un gaz étalon (respectivement 5 % et 15%). Les valeurs de fractions inspirées d' O_2 et de CO_2 (FIO_2 et $FICO_2$ respectivement) sont ainsi connues.

2.2. MESURE DE LA FREQUENCE CARDIAQUE (ETUDES 1, 3 ET 5)

La fréquence cardiaque (FC, exprimée en battements par minute) a été enregistrée par des cardiofréquencemètres Polar Team System (Kempele, Finlande) et Polar RS800sd (Kempele, Finlande). Couplé à une ceinture émettrice située autour du torse des sujets, le système Polar RS800sd permettait d'obtenir des valeurs de FC moyennées toutes les 5s, tandis que la ceinture Team system enregistrait directement les données de FC sans nécessiter le port d'une montre. Pour les épreuves réalisées en laboratoire, cet enregistrement était systématiquement doublé par une mesure obtenue à partir de la sonde de FC du système d'analyse des échanges gazeux et respiratoires.

2.3. MESURE DE LA LACTATEMIE (ETUDES 4 ET 5)

Au cours des études n°3 et n°5, des prélèvements sanguins ont été effectués à partir du lobe de l'oreille des sujets, à différentes périodes de l'exercice. Une légère incision préalable était réalisée au lobe de l'oreille à l'aide d'une microlance afin de prélever par microponction une goutte de sang. Pour chaque prélèvement, 5 μ L de sang étaient déposés sur une bandelette et directement analysés par un appareil Lactate Pro (Arkray, Japon) validé par deux études préalables (Medbo et al. 2000; Pyne et al. 2000).

3. RECUEIL DES VARIABLES ELECTROMYOGRAPHIQUES (ETUDE 5)

Dans l'étude n°5, un système Biomonitor ME6000 (Megawin Electronics, Finlande) a été utilisé pour mesurer simultanément l'activité myoélectrique de 9 muscles à une fréquence d'échantillonnage de 1000Hz. La détection était réalisée par dérivation bipolaire à l'aide d'électrodes de surface auto-adhésives de 40mm de diamètre (Blue Sensor Q-00-S, Medicotest, Danemark), espacées centre à centre de 25mm. Ces électrodes contenaient une solution électrolytique en chlorure d'argent (Ag/AgCl).

Les lieux de pose des électrodes étaient préparés minutieusement (rasage, ponçage et dégraissage) afin de maintenir la résistance inter-électrode inférieure à 1000 Ω . Les électrodes étaient ensuite appliquées directement sur la peau dans l'axe longitudinal du muscle en suivant les recommandations de Rainoldi et al. (2004). Des câbles blindés et pré-amplifiés (CMRR = 100 dB ; Z entrée = 10 G ; gain = 600 ; Bande passante = 6 à 1600Hz) à proximité du site de détection assuraient le transfert du signal jusqu'au boîtier d'acquisition (DT 9800-series, Data Translation,

Marlboro, USA). La fréquence d'échantillonnage étant établie à 1000Hz, un filtre antialiasing de troisième ordre, passe bas de type Butterworth de fréquence de coupure à 500Hz était utilisé.

4. RECUEIL DES VARIABLES PERCEPTUELLES

Au cours de l'étude n°5, la difficulté d'effort perçue était évaluée à partir de l'échelle de cotation mise au point par Borg (1970) (Figure 23).

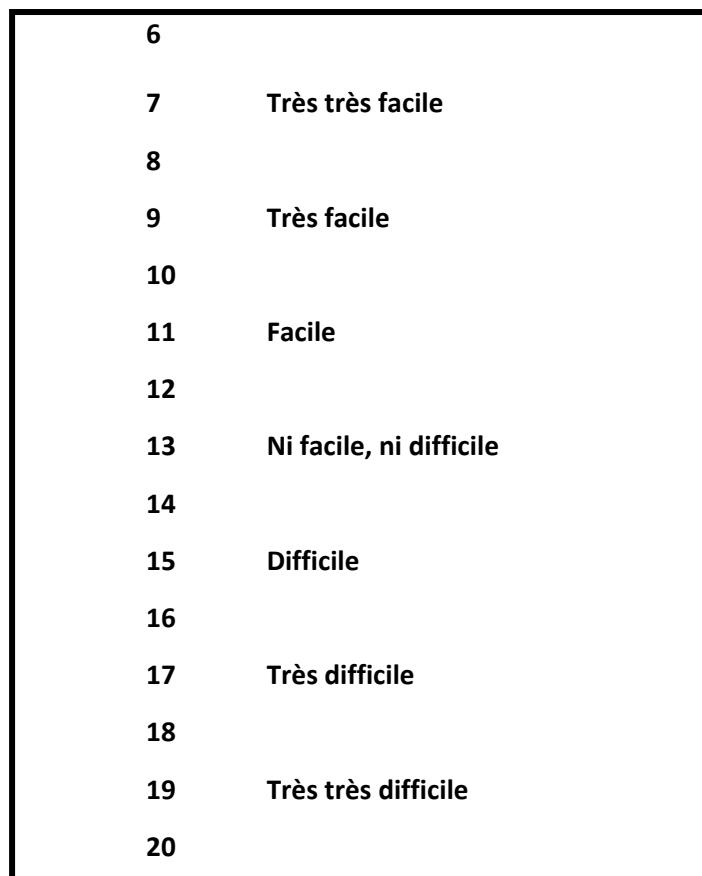


Figure 22. Echelle de difficulté de l'effort perçue. *D'après Borg (1970).*

PRESENTATION DES TRAVAUX EXPERIMENTAUX

1. ETUDE N°1 : DISTRIBUTION DE LA PUISSANCE DE PEDALAGE LORS DE LA PARTIE CYCLISTE D'UNE EPREUVE DE COUPE DU MONDE DE TRIATHLON (PUBLIEE DANS MEDICINE & SCIENCE IN SPORTS & EXERCISE, 2009, 41 :1296-1302)

RESUME

Objectif : Cette étude avait pour but de caractériser les puissances développées lors de la partie cycliste d'une épreuve de Coupe du Monde de triathlon (Pékin, 2007) disputée sur le parcours des Jeux Olympiques 2008. **Méthodes :** 10 triathlètes (5 hommes, 5 femmes) ont réalisé deux tests en laboratoire : un test incrémenté durant lequel ont été déterminés leurs puissances de pédalage et leurs valeurs de fréquence cardiaque associées aux seuils ventilatoires (P_{SV1} , P_{SV2}) et à $\dot{V}O_{2\max}$ (PMA); un test force-vitesse qui a permis de mesurer leur puissance maximale de pédalage (Pmax). Lors de la compétition, la puissance de pédalage et la fréquence cardiaque ont été mesurées en continu avec des outils portables. Les valeurs collectées ont permis d'identifier la distribution du temps passé dans 4 zones d'intensité (zone1, $<P_{SV1}$; zone 2, $]P_{SV1} - P_{SV2}]$; zone 3, $]P_{SV2} - PMA]$; zone 4, $\geq PMA$).

Résultats : Une diminution significative de la puissance, de la fréquence cardiaque a été constatée durant la course. La distribution du temps était $51 \pm 9\%$ en zone 1, $17 \pm 6\%$ en zone 2, $15 \pm 3\%$ en zone 3 et $17 \pm 6\%$ en zone 4. D'après les valeurs de FC, cette distribution était de $27 \pm 12\%$ en zone 1, $26 \pm 8\%$ en zone 2 et $48 \pm 14\%$ au-dessus de SV2. **Conclusion :** Cette étude a révélé une progressive baisse de la vitesse, de la puissance et la fréquence cardiaque couplée à une augmentation de la variabilité de ces paramètres lors de la compétition. Les résultats ont par ailleurs mis en évidence que l'épreuve cycliste d'une épreuve internationale de triathlon impose d'importantes sollicitations aérobies et anaérobies, ce qui la différencie du profil relativement constant déjà rapporté dans la littérature lors de compétitions longue distance. Par ailleurs, l'enregistrement de la puissance de pédalage est apparu comme un outil plus fiable pour caractériser les efforts cyclistes produits par les triathlètes.

1.1. BUT DE L'ETUDE

Lors des compétitions internationales de triathlon, les participants sont autorisés à adopter une position abritée derrière les autres concurrents. Cette stratégie est susceptible d'influencer significativement la stratégie d'allure adoptée par les triathlètes de haut niveau. Peu de résultats sont cependant disponibles dans la littérature, puisqu' hormis une étude menée lors d'un triathlon *Ironman* (Abbiss et al. 2006; Laursen et al. 2005), les seules données collectées en compétition sont issues de la Coupe du Monde distance Olympique de Sydney en 1997 (Smith et al. 1997). Caractériser les exigences physiologiques de la partie cycliste est pourtant susceptible d'assurer une meilleure compréhension des facteurs de la performance à haut niveau et de fournir des informations assurant une meilleure programmation de l'entraînement.

Récemment, plusieurs études ont décrit le profil de puissances développées lors de compétitions cyclistes sur route (Ebert et al. 2005; Vogt et al. 2006; Vogt et al. 2007a; Vogt et al. 2007b) ou d'épreuves *cross-country* (Stapelfeldt et al. 2004), grâce à l'emploi de capteurs de puissance portables et légers. En plus d'enregistrer la cadence et la puissance de pédalage, ces systèmes permettent de mesurer la vitesse et la fréquence cardiaque, autorisant de la sorte la caractérisation des exigences associées à la performance à haut niveau. Ces études ont révélé que les demandes associées à la compétition peuvent être caractérisées par la distribution du temps à l'intérieur des différentes zones d'intensité définies lors de tests en laboratoire. De plus, leurs auteurs ont mis en évidence des différences significatives entre les résultats obtenus en considérant la fréquence cardiaque ou la puissance de pédalage pour caractériser les exigences de la compétition.

Dans cette perspective, l'objectif de la présente étude était de déterminer les variations de puissance, de cadence, de vitesse et de fréquence cardiaque lors de la section cycliste d'une épreuve internationale de triathlon pour caractériser les exigences de cette activité au plus haut niveau.

1.2. METHODES

1.2.1. SUJETS

Dix triathlètes (5 femmes, 5 hommes) de l'équipe de France de triathlon ont participé à cette étude. Tous étaient engagés sur le circuit ITU et possédaient un classement mondial moyen égal à 30 au moment de l'expérimentation (compris entre 7 et 52). Tous ont donné leur consentement écrit pour participer à cette recherche, qui a été conduite dans le respect de la Déclaration d'Helsinki. La

moyenne (\pm écart-type, ET) pour l'âge, la taille et le poids des triathlètes participant était de $26,9 \pm 4,7$ ans, 174 ± 7 cm et $61,5 \pm 6,0$ kg, respectivement.

1.2.2. EVALUATIONS EN LABORATOIRE

Chaque sujet a réalisé deux tests en laboratoire durant les trois semaines qui ont précédé la compétition. Le premier était un test incrémenté mené à épuisement sur un ergocycle SRM tandis que le second consistait en un test force-vitesse sur le même ergomètre. Ces tests ont permis la détermination des seuils ventilatoires (P_{SV1} , P_{SV2}), de la puissance maximale aérobie (PMA), et de Pmax pour chaque triathlète.

1.2.2.1. TEST CYCLISTE TRIANGULAIRE DE DETERMINATION DE $\dot{V}O_{2\text{MAX}}$

Le test débutait à une puissance de 100W incrémentée de 30W toutes les deux minutes jusqu'à ce que le sujet ne puisse plus maintenir une cadence supérieure à 50 rotations par minute (rpm).

L'épreuve était considérée comme maximale lorsque deux des trois critères suivants étaient observés :

- un plafonnement de $\dot{V}O_2$ (*i.e.* une augmentation inférieure à $2,1 \text{ ml} \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$) malgré une augmentation de la vitesse ou une augmentation de la puissance;
- un quotient respiratoire supérieur à 1,1;
- une fréquence cardiaque (FC) supérieure à 90 % de la FC maximale théorique.

La PMA était définie comme la puissance du premier palier correspondant à l'atteinte de $\dot{V}O_{2\text{max}}$.

La détection des seuils était systématiquement réalisée de façon indépendante au minimum par deux expérimentateurs sans prise de connaissance du résultat final. Le premier seuil ventilatoire (SV1) était déterminé selon la méthode de Wasserman et al. (1973). Dans ce cadre, la valeur de SV1 correspondait à la rupture de pente de la cinétique de \dot{V}_E associée à celle de l' $\text{Eq}O_2$ sans augmentation concomitante d' $\text{Eq}CO_2$. Le deuxième seuil ventilatoire (SV2) correspondait à l'augmentation concomitante de l' $\text{Eq}O_2$ et de l' $\text{Eq}CO_2$ (Davis 1985).

1.2.2.2. DETERMINATION DE LA PUISSANCE MAXIMALE EN CYCLISME

Après 15min d'échauffement, les sujets devaient réaliser une performance maximale lors de deux sprints de 6s réalisés à 4min d'intervalle. Les sujets devaient demeurer assis et étaient vigoureusement encouragés à donner le meilleur d'eux-mêmes. La force totale effective (*i.e.* la force propulsive appliquée perpendiculairement à la manivelle) était déterminée par le ratio entre le

moment et la longueur constante de la manivelle. La force effective, la vitesse angulaire de la manivelle recalculée en termes de fréquence de pédalage, et la puissance de pédalage étaient moyennées sur la période de chaque coup de pédale. Après calcul, les données collectées lors des deux sprints maximaux étaient utilisées pour tracer la relation force-vitesse en utilisant une régression polynomiale du second degré. La puissance maximale (Pmax) était identifiée comme l'apex de la relation force-vitesse (Vandewalle et al. 1987).

1.2.3. EVALUATION LORS DE LA COMPETITION

Les données ont été collectées lors de l'épreuve de Coupe du Monde ITU de Pékin en 2006 (Chine, 24 septembre 2006), organisée trois semaines après les Championnats du Monde de triathlon. Le parcours de la course était exactement le même que celui programmé lors des Jeux Olympiques de Pékin 2008 et consistait à répéter six fois un tour vallonné de 6,9km (100m de dénivelé positif par tour), permettant de comparer les valeurs relevées lors des différents tours réalisés par les triathlètes ([Figure 1](#)).

De manière comparable à d'autres études menées sur le cyclisme (Ebert et al. 2005; Stapelfeldt et al. 2004; Vogt et al. 2006), le temps total cycliste a été distribué au sein de 4 zones d'intensité déterminées sur la base des résultats obtenus lors du test maximal incrémenté : en dessous de la puissance associée au 1^{er} seuil ventilatoire (zone 1), entre la puissance associée au 1^{er} seuil ventilatoire et celle associée au second seuil ventilatoire (zone 2), entre la puissance associée au 2nd seuil ventilatoire et la puissance maximale aérobie (zone 3) et au dessus de la puissance maximale aérobie (zone 4). Aussi, la zone 4 était divisée en deux parties (partie 1, entre PMA et 60% Pmax ; partie 2, au-dessus de 60% Pmax). Une analyse similaire utilisant la FC a aussi été menée : en-dessous de la fréquence cardiaque au 1^{er} seuil, entre les fréquences cardiaques associées au 1^{er} et au 2nd seuil ventilatoires, au-dessus de la fréquence cardiaque associée au second seuil ventilatoire. Les six tours du parcours cycliste ont été combinés deux à deux, de sorte que trois sections étaient analysées : section initiale (L1-L2), section médiane (L3-L4), section finale (L5-L6). Pour caractériser la cadence librement choisie par les triathlètes, les périodes de cadence nulle étaient exclues lors du calcul de la cadence de pédalage moyenne par tour. Par ailleurs, le braquet (distance parcourue par tour de manivelle, m) était calculé à partir des valeurs de vitesse et de cadence suivant l'équation suivante :

$$\text{Braquet} = \text{vitesse} \times \text{temps}^{-1} \times (\text{cadence} \times 60)^{-1}$$

1.3. ANALYSE STATISTIQUE

Des statistiques descriptives [moyenne, ET, coefficient de variation (CV), et d'intervalle (min-max)] pour la puissance de pédalage, la vitesse, la cadence, la FC et le braquet ont été calculées pour les six tours de la partie cycliste. L'effet de la période (L1-L2, L3-L4, L5-L6) a été analysé en utilisant une analyse de la variance à mesure répétée utilisant la puissance développée, la vitesse, la cadence et la FC comme variables indépendantes. Un test *post-hoc* de Newman-Keuls a été utilisé pour déterminer les différences significatives entre les sections. Pour toutes les analyses menées, le seuil de significativité était fixé à $p < 0,05$.

1.4. RESULTATS

1.4.1. VITESSE, CADENCE, PUISSANCE DE PEDALAGE ET FREQUENCE CARDIAQUE DURANT LA COMPETITION

Seuls 8 triathlètes ont terminé la course. Leurs caractéristiques sont présentées dans le [Tableau 1](#).

Paramètres	Femmes (moy ± ET)	Min Femmes	Max Femmes	Hommes (moy ± ET)	Min Hommes	Max Hommes
P_{SV1} (W)	186,7 ± 12,6	175	200	266,0 ± 18,5	235	280
P_{SV2} (W)	241,7 ± 14,4	225	250	336,0 ± 23,0	310	370
PMA (W)	296,3 ± 29,7	265	324	418 ± 26,8	400	460
PMA rel. (W.kg ⁻¹)	5,4 ± 0,3	5,0	5,6	6,3 ± 0,6	5,8	7,4
Pmax (W)	677 ± 125	542	788	943 ± 119	830	1120
Pmax rel. (W.kg ⁻¹)	123 ± 1,8	10,2	13,6	14,2 ± 2,0	12,0	16,5
$\dot{V}O_{2\max}$ (ml. min ⁻¹ .kg ⁻¹)	67,3 ± 0,7	66,9	68,1	69,8 ± 5,3	65,9	78,9
FC _{max} (bpm)	185,7 ± 13,1	172	198	180,8 ± 5,4	175	187
Poids de corps (kg)	55,0 ± 2,6	53	58	66,4 ± 3,2	62	69

Tableau 1. Caractéristiques physiologiques mesurées en laboratoire des triathlètes ayant terminé l'épreuve. FC_{max}, fréquence cardiaque maximale ; Pmax, puissance maximale ; PMA, puissance maximale aérobie ; P_{SV1}, puissance au premier seuil ventilatoire, P_{SV2}, puissance au second seuil ventilatoire ; PMA rel., puissance maximale aérobie exprimée par rapport au poids de corps ; Pmax rel., puissance maximale exprimée par rapport au poids de corps ; $\dot{V}O_{2\max}$, consommation maximale d'oxygène.

Un exemple d'évolution de la puissance de pédalage et de la fréquence cardiaque moyenne sur l'ensemble du parcours pour un triathlète masculin suivi lors de cette étude est présenté dans la [Figure 1](#).

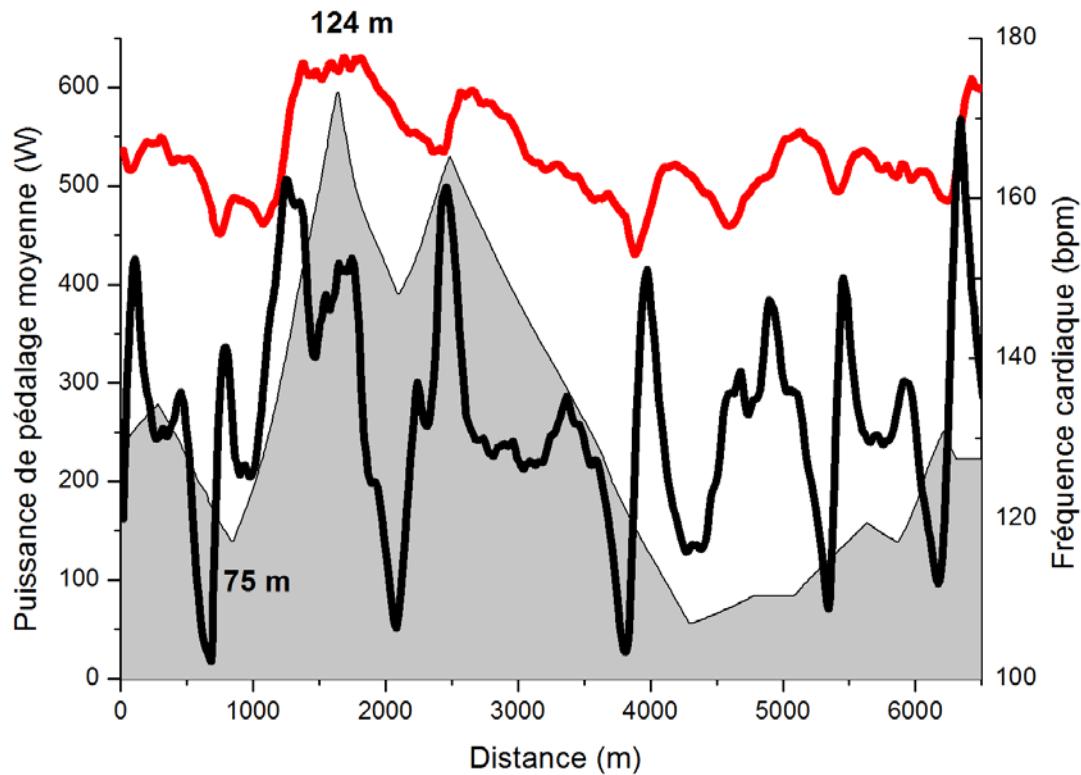


Figure 1. Profil du parcours et exemple d'évolution de la puissance de pédalage (ligne noire) et de la fréquence cardiaque (ligne rouge) chez un triathlète masculin lors d'un tour de la section cyclisme (tour de 6,9km, dénivelé positif global par tour de 100m ; lissage des courbes sur 5s).

Les triathlètes ont complété le parcours cycliste à puissance de sortie moyenne de $230 \pm 53\text{W}$ ($3,6 \pm 0,5\text{W}.\text{kg}^{-1}$, $60 \pm 8\%$ PMA), à une vitesse moyenne de $38 \pm 3\text{km}.\text{h}^{-1}$ en adoptant une cadence moyenne de 91 ± 5 rpm et un braquet de $6,4 \pm 0,4\text{m}$ par tour de manivelle. Leur FC moyenne était de $165 \pm 5\text{bpm}$ ($91 \pm 4\%$ FC_{max}). Une baisse significative des valeurs de puissance de sortie, de vitesse, de braquet de FC était observée durant la course ($p < 0,05$, [Tableau 2](#)). Entre la première (L1-L2) et la dernière section (L5-L6), la puissance de sortie, la vitesse le braquet et la FC ont baissé de 20,0%, 3,6%, 6,5% et 7,3%, respectivement. En revanche, la variabilité de la puissance de sortie et de la FC a significativement augmenté au cours de l'épreuve. Aucune variation significative n'a été constatée lors de la section cycliste pour les valeurs de cadence et de variabilité de vitesse, de cadence et de braquet.

	L1-L2	L3-L4	L5-L6
Puissance (%PMA)	$66,0 \pm 7,1$	$60,7 \pm 9,1$	$52,7 \pm 7,5^{\mu}$
CV Puissance (%PMA)	59 ± 7	$66 \pm 10^*$	$77 \pm 15^{\mu}$
Vitesse (km.h⁻¹)	$38,2 \pm 2,6$	$38,0 \pm 2,6$	$36,9 \pm 2,5^*$
CV Vitesse (%)	28 ± 2	27 ± 1	28 ± 2
Cadence (rpm)	$91,1 \pm 5,0$	$91,3 \pm 4,6$	$90,9 \pm 4,8$
CV Cad (%)	17 ± 7	16 ± 5	15 ± 3
Braquet (m par tour de manivelle)	$6,6 \pm 0,4$	$6,4 \pm 0,4^*$	$6,2 \pm 0,5^{\mu}$
CV Braquet (%)	19 ± 2	19 ± 2	20 ± 1
%FC_{max}	$94,0 \pm 2,6$	$90,6 \pm 4,1^*$	$87,2 \pm 5,7^{\mu}$
CV FC (%)	4 ± 1	$7 \pm 2^*$	$9 \pm 2^{\mu}$

Tableau 2. Pourcentage de la puissance maximale aérobie (%PMA), de la fréquence cardiaque (%FC_{max}), vitesse, cadence (Cad), braquet (m par tour de manivelle), et coefficients de variation respectifs (CV) sur chaque section (L1-L2, L3-L4, L5-L6). Moyenne \pm ET, $n = 8$. * Significativement différent de L1-L2, $^{\mu}$ Significativement différent de L3-L4.

1.4.2. PUISSANCE DE PEDALAGE ET FREQUENCE CARDIAQUE DURANT LA COMPETITION AU REGARD DES TESTS MAXIMAUX REALISES EN LABORATOIRE

La distribution moyenne du temps passé dans les différentes zones d'intensité (zones 1-4) était de $51 \pm 9\%$ pour la zone 1, $17 \pm 6\%$ pour la zone 2, $15 \pm 3\%$ pour la zone 3 et $17 \pm 6\%$ pour la zone 4. Dans la zone 1, une portion du temps correspondait à des intensités inférieures à 10% de PMA, c'est-à-dire à des périodes de temps lors desquelles les triathlètes étaient en roues libres en descente et/ou à l'intérieur du peloton. Concernant les valeurs de FC, les triathlètes ont passé $27 \pm 12\%$ en zone 1, $26 \pm 8\%$ en zone 2 et $48 \pm 14\%$ au-dessus de la valeur de FC associée à SV2 (zones 3-4). Les principales différences observées entre les périodes de temps étaient (Figure 2) : 1) durant L5-L6, une augmentation du temps écoulé dans la zone des faibles intensités ($p < 0,05$; en dessous de SV1), une diminution du temps passé dans les intensités moyennes (zone 2), hautes (<PMA), et très hautes (>PMA) ; 2) une baisse du temps passé entre PMA et 60% de Pmax de $14,1 \pm 5,9\%$ (L1-L2) à $9,4 \pm 2,8\%$ (L5-L6) et une diminution du temps passé au-dessus de 60% de Pmax entre L1-L2 et L5-L6 (de $5,5 \pm 4,3\%$ à $3,8 \pm 2,5\%$, $p < 0,05$).

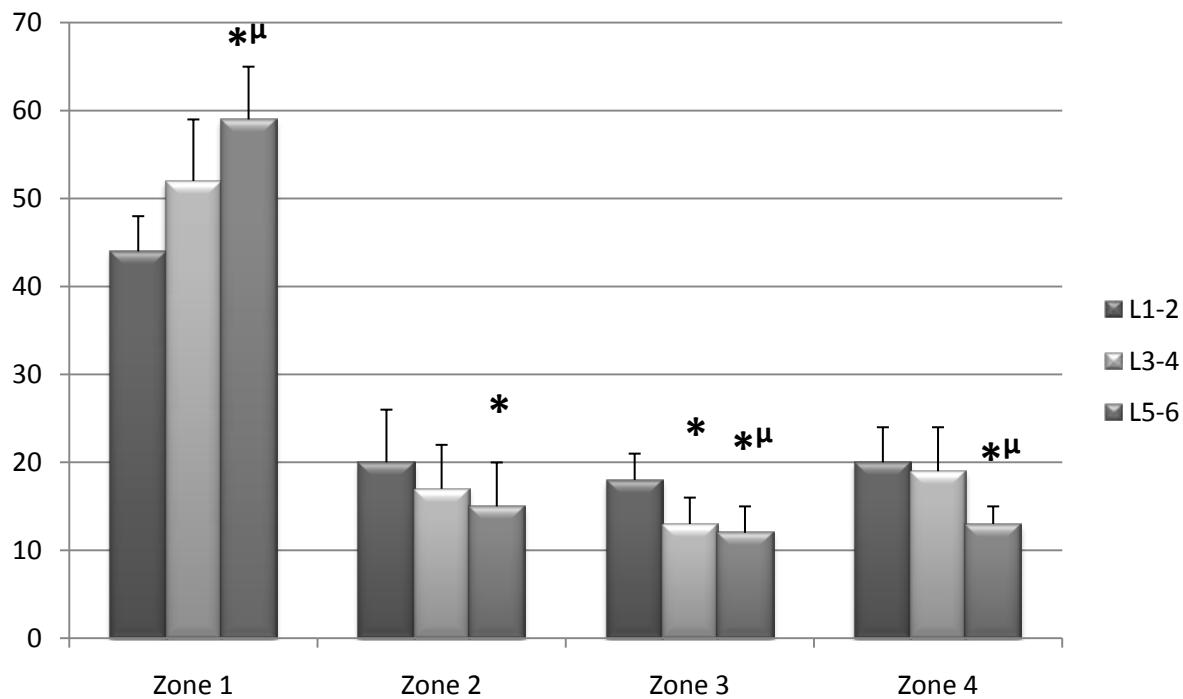


Figure 2. Distribution du temps total des trois sections cyclistes (L1-2, L3-4, L5-6) au sein des quatre zones d'intensité : 1) en-dessous du 1^{er} seuil ventilatoire (zone 1 ; puissance de pédalage < 64% PMA), 2) en dessous de la puissance de pédalage au 2nd seuil ventilatoire (zone 2 ; puissance = 64-81% PMA), 3) en dessous de la puissance maximale aérobie (zone 3 ; puissance = 82-100% PMA) et 4) au-dessus de la puissance maximale aérobie. Moyenne \pm ET. *Significativement différent de L1-L2, μ Significativement différent de L3-L4.

1.5. DISCUSSION PARTIELLE

Cette étude a analysé les stratégies d'allure employées par les triathlètes au cours d'une Coupe du Monde disputée sur le parcours des Jeux Olympiques de Pékin 2008. Ces résultats semblent donc pouvoir être considérés comme indicatifs des intensités de travail développées par les triathlètes élite lors d'une épreuve internationale. A l'image des triathlons Olympiques de Sydney et Athènes, le parcours cycliste emprunté lors des prochains Jeux Olympiques de Pékin par les triathlètes était vallonné de sorte à favoriser une bonne animation de la course. Cette étude a mis en exergue que les triathlètes « élite » diminuent progressivement leur vitesse de déplacement, leur puissance de pédalage et leur fréquence cardiaque de travail lors de la partie cycliste d'une épreuve distance Olympique. Les résultats montrent que les efforts produits lors de cette phase de la course sont caractérisés par une grande variabilité et qu'une fraction importante du temps global d'exercice est associée à des intensités supramaximales (> PMA). La partie cycliste d'un triathlon international distance Olympique semble être dans cette perspective caractérisée par la répétition d'efforts de très haute intensité entrecoupés de phase de récupération où l'intensité est inférieure au 1^{er} seuil

ventilatoire. Ce résultat souligne la nécessité pour les triathlètes « élite » d'être capable de répéter des sprints pour conserver une bonne position dans le peloton lors des multiples relances imposées par le circuit cycliste. Aussi, les triathlètes ont significativement réduit leur puissance de pédalage à la fin du cyclisme afin de préparer la course à pied subséquente. De nouvelles investigations sont indispensables pour identifier si ces résultats préliminaires sont généralisables à d'autres triathlètes, sur d'autres épreuves internationales, présentant notamment des parcours cyclistes et des dynamiques de course différentes. D'autres travaux semblent par ailleurs nécessaires pour étendre la caractérisation de ces stratégies d'allure à l'ensemble d'un triathlon international (*i.e.* natation et course à pied y compris) et étudier l'influence de la distribution des puissances développées en cyclisme sur la course à pied subséquente.

2. ETUDE N°2 : INFLUENCE DU SEXE SUR LE CHOIX DES STRATEGIES D'ALLURE LORS D'UNE EPREUVE INTERNATIONALE DE TRIATHLON (PUBLIEE DANS EUROPEAN JOURNAL OF APPLIED PHYSIOLOGY, 2009, 106 :535-545)

RESUME

Introduction : L'objectif de cette étude était de compléter les résultats préliminaires de l'étude n°1 en comparant les stratégies d'allure adoptées par les femmes et les hommes lors de la natation, du cyclisme et de la course à pied d'une épreuve de Coupe du Monde de triathlon. **Méthodes :** L'évolution de la vitesse de douze triathlètes (6 femmes, 6 hommes) participant à une épreuve internationale distance Olympique a été mesurée dans les trois disciplines. La puissance de pédalage enregistrée tout au long de la section cycliste a permis de caractériser la distribution du temps passé dans les 5 zones d'intensité : [0-10% PMA], [10% PMA - P_{SV1}], [$P_{SV1} - P_{SV2}$], [$P_{SV2} - PMA$], $\geq PMA$ (P_{SV1} : Puissance au 1^{er} seuil ventilatoire ; P_{SV2} : Puissance au 2^{ème} seuil ventilatoire ; PMA : Puissance Maximale Aérobie). **Résultats :** Les résultats ont mis en évidence une baisse similaire de la vitesse lors des parties natation et course à pied chez les deux sexes. L'intensité moyenne relative soutenue en cyclisme était de $61,4 \pm 7,5\%$ et $63,4 \pm 6,5\%$ de PMA pour les femmes et les hommes, respectivement ($p > 0,05$). La distribution du temps passé dans les zones d'intensité était identique entre hommes et femmes ($17 \pm 3\%$, $36 \pm 5\%$, $13 \pm 2\%$, $13 \pm 6\%$, $22 \pm 2\%$ en zone 1, 2, 3, 4 et 5 pour les femmes vs. $17 \pm 5\%$, $31 \pm 5\%$, $19 \pm 7\%$, $14 \pm 3\%$, $19 \pm 2\%$ en zone 1, 2, 3, 4 et 5 pour les hommes, respectivement). La vitesse et la puissance de pédalage ont significativement diminué après les deux premiers tours du parcours cycliste chez les hommes (-3% et -13% pour la vitesse et la puissance de pédalage, respectivement), tandis que les femmes ont démontré une stratégie d'allure plus constante lors de la partie cycliste. Les femmes ont passé une plus grande part de temps au-dessus de PMA que les hommes dans les sections ascendantes du parcours ($45 \pm 4\%$ vs. $32 \pm 4\%$). La vitesse a diminué significativement chez les hommes lors de la course à pied sur toutes les portions du circuit pédestre, tandis que cette baisse ne concernait que les sections ascendantes et descendantes chez les femmes. **Conclusion :** Cette étude a révélé qu'aussi bien les hommes que les femmes adoptent une stratégie d'allure décroissante lors de la natation et de la course à pied au cours d'une épreuve internationale de triathlon. Les hommes adoptent une stratégie d'allure plus agressive lors de l'enchaînement natation-cyclisme, tandis que les femmes semblent plus affectées par les changements de pente sur les sections cycliste et pédestre.

2.1. BUT DE L'ETUDE

L'étude n°1 (Bernard et al. 2009) a apporté des données préliminaires permettant de caractériser la distribution des puissances lors de la partie cycliste d'un triathlon distance Olympique de niveau international. Si ces données sont susceptibles d'aider à orienter la programmation de l'entraînement cycliste en triathlon à haut niveau, de nouvelles recherches sont nécessaires pour caractériser ces stratégies d'allure en natation et en course à pied tout en envisageant leurs interrelations éventuelles. Par ailleurs, les épreuves internationales de triathlon ayant lieu sur des parcours identiques pour les femmes et pour les hommes, il semble intéressant d'identifier si la manière dont les triathlètes gèrent l'intensité de leur exercice relative dans les trois disciplines est identique. La grande majorité des études menées sur les stratégies d'allure a en effet été conduite auprès d'athlètes masculins uniquement et, la manière dont ces données peuvent être transférées aux femmes demeure encore à clarifier (Abbiss et Laursen 2008; Foster et al. 1994). A notre connaissance, seules quatre recherches ayant concerné la natation (Thompson et al. 2000), le cyclisme (Ebert et al. 2005; Lim et al. 2010) et le triathlon (Vleck et al. 2008) ont étudié si le sexe influence les stratégies d'allure adoptées par les sportifs de haut niveau en situation de compétition. Vleck et al. (2008) ont notamment mis en évidence que lors d'une compétition internationale de triathlon distance Olympique, les triathlètes féminines adoptent des stratégies d'allure similaires à celles des hommes mais tentent moins de réduire les écarts séparant les packs lors de la section cycliste. Les résultats de cette étude ont révélé que cette stratégie accroît l'impact de la partie cycliste sur la performance globale chez ces dernières par rapport à leurs homologues masculins. Différencier les stratégies d'allure en fonction du sexe semble dans cette perspective un moyen intéressant de caractériser les exigences liées à la compétition à haut niveau afin d'optimiser la programmation de l'entraînement. L'étude menée par Vleck et al. (2008) était néanmoins limitée dans sa description de la variabilité de la charge de travail lors d'épreuves internationales de triathlon en raison de l'absence de données concernant le travail effectivement produit (à travers la fourniture de valeurs de fréquence cardiaque ou de puissance de pédalage).

Dans cette perspective, le but de cette étude a été de compléter l'étude n°1 en comparant les stratégies d'allure adoptées par les femmes et par les hommes lors d'une épreuve de Coupe du Monde de triathlon et de discuter les facteurs influençant leurs similitudes et leurs différences. Etant disputée sur le parcours des Jeux Olympiques de Pékin 2008 un an seulement avant leur tenue, l'épreuve de Coupe du Monde qui a constitué le support de cette étude incarnait une opportunité particulière de caractériser les effets du sexe sur la charge de travail à la fois en natation, en cyclisme et en course à pied lors d'un triathlon international distance Olympique.

2.2. METHODES

12 triathlètes (6 femmes, 6 hommes) appartenant aux équipes de France et de Suisse de triathlon ont participé à l'étude. Tous étaient habitués aux procédures de test adoptées lors de cette recherche, qui a été menée en accord avec la déclaration d'Helsinki. Les caractéristiques des sujets sont présentées dans le **Tableau 1**.

Paramètres	Femmes	Hommes
Age (années)	27 ± 4	30 ± 6
Poids (kg)	57 ± 5	67 ± 5
Taille (cm)	168 ± 5	180 ± 3
⋮O _{2max} (mLO ₂ .min ⁻¹ .kg ⁻¹)	60,9 ± 7,0	71,7 ± 5,4
PMA (W)	293 ± 19	418 ± 22
PMA/poids (W.kg ⁻¹)	5,2 ± 0,2	6,2 ± 0,2
P _{sv1} (W)	201 ± 21	264 ± 20
P _{sv1} (%MAP)	68,6 ± 7,1	63,2 ± 4,8
P _{sv2} (W)	232 ± 24	349 ± 22
P _{sv2} (%MAP)	79,2 ± 8,2	83,5 ± 5,3

Tableau 1. Caractéristiques anthropométriques et physiologiques des triathlètes (Femmes, $n = 6$; Hommes, $n = 6$). ⋮O_{2max}: consommation maximale d'oxygène, PMA: Puissance Maximale Aérobie, P_{sv1}: Puissance de pédalage au premier seuil ventilatoire, P_{sv2}: Puissance de pédalage associée au second seuil ventilatoire.

2.2.1. MESURES REALISEES AVANT LA COMPETITION

Les 12 triathlètes ont réalisé une épreuve maximale en cyclisme similaire au test incrémenté décrit dans l'étude n°1. Ce test a permis de déterminer leur consommation maximale d'oxygène (⋮O_{2max}), leur puissance maximale aérobie (PMA) et les puissances associées à l'atteinte de ses seuils ventilatoires (P_{sv1}, P_{sv2}).

2.2.2. MESURES REALISEES DURANT LA COMPETITION

Les données mesurées en situation de compétition ont été collectées lors de l'épreuve de Coupe du Monde de Pékin 2007 (Chine, 15 et 16 septembre 2007). Le circuit de cette épreuve était strictement le même que celui de l'épreuve Olympique tenue l'année suivante (<http://www.triathlon.org/images/event/maps/beijingcoursemap.pdf>). L'épreuve de natation consistait en

1500m et le port de la combinaison était interdit en raison de la température de l'eau (23°C). La section cycliste consistait en 6 tours de 6,5km (39,2 km) comprenant une montée (100m de dénivelé positif par tour reliée à une côté de 820m à 6% située 1,4km de la sortie du parc à vélo). La course à pied était effectuée sur un circuit vallonné en aller-retour de 2,4km réalisée 4 fois, avec une extension de 500m sur le dernier tour (10,1 km avec un dénivelé positif de 60m par tour condensés dans une côté de 300m à 12%).

2.2.2.1. MESURES DE LA VITESSE

2.2.2.1.1. LORS DE LA PARTIE NATATION

La vitesse de nage ($m.s^{-1}$) de chaque concurrent a été calculée via une analyse des données vidéographiques enregistrées par trois caméras synchronisées situées à 350m, à 750m et à la sortie de l'eau (1507m).

2.2.2.1.2. LORS DE LA PARTIE CYCLISTE

Avant la compétition, le vélo de chaque triathlète a été équipé d'un système SRM qui a permis la mesure de la vitesse de déplacement tout au long de la partie cycliste. Chaque système a été calibré le jour même de la course selon les recommandations de Gardner et al. (2004).

2.2.2.1.3. LORS DE LA PARTIE COURSE A PIED

Pour neuf triathlètes, la vitesse en course à pied a été continuellement enregistrée à l'aide d'un accéléromètre Polar s3 (Polar RS800sd, Kempele, Finlande) (Hausswirth et al. 2009). Pour 3 autres, la vitesse de course a été mesurée tout au long de l'épreuve grâce à un système d'analyse vidéo (Dartfish, Fribourg, Suisse) permettant le relevé des temps de passage au départ de la course à pied (*i.e.* à la sortie du parc vélo), au niveau des points du parcours correspondant à des changements de pente (début et fin des portions ascendantes et descendantes).

2.2.2.2. RANGS ASSOCIES A CHAQUE DISCIPLINE ET A L'ARRIVEE

Les positions étaient déterminées après 350m, 750m et à la sortie de l'eau pour l'ensemble des triathlètes ($n = 157$; 70 femmes, 87 hommes) lors de la partie natation grâce à la reconnaissance assurée par le numéro sur leur bonnet de natation et à l'analyse vidéo réalisée *a posteriori*. Pour les parties cycliste et pédestre, les performances isolées réalisées dans chaque discipline (en termes de place) ont été déterminées à l'aide des informations collectées par le système officiel de mesure. Celui-ci a par ailleurs fourni les temps de transition natation-cyclisme et cyclisme-course à pied. Pour s'assurer de l'exactitude de ces informations, celles-ci ont été recalculées à l'aide de l'analyse des enregistrements vidéo effectués avec des caméras positionnées au départ et à l'arrivée des sections

cycliste et pédestre. Les triathlètes qui ont abandonné lors de la course ont été exclus de l'analyse ($n=30$; 11 femmes et 19 hommes). Un total de 127 triathlètes a été de la sorte finalement retenu.

2.2.2.3. MESURES DE LA PUISSANCE ET FREQUENCE DE PEDALAGE

Le système SRM disposé sur le vélo des 12 triathlètes suivis lors de l'épreuve a permis de mesurer la puissance de pédalage, la fréquence de pédalage et la distance parcourue tout au long de la section cycliste. Ces données ont été collectées à une fréquence d'échantillonnage de 1Hz.

Pour analyser la distribution des puissances lors de la partie cycliste, les puissances instantanées développées ont été classées dans 5 zones d'intensité : en dessous de 10% de PMA ; entre 10% de PMA et en dessous de P_{SV1} ; entre P_{SV1} et en dessous de P_{SV2} ; entre P_{SV2} et en dessous de PMA ; égales ou supérieurs à PMA.

2.3. ANALYSE STATISTIQUE

Des statistiques descriptives (moyenne et écart-type) ont été calculées pour les vitesses en natation, en cyclisme et en course à pied. Une méthode similaire a été employée pour analyser la puissance et la cadence de pédalage en cyclisme. L'ensemble de ces données a aussi été regroupée au regard des sections préalablement décrites. L'effet du sexe et des variations de dénivelé a été analysé en employant une ANOVA à deux voies à mesures répétées (sexe x temps) utilisant la puissance de pédalage, la vitesse et la cadence de pédalage comme variables dépendantes. Un test *post-hoc* de Tukey a été employé pour déterminer les différences entre les populations (Femmes/Hommes) et les sections du circuit. Un test de corrélation de Pearson a permis de déterminer les relations entre la position à l'arrivée et les positions associées aux performances isolées en natation, en cyclisme et en course à pied. Une analyse similaire a été adoptée pour déterminer les relations entre le pourcentage de temps passé au-dessus de PMA dans les sections ascendantes de la partie cycliste et le ratio PMA/poids. Pour toutes ces analyses, le niveau de significativité était fixé à $p < 0,05$.

2.4. RESULTATS

2.4.1. PERFORMANCE GLOBALE ET POSITION

Le temps nécessaire pour couvrir la distance imposée par l'épreuve était de 125min43s \pm 2min07s et 111min05s \pm 1min08s pour les triathlètes féminines et les triathlètes masculins suivis lors de cette compétition, respectivement ($p < 0,01$). La place moyenne à l'arrivée était 26 \pm 16 et 30

± 16 pour les femmes et les hommes, respectivement ($p > 0,05$). Par rapport à l'ensemble des triathlètes de l'épreuve (i.e. 70 femmes et 87 hommes), les triathlètes féminines ici étudiées ont terminé dans le top $35,7 \pm 18,0\%$ de leur course et les hommes dans le top $35,1 \pm 20,8\%$ ($p = 0,96$).

2.4.2. SECTION NATATION

Une différence significative a été constatée entre femmes et hommes concernant la vitesse moyenne de nage et le temps nécessaire pour couvrir les 1500m en natation ($1,24 \pm 0,03$ vs. $1,38 \pm 0,05\text{m.s}^{-1}$ et $20\text{min}09 \pm 24\text{s}$ vs. $18\text{min}07 \pm 40\text{s}$, respectivement, $p < 0,01$). La vitesse de nage était significativement plus élevée sur les 350 premiers mètres de la course que sur les autres portions de la section natation, pour les deux sexes ($p < 0,05$). De plus, la position après 350m déterminait fortement la position à la sortie de l'eau, en considérant l'ensemble des participants, tant pour les femmes que pour les hommes ($r = 0,97$ et $0,99$, $p < 0,01$, respectivement). Une faible corrélation était en revanche reportée entre la position à l'issue de la section natation et la position finale pour l'ensemble des participants ($r = 0,47$ et $0,36$, $p < 0,01$, pour les femmes et les hommes, respectivement, [Tableau 2](#)).

Sexe	r_{natation}	r_{cyclisme}	$r_{\text{course à pied}}$
Femmes	0,47*	0,68*	0,77*
Hommes	0,36*	0,52*	0,98*

Tableau 2. Corrélation entre le rang associée à la performance dans chaque discipline et la position sur la ligne d'arrivée ($n = 59$ et $n = 68$ pour les femmes et les hommes, respectivement). $*p < 0,01$.

2.4.3. SECTION CYCLISME

Les 12 triathlètes sur lesquels nous nous sommes principalement focalisés lors de cette étude ont couvert la portion cycliste en $66\text{min}31\text{s} \pm 1\text{min}07\text{s}$ et $59\text{min}12\text{s} \pm 3\text{min}09\text{s}$, à une vitesse moyenne de $35,4 \pm 0,6\text{km.h}^{-1}$ et $39,6 \pm 0,1\text{km.h}^{-1}$, pour les femmes et pour les hommes, respectivement ($p < 0,01$). La puissance de pédalage moyenne était de $181 \pm 22\text{W}$ ($3,16 \pm 0,39\text{W.kg}^{-1}$) pour les femmes et de $265 \pm 27\text{W}$ ($3,96 \pm 0,22\text{W.kg}^{-1}$) pour les hommes ($p < 0,01$). La vitesse (km.h^{-1}) et la puissance de pédalage moyenne sur la portion cycliste sont présentées sur la [Figure 1](#).

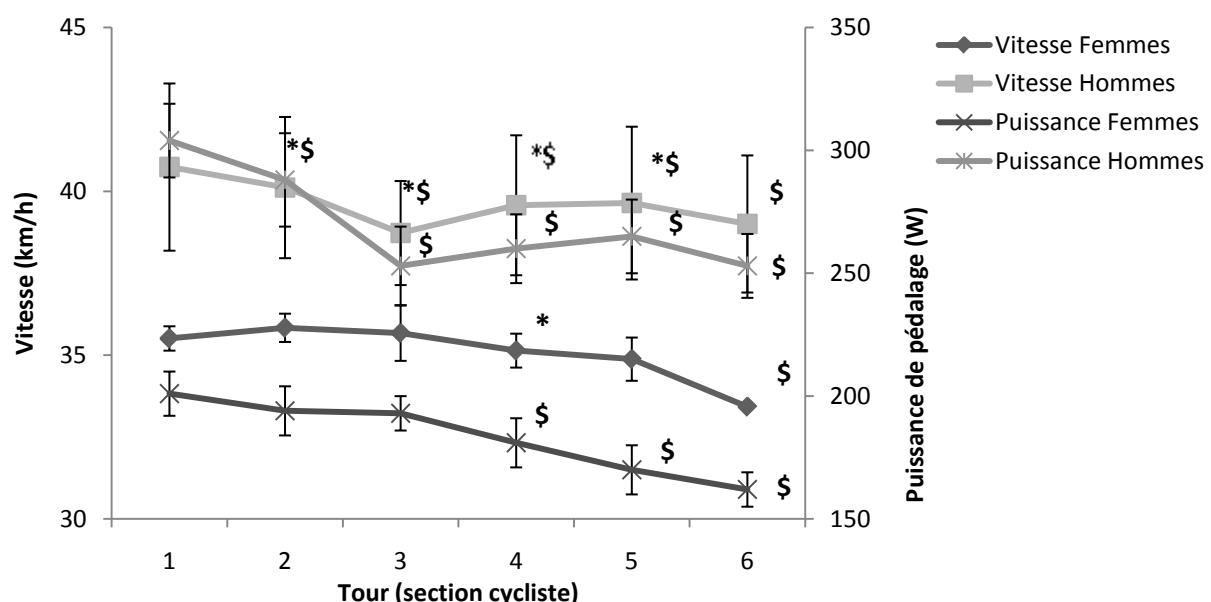


Figure 1. Vitesse de déplacement (moyenne \pm ET, km.h^{-1}) et puissance de pédalage (moyenne \pm ET, W) lors de chaque tour du circuit cycliste pour les triathlètes féminines ($n = 6$) et masculins ($n = 6$) suivis lors de l'étude. *Significativement différent du tour précédent ($p < 0,05$). \$Significativement différent du premier tour ($p < 0,05$).

Aucune différence significative n'a été constatée entre hommes et femmes concernant le pourcentage de temps passé au-dessus de PMA lors de la section cycliste. L'intensité moyenne relative soutenue en cyclisme était de $61,4 \pm 7,5\%$ et $63,4 \pm 6,5\%$ de PMA pour les femmes et les hommes, respectivement ($p > 0,05$). Aucun effet du sexe n'était observé lorsque les valeurs de puissance instantanée développées furent distribuées dans les 5 zones d'intensité (Figure 2).

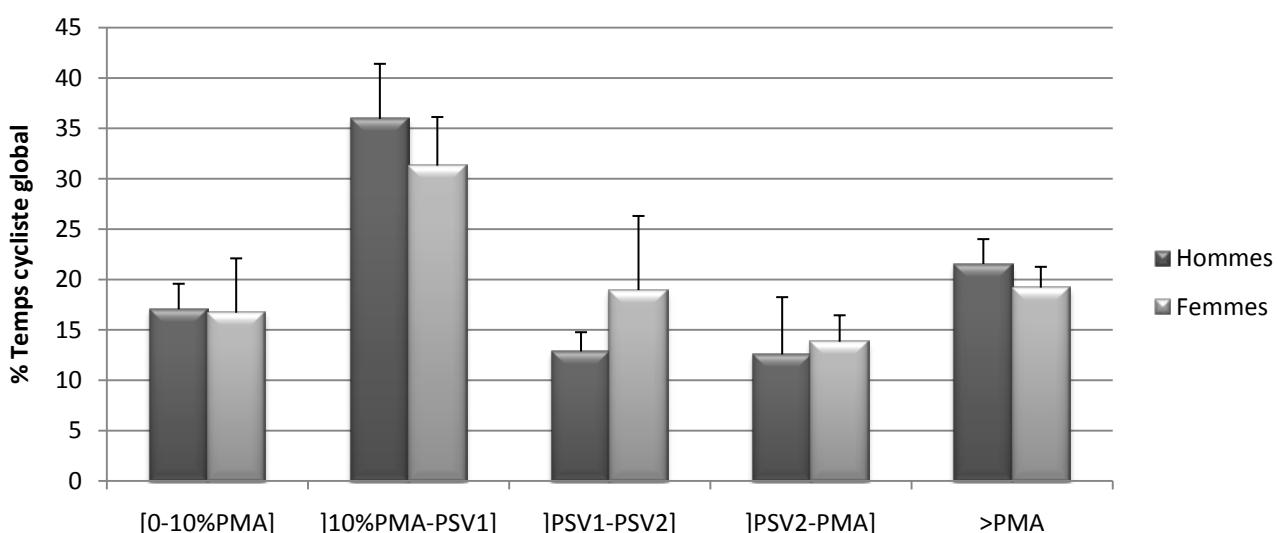


Figure 2. Distribution du temps d'exercice cycliste dans les cinq zones d'intensité : en dessous de 10% de PMA ; entre 10% de PMA et en dessous de P_{SV1} ; entre P_{SV1} et en dessous de P_{SV2} ; entre P_{SV2} et en dessous de PMA ; égales ou supérieurs à PMA. Aucune différence entre les deux sexes n'a été observée ($p < 0,05$).

Un effet significatif du sexe a été observé concernant la distribution géographique des puissances supérieures à PMA (Zone 5). En effet, alors que les femmes ont passé plus de $44,8 \pm 4,1\%$ de leur temps en zone 5 dans la montée du circuit, ce temps n'était que de $31,9 \pm 4,4\%$ chez les hommes ($p < 0,05$). Une corrélation significative inverse a été constatée entre le pourcentage de temps passé au-dessus de PMA dans la montée et le ratio PMA/poids ($r = 0,73$, $p < 0,05$, $n = 12$), alors que ce ratio était significativement meilleur chez les hommes ($p < 0,05$, [Tableau 2](#)).

Concernant la cadence de pédalage, des valeurs significativement plus faibles ont été constatées chez les femmes ($88 \pm 4\text{rpm}$) par rapport aux hommes ($95 \pm 4\text{rpm}$, $p < 0,05$). Aucun effet significatif du temps n'a été rapporté pour les deux sexes concernant cette variable ($p < 0,05$). En revanche, la distance parcourue par révolution a diminué de manière significative aussi bien pour les femmes que pour les hommes (-3,1 et -2,0%, $p < 0,05$ entre le tour 1 et le tour 6 pour les femmes et pour les hommes, respectivement).

Aussi, une corrélation significative a été observée entre la position à l'arrivée et la position associée à la performance cycliste isolée pour les deux sexes ($r = 0,68$ et $0,52$, $p < 0,01$, chez les femmes et chez les hommes, respectivement). Une corrélation significative a aussi été rapportée entre la position à l'issue de la natation et la position en cyclisme chez les femmes ($r = 0,35$, $p < 0,01$) mais non chez les hommes ($p > 0,05$).

2.4.4. SECTION COURSE A PIED

Une différence significative entre les femmes et les hommes a été constatée concernant le temps de course et la vitesse de course moyenne ($38\text{min}35\text{s} \pm 1\text{min}09\text{s}$ vs. $33\text{min}00\text{s} \pm 1\text{min}09\text{s}$ et $15,6 \pm 0,5$ vs. $18,4 \pm 0,5\text{km.h}^{-1}$, $p < 0,01$) pour l'ensemble de la course et pour tous les tours considérés isolément ($p < 0,01$). La vitesse à chaque étape de la course à pied est présentée sur la [Figure 3](#).

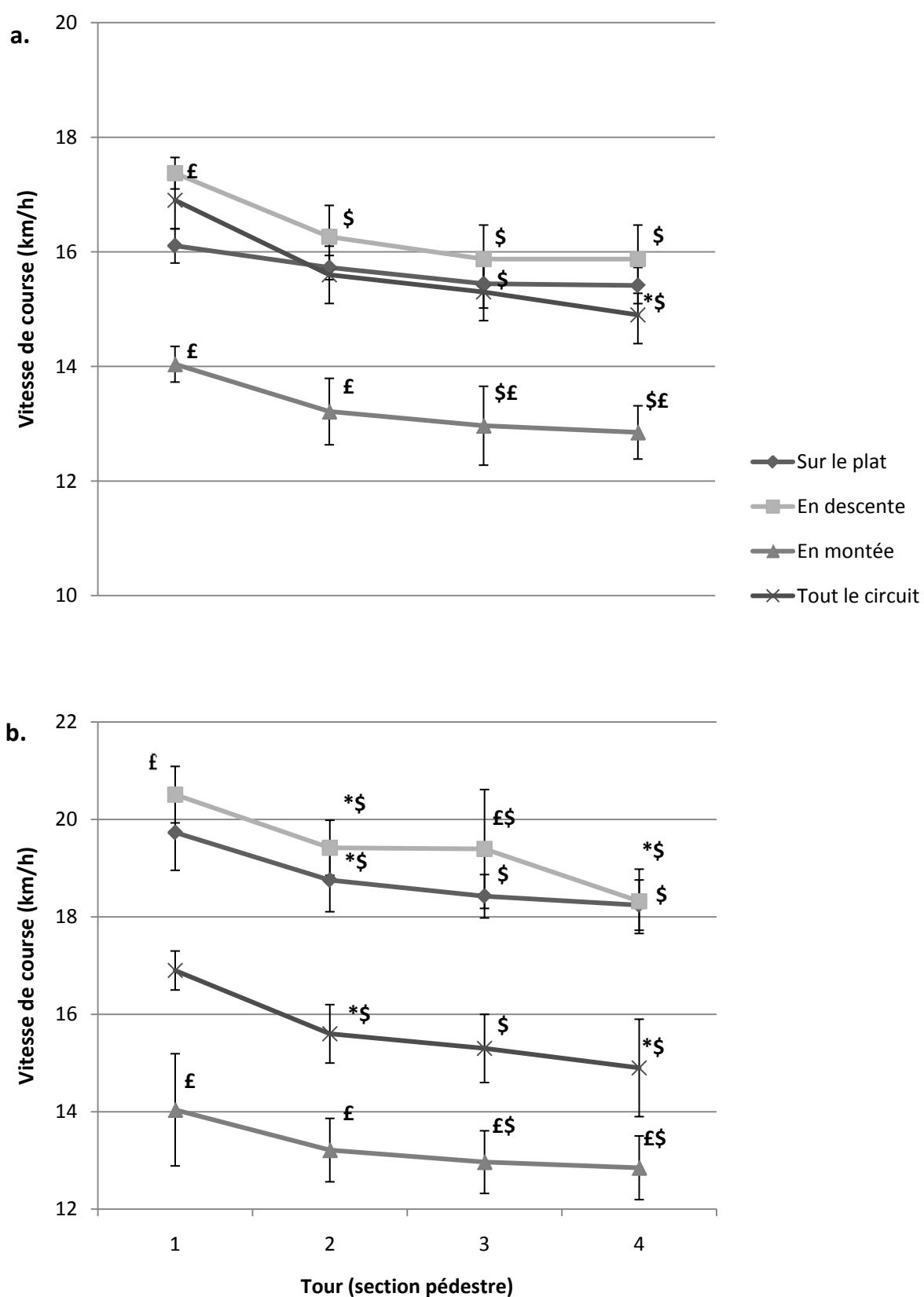


Figure 3. Vitesse de course moyenne (\pm ET) pour les femmes (a) et les hommes (b) en fonction des différents profils du parcours. *Significativement différent du tour précédent ($p < 0,05$). $^{\$}$ Significativement différent du tour 1 ($p < 0,05$). f Significativement différent de la vitesse sur le plat ($p < 0,05$).

2.5. DISCUSSION PARTIELLE

La présente étude a montré que les triathlètes « élite » des deux sexes adoptent des stratégies d'allure décroissante au cours des trois disciplines d'une compétition internationale. Toutefois, les hommes semblent davantage accentuer l'intensité d'exercice lors de la phase initiale de la partie cycliste et concentrer leurs efforts cyclistes supra-PMA dans les portions techniques du parcours (relances). La baisse de vitesse est moins prononcée chez les femmes lors de la partie cycliste mais ces dernières semblent davantage souffrir des changements de pente tant en cyclisme qu'en course à pied. De nouvelles investigations sont nécessaires pour déterminer si ces conclusions sont influencées par les dynamiques de course ou si celles-ci peuvent être généralisées à d'autres conditions de course (*i.e.* caractéristiques du circuit, nombre de participants et densité du niveau des engagés, conditions météorologiques). Les bénéfices d'un départ rapide en course à pied pour ce type d'épreuve demeurent par ailleurs à clarifier étant leur caractère contradictoire avec les études ayant concerné les stratégies d'allure dans les sports de longue durée. Dans cette perspective, de nouveaux travaux expérimentaux semblent indispensables pour comprendre l'influence de la stratégie d'allure initiale en course à pied sur la performance en triathlon à haut niveau.

3. ETUDE N°3 : INFLUENCE DE LA STRATEGIE D'ALLURE ADOPTEE LORS DE LA PHASE INITIATRICE DE LA COURSE A PIED SUR LA PERFORMANCE GLOBALE EN TRIATHLON (PUBLIEE DANS EUROPEAN JOURNAL OF APPLIED PHYSIOLOGY, 2010, 108 :1115-1123)

RESUME

Objectif : Cette étude a prolongé l'étude n°2 (Le Meur et al. 2009) avec pour objectif de déterminer la meilleure stratégie d'allure à adopter lors de la phase initiale de la course à pied d'un triathlon distance Olympique. **Méthodes :** Dix triathlètes masculins très entraînés ont réalisé un test maximal incrémenté mené à épuisement en course à pied, une performance contrôle sur 10km (CàP-Réf) et trois triathlons distance Olympique contre-la-montre (1,5km natation – 40km cyclisme – 10km course à pied) dans un ordre randomisé. Les vitesses en natation et cyclisme ont été imposées en fonction des allures soutenues lors du premier triathlon réalisé, de sorte à ce que les trois conditions puissent être comparées. Les trois stratégies d'allure consistaient respectivement à parcourir le 1^{er} kilomètre 5% plus vite (CàP-Tri_{+5%}), 5% plus lentement (CàP-Tri_{-5%}) ou 10% plus lentement (CàP-Tri_{-10%}) que l'allure moyenne lors de CàP-Réf. La stratégie était laissée libre sur les 9 derniers kilomètres de chaque triathlon, les triathlètes ayant pour consigne de réaliser la meilleure performance possible. **Résultats :** La performance réalisée lors de CàP-Tri_{-5%} a été significativement meilleure que celles associées à CàP-Tri_{+5%} et CàP-Tri_{-10%}, tandis qu'aucune différence significative n'a été constatée avec CàP-Réf (2028 ± 78s vs. 2000 ± 72s, 2178 ± 121s et 2087 ± 88s pour CàP-Tri_{-5%}, CàP-Réf, CàP-Tri_{+5%} et CàP-Tri_{-10%}, respectivement). La stratégie CàP-Tri_{+5%} était associée à de plus hautes valeurs de $\dot{V}O_2$, \dot{V}_E , FC et $[La^-]_s$ à la fin du 1^{er} km que dans les deux autres conditions. Après 5 et 9,5km, ces valeurs étaient plus élevées pour CàP-Tri_{-5%}. **Conclusion :** Les résultats de cette étude révèlent que l'allure adoptée sur le premier kilomètre de la course à pied d'un triathlon distance Olympique est déterminante pour la performance globale. Les triathlètes tireraient avantage à automatiser une allure 5% plus lente que celle qu'ils maintiennent sur une course-référence de 10km, étant donné qu'aussi bien les stratégies CàP-Tri_{+5%} et CàP-Tri_{-10%} engendrent un niveau de performance moindre.

3.1. BUT DE L'ETUDE

L'étude n°2 (Le Meur et al. 2009) et celles de Vleck et al. (Vleck et al. 2008; Vleck et al. 2006) ont mis en évidence que les triathlètes de haut niveau systématisent une stratégie d'allure décroissante en compétition lors de la course à pied. Les résultats collectés lors des épreuves de Coupe du Monde disputées à Lausanne en 2001 et 2002 (Vleck et al. 2008; Vleck et al. 2006) ont ainsi mis en évidence que les triathlètes parcourent le premier kilomètre pédestre significativement plus rapidement que toutes les autres portions du circuit de course à pied, alors que les perturbations engendrées par le cyclisme y sont les plus importantes (Kreider et al. 1988c) et que les recommandations de la littérature scientifique soulignent l'intérêt d'une allure constante lors d'épreuves de durée équivalente (Abbiss et Laursen 2008). De la même manière, l'étude n°2 (Le Meur et al. 2009) a montré que les 136 arrivants de l'épreuve de Coupe du Monde de Pékin 2007 avaient adopté un départ agressif en course à pied avant de diminuer leur vitesse. Lors de cette compétition, le premier des quatre tours avait ainsi été parcouru en moyenne 10% plus rapidement que les trois tours suivants.

Dans ce contexte, nous avons fait l'hypothèse que le choix d'une stratégie d'allure décroissante est la meilleure stratégie à adopter lors de la section pédestre d'un triathlon distance Olympique disputé par des triathlètes de haut niveau. Le but de la présente investigation était de comparer l'efficacité de trois stratégies d'allure différentes lors de la phase initiale du 10km de course à pied, tout en reproduisant les conditions écologiques de la pratique du triathlon. Etant donné que la transition cyclisme-course à pied incarne la phase la plus critique de l'épreuve et qu'elle détermine souvent fortement la position à l'arrivée, nous avons investigué l'effet de l'allure adoptée sur le premier kilomètre de la course à pied sur la performance globale en triathlon.

3.2. METHODES

Dix triathlètes masculins de niveau national, sélectionnés sur la base de leur niveau de performance sur triathlon distance Olympique, ont participé à cette étude (performance moyenne : $2h2min \pm 7min$). Ils s'entraînaient régulièrement et participaient à des compétitions de triathlon depuis quatre ans au minimum. Leurs caractéristiques sont présentées dans le [Tableau 1](#). Tous ont donné leur consentement écrit pour participer à cette étude, dont le déroulement et les risques leur avaient été présentés en amont selon les règles imposées par un comité d'éthique local. Pour familiariser les triathlètes avec les circuits cycliste et pédestre empruntés durant l'étude, un camp d'entraînement avec un programme allégé a été programmé dix jours avant le début de celle-ci. Durant toute la durée expérimentale, les triathlètes n'ont réalisé aucun exercice fatigant durant les 48h précédant chaque test.

3.2.1. TEST MAXIMAL EN COURSE A PIED

Chaque sujet a réalisé un test triangulaire maximal en course à pied mené jusqu'à l'épuisement volontaire sur une piste d'athlétisme couverte de 340m pour déterminer ses valeurs maximales de consommation maximale d'oxygène ($\dot{V}O_{2\max}$), de fréquence cardiaque maximale (FC_{\max}) et de débit ventilatoire ($\dot{V}_{E\max}$). L'allure était fixée par un système de repérage sonore, que le sujet devait respecter via des plots disposés tous les 20m sur la piste. L'exercice débutait à une vitesse de 10km.h^{-1} pour les filles puis la vitesse était incrémentée de 2km.h^{-1} jusqu'à 14km.h^{-1} par périodes de 3min. Ensuite, l'incrément était de 1km.h^{-1} toutes les 3min. Une minute après l'arrêt de l'exercice, une goutte de sang était prélevée au lobe de l'oreille pour mesurer la lactatémie. Pour les hommes, le protocole était identique mais débutait à 12km.h^{-1} et n'était incrémenté d'un km.h^{-1} par palier qu'à partir de 16km.h^{-1} . Le test était arrêté lorsque le triathlète ne parvenait plus à passer à hauteur des plots en respectant les repères sonores. L'épreuve était considérée comme maximale lorsque deux des trois critères cités pour le test cycliste étaient validés et que la lactatémie en fin d'épreuve était supérieure à 8mmol.L^{-1} .

Age (années)	24 ± 3
Taille (cm)	178 ± 5
Poids (kg)	$68,2 \pm 6,7$
Entraînement en natation (km.semaine^{-1})	$12,5 \pm 1,9$
Entraînement en cyclisme (km.semaine^{-1})	220 ± 42
Entraînement en course à pied (km.semaine^{-1})	65 ± 12
$\dot{V}O_{2\max}$ en course à pied ($\text{mL.min}^{-1}.\text{kg}^{-1}$)	$69,1 \pm 7,1$
$\dot{V}_{E\max}$ en course à pied (L.min^{-1})	184 ± 21
FC_{\max} en course à pied (battements. min^{-1})	194 ± 7

Tableau 1. Caractéristiques des triathlètes de l'étude ($n = 10$). Les valeurs sont exprimées en moyenne \pm écart-type. $\dot{V}O_{2\max}$, consommation maximale d'oxygène; $\dot{V}_{E\max}$, débit ventilatoire maximal; FC_{\max} : fréquence cardiaque maximale.

3.2.2. COURSE CONTROLE

Une épreuve maximale sur 10km en course à pied (CàP – Réf) a été réalisée sur une piste indoor de 340m entre janvier et mars, une semaine avant les épreuves de triathlon. La stratégie d'allure était laissée libre et la seule instruction donnée aux triathlètes était de réaliser la meilleure performance possible. Aucun feedback ne leur était fourni concernant la vitesse de course ou les temps de passage. Les triathlètes étaient uniquement informés du nombre de kilomètres parcourus.

3.2.3. COMPETITIONS DE TRIATHLON

Toutes les épreuves de triathlon ont été réalisées entre janvier et mars en indoor avec une température ambiante comprise entre 18 et 20°C. Chaque participant a réalisé trois triathlons contre-la-montre distance Olympique séparés de 10 jours de récupération, lors desquels la charge d'entraînement était contrôlée. Les valeurs de fréquence cardiaque associées aux seuils ventilatoires (SV1, SV2) déterminées lors du test incrémenté ont été utilisées pour délimiter trois zones d'intensité (Esteve-Lanao et al. 2007) : une zone 1 en dessous de SV1, une zone 2 entre SV1 et SV2 et une zone 3 supérieure à SV2. Durant le mois précédent l'expérimentation, le temps d'entraînement et la distribution de celui-ci à l'intérieur des trois zones d'intensité a été continuellement mesuré (15 ± 3 h/semaine et 79, 10, 12%, respectivement). Cette charge d'entraînement moyenne était similaire à celle déjà rapportée dans la littérature pour des triathlètes entraînés (Hausswirth et al. 1997a), des coureurs à pied « élite » (Esteve-Lanao et al. 2007), des rameurs de haut-niveau (Fiskerstrand et Seiler 2004) et des skieurs *cross-country* (Seiler et Kjerland 2006). Tout au long du protocole, l'entraînement des triathlètes a été géré par le même entraîneur. La charge d'entraînement était contrôlée de sorte à demeurer similaire entre chaque triathlon tout en respectant les habitudes de chaque triathlète. Afin d'éviter tout risque de blessure ou de surmenage, un entretien quotidien avec les triathlètes était réalisé pour suivre leur état de forme.

3.2.3.1. PARTIE NATATION-CYCLISME

La natation avait lieu dans une piscine indoor de 50m (24-25°C), tandis que les 40km de cyclisme étaient parcourus sur un vélodrome de 166m situé à côté de la piscine. L'allure sur la partie natation-cyclisme était fixée par celle du premier triathlon, de sorte à ce que l'intensité maintenue lors de cette phase soit la même durant les trois triathlons. La vitesse était contrôlée par un système disposé dans le bonnet de natation (Tempo Trainer, Finis, Helsinki, Finlande) qui émettait un signal sonore à la fin de chaque période de temps nécessaire pour parcourir 12,5m. Durant le premier triathlon, il était demandé à chaque triathlète de nager avec une stratégie d'allure constante.

Lors des trois premiers kilomètres de la section cycliste, les triathlètes devaient atteindre la vitesse cible à maintenir lors des 37 derniers kilomètres. Un signal sonore leur indiquait le rythme à tenir lors de cette seconde portion de la partie cycliste à chaque demi-tour du vélodrome (83m). La vitesse imposée lors des 37 derniers kilomètres correspondait à celle atteinte lors des deuxième et troisième kilomètres. Durant les sections cyclistes, les triathlètes pouvaient boire *ad libitum* grâce à des bidons de 750mL accrochés sur le cadre de leur vélo. Le temps de transition entre la natation et le cyclisme était légèrement supérieur à celui observé en compétition (*i.e.* 3min). Celui-ci incluait une minute pour changer de vêtements, une minute pour placer le cardiofréquencemètre et une minute de course avec le vélo pour atteindre le vélodrome situé à 200m.

3.2.3.2. PARTIE PEDESTRE

La course de 10km de chaque triathlon était réalisée sur la même piste d'athlétisme couverte de 340m adjacente au vélodrome que la CàP-Réf. Lors du premier kilomètre, les triathlètes devaient maintenir alternativement une allure 5% plus rapide (Tri-CàP_{+5%}), 5% plus lente (Tri-CàP_{-5%}) et 10% plus lente (Tri-CàP_{-10%}) que leur allure moyenne lors de CàP-Réf. L'ordre de ces conditions était randomisé. Les triathlètes devaient ensuite réaliser la meilleure performance possible sur les 9 derniers kilomètres du parcours avec une stratégie d'allure laissée libre. Tri-CàP_{+5%} était ainsi représentative de la stratégie d'allure adoptée spontanément par les triathlètes en compétition (Le Meur et al. 2009). Tri-CàP_{-5%} et Tri-CàP_{-10%} étaient plus proches de la vitesse moyenne sur l'ensemble de la partie pédestre adoptée par les triathlètes en situation de compétition (Le Meur et al. 2009). Un signal sonore à chaque 25m permettait aux triathlètes d'adopter précisément la vitesse cible lors du premier kilomètre.

3.2.3.3. CALCUL DE LA VITESSE DE COURSE

La vitesse de course était calculée grâce aux temps de passage mesurés par deux expérimentateurs équipés d'un chronomètre (Casio, HS-80TW-1EF, Japon) et placés au point de passage de chaque kilomètre des 3 triathlons et de CàP-Réf.

3.2.3.4. MESURE DES VARIABLES METABOLIQUES

Après le 35^{ème} km de la portion cycliste, les triathlètes étaient équipés avec le même analyseur des gaz utilisé lors des pré-tests en course à pied (test incrémenté et CàP-Réf). La durée de cet arrêt était toujours inférieure à 45s. Ainsi, la durée de la transition cyclisme-course à pied était réduite de sorte à reproduire les conditions de compétition (*i.e.* 30s) (Millet et Vleck 2000). Les données physiologiques collectées étaient analysées au début (0,5-1km), au milieu (4,5-5km) et à la fin (9-9,5km) de chaque épreuve pédestre.

Les échantillons de sang étaient pris au niveau du lobe de l'oreille à la fin du cyclisme, après 5km de course à pied et à la fin de chaque 10km, de sorte à mesurer la lactatémie ($[La^-]_s$) avec un appareil Lactate Pro (Arkray, Tokyo, Japon). La durée de l'arrêt après 5km (décomptée de la performance globale) était toujours inférieure à 10s.

3.3. ANALYSE STATISTIQUE

Toutes les données ont été exprimées en moyenne \pm écart-type. Une analyse de la variance à deux voies (stratégie d'allure \times temps) pour mesures répétées a été employée pour analyser les effets de la stratégie d'allure adoptée sur le 1^{er} km et du temps sur les valeurs de vitesse, de FC, $\dot{V}O_2$,

À l'issue de l'analyse de variance, les résultats ont montré des différences significatives entre les stratégies d'allure et les périodes considérées durant l'exercice. Le niveau de significativité était fixé à $p < 0,05$ pour toutes les procédures statistiques.

3.4. RÉSULTATS

Tous les sujets ont réalisé le protocole en entier sans problème particulier et constaté que la course-contrôle et les triathlons étaient caractéristiques de leurs compétitions habituelles.

3.4.1. CHARGE D'ENTRAINEMENT

Aucune différence significative ne fut constatée en termes de charge d'entraînement et de distribution du temps dans les 3 zones d'intensité entre chaque période de 10 jours séparant deux tests consécutifs ($p = 0,97$).

3.4.2. PERFORMANCES

Aucune différence significative n'a été observée entre les phases natation-cyclisme des triathlons ($p > 0,05$, Tableau 2). Une différence significative systématique était en revanche constatée concernant le temps requis pour compléter le premier kilomètre de la partie pédestre de chaque triathlon (200 ± 15 s, 190 ± 14 s, 210 ± 17 s et 220 ± 18 s pour CàP-Réf, Tri-CàP_{+5%}, Tri-CàP_{+5%}, Tri-CàP_{+5%}, respectivement, p compris entre 0,001 et 0,014). Tri-CàP_{-5%} était accompagné d'une performance significativement meilleure que Tri-CàP_{+5%} et Tri-CàP_{-10%} ($p = 0,005$ et $p = 0,02$, avec Tri-CàP_{+5%} et Tri-CàP_{-10%}, respectivement), tandis qu'aucune différence n'était constatée avec CàP-Réf ($p = 0,58$) (2028 ± 78 s et $17,8 \pm 0,4$ km.h⁻¹ vs. 2000 ± 72 s et $18,0 \pm 0,6$ km.h⁻¹, 2178 ± 121 s et $16,5 \pm 0,9$ km.h⁻¹, 2087 ± 88 s et $17,2 \pm 0,6$ km.h⁻¹, pour Tri-CàP_{-5%}, CàP-Réf, Tri-CàP_{+5%} et Tri-CàP_{-10%}, respectivement, Tableau 2).

Perf. Conditions	Performance en natation (s)	Performance en cyclisme (s)	Performance en course à pied (s)	Performance globale (s)
CàP-Réf			2000 ± 72 ^{μμμμ}	
CàP-Tri _{+5%}	1278 ± 54	4260 ± 52	2178 ± 121 ^{**\$μμμ}	7716 ± 196 ^{\$μμμ}
CàP-Tri _{-5%}	1275 ± 51	4255 ± 50	2028 ± 78 ^{εεμ}	7558 ± 188 ^{εεμ}
CàP-Tri _{-10%}	1281 ± 52	4263 ± 57	2087 ± 88 ^{*\$ε}	7631 ± 191 ^{\$ε}

Tableau 2. Performances globale et isolée réalisées lors des trois triathlons. Les valeurs sont exprimées en moyenne \pm écart-type.

Significativement différent de CàP-Réf, * $p < 0,05$, ** $p < 0,01$

Significativement différent de CàP-Tri_{+5%}, ε $p < 0,05$, εε $p < 0,01$

Significativement différent de CàP-Tri_{-5%}, \$ $p < 0,05$, \$\$ $p < 0,01$

Significativement différent de CàP-Tri_{-10%}, μ $p < 0,05$, μμ $p < 0,01$

3.4.3. PARAMETRES PHYSIOLOGIQUES

Le **Tableau 3** indique les valeurs moyennes pour FC, $\dot{V}O_2$, \dot{V}_E et $[La^-]_s$ lors de CàP-Réf et de la course à pied des trois triathlons.

Les valeurs de $\dot{V}O_2$, \dot{V}_E et FC au milieu et à la fin de la course à pied ont tendu à être plus faibles que leurs valeurs initiales respectives lors de CàP-Tri_{+5%} ($p = 0,081$ et $p = 0,085$ pour $\dot{V}O_2$, $p = 0,071$ et $p = 0,080$ pour \dot{V}_E , $p = 0,080$ et $p = 0,057$ pour FC, en comparant les valeurs au 5^{ème} et au 9,5km, respectivement). En revanche, les valeurs de \dot{V}_E et de FC étaient significativement plus élevées après 5 et 9,5km que leur valeur après 1km lors des conditions CàP-Réf, Tri-CàP_{-5%}, et Tri-CàP_{-10%} ($p = 0,041$, $p = 0,008$ et $p = 0,011$ pour \dot{V}_E , $p = 0,035$, $p = 0,003$ et $p = 0,06$ pour FC, en considérant km5 et km10 avec km1, pour CàP-Réf, Tri-CàP_{-5%}, et Tri-CàP_{-10%}, respectivement). Aucune différence significative n'a été observée entre la valeur de $[La^-]_s$ après 5km et après 0km, hormis pour Tri-CàP_{+5%}, dont la valeur a augmenté de $2,9 \pm 0,2 \text{ mmol.L}^{-1}$ à $4,9 \pm 0,5 \text{ mmol.L}^{-1}$ durant cette période ($p = 0,035$). Toutes les valeurs finales de $[La^-]_s$ étaient supérieures à leur valeur initiale ($p = 0,014$, $p = 0,021$ et $p = 0,029$, pour CàP-Réf, CàP-Tri_{-5%}, et CàP-Tri_{-10%}, respectivement).

Paramètres CàP	Distance (km)											
	0,5 - 1	4,5 - 5	9 - 9,5	0,5 - 1	4,5 - 5	9 - 9,5	0,5 - 1	4,5 - 5	9 - 9,5	0	5	10
CàP-Réf	61,5 ±5,1 \$	60,7± 5,8 \$£	64,4± 5,7 £\$\$	173,2 ± 12,3 \$	179,8 ± 14,3 \$\$£	182,1 ± 9,5 \$\$£	176,2 ± 17,3 £	186,2 ± 17,9 \$	189,3 ± 18,2 \$\$	0,8 ± 0,3 \$ £	3,2± 0,4 \$ £	3,4 ± 0,3 £
Tri-CàP _{+5%}	66,1 ±7,0 *£	54,9± 6,8 *££	55,1± 6,7 ££	182,1 ± 9,2 *	160,5 ± 12,3 **££	162,1 ± 13,4 **£	186,0 ± 16,5 *££	176,1 ± 14,8 £*	171,6 ± 12,8 **££	2,9 ± 0,2 *	4,9 ± 0,5 *£	4,1 ± 0,3 £
Tri-CàP _{-5%}	60,9 ±5,9 \$	65,3 ±5,8 *\$\$	68,1 ± 6,8 *\$\$	167,8 ± 8,2 *\$\$	187,9 ± 11,2 *\$\$	191,5 ± 10,8 *§	168,0 ± 11,2 *\$\$	190,1 ± 14,2 \$	192,8 ± 12,8 \$\$	3,2 ± 0,3 *	3,8 ± 0,2 \$	5,4 ± 0,4 *§
Tri-CàP _{-10%}	55,1 ±4,9 *\$\$£	57,9 ±4,4 \$££	60,6 ± 5,7 *£\$	158,5 ± 10,8 *\$\$£	170,4 ± 11,2 *££\$	164,2 ± 12,1 *££	159,0 ± 11,3 *££\$	181,1 ± 17,8 £	180,1 ± 17,2 *£\$	3,1 ± 0,2 *	3,6 ± 0,4 \$	4,0 ± 0,4 £

Tableau 3. Valeurs moyennes (\pm ET) pour la consommation d'oxygène, le débit ventilatoire, la fréquence cardiaque et la lactatémie durant les sessions pédestres. Toutes les valeurs de $\dot{V}O_2$, \dot{V}_E et FC lors de CàP-Tri_{-5%} et CàP-Tri_{+5%} étaient significativement différentes de leur valeur initiale correspondante, $p < 0,05$.

3.4.4. EFFETS DE LA STRATEGIE D'ALLURE

L'analyse statistique a indiqué un effet significatif de la stratégie d'allure sur les valeurs de $\dot{V}O_2$, $\dot{V}E$ et FC lors de la course à pied ($p < 0,05$, Tableau 3). En revanche, $\dot{V}O_2$, $\dot{V}E$, FC et $[La^-]_s$ durant CàP-Tri_{-5%} après 1km étaient plus hautes que lors des autres conditions après 5 et 9,5km ($p < 0,05$), exceptée la valeur de $[La^-]_s$ après 5km ($p = 0,12$). La valeur de $[La^-]_s$ lors de CàP-Tri_{+5%} était significativement plus élevée après 5km que lors de CàP-Réf et les deux autres conditions testées ($p = 0,031$, $p = 0,033$ et $p = 0,038$, en comparant CàP-Réf, CàP-Tri_{-5%}, et CàP-Tri_{-10%} avec CàP-Tri_{+5%}, respectivement).

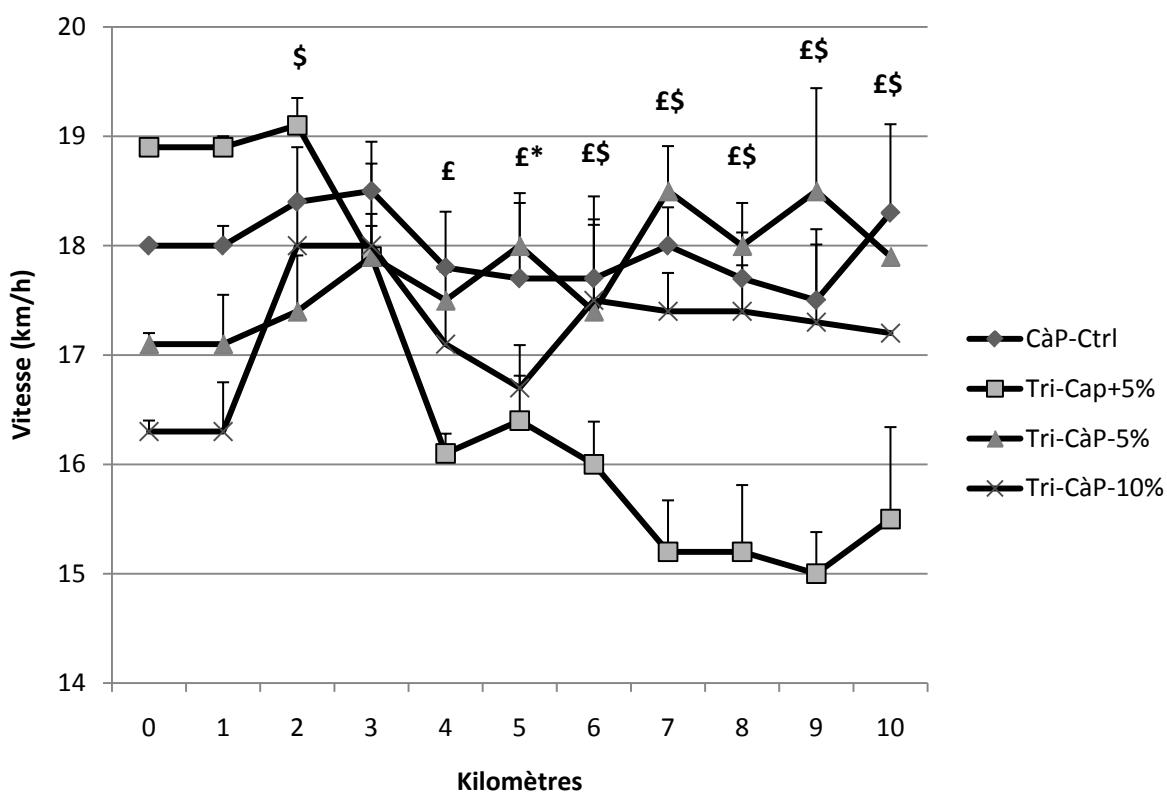


Figure 2. Evolutions de la vitesse moyenne ($\pm ET$) sur chaque kilomètre de la course contrôle (CàP-Ctrl) et des trois triathlons simulés, lors desquels la vitesse fut imposée 5% supérieure (Tri-CàP_{+5%}), 5% inférieure (Tri-CàP_{-5%}) ou 10% inférieure (Tri-CàP_{-10%}) de la vitesse moyenne lors de CàP-Réf. Les 9 derniers kilomètres étaient gérés librement. Toutes les valeurs de Tri-CàP_{+5%} étaient significativement plus faibles que celle du 1^{er} km (hormis celle du 2^{ème}), $p < 0,01$. Toutes les valeurs de Tri-CàP_{-10%} étaient significativement différentes de la vitesse initiale imposée (sauf pour le km5), $p < 0,01$. \$ Différence significative entre Tri-CàP_{+5%} et Tri-CàP_{-10%}, et entre Tri-CàP_{+5%} et Tri-CàP_{-5%}, $p < 0,05$. * Différence significative entre Tri-CàP_{-5%} et Tri-CàP_{-10%}, $p < 0,05$. £ Différence significative entre Tri-CàP_{+5%} et CàP-Réf, $p < 0,05$.

3.5. DISCUSSION PARTIELLE

Cette étude a démontré que les triathlètes de haut niveau tireraient bénéfice à réduire légèrement leur allure de course lors de la partie initiale d'un triathlon distance Olympique. Les résultats ont révélé que la stratégie d'allure adoptée lors de la transition cyclisme-course à pied est cruciale par rapport au développement de la phase pédestre dans son ensemble. Dans ce contexte, la meilleure stratégie est de parcourir le premier kilomètre à une allure 5% plus lente que l'allure moyenne adoptée lors d'une épreuve isolée sur 10km. Les triathlètes auraient ainsi intérêt à automatiser cette stratégie d'allure lors d'entraînement consistant à enchaîner cyclisme et course à pied, puisqu'aussi bien des allures plus hautes que plus basses engendrent une performance sous-optimale. Etant donné la très forte corrélation systématiquement rapportée tant chez les hommes que chez les femmes entre la performance isolée en course à pied et la position sur la ligne d'arrivée lors de triathlons de niveau international (Le Meur et al. 2009; Vleck et al. 2008; Vleck et al. 2006), l'optimisation de la stratégie d'allure en course à pied incarne potentiellement aujourd'hui le principal facteur d'optimisation à court terme de la performance chez les triathlètes de haut niveau.

4. ETUDE N°4 : RELATIONS ENTRE PERFORMANCE ET STRATEGIE D'ALLURE EN COURSE A PIED LORS D'UN TRIATHLON INTERNATIONAL (PUBLIEE DANS INTERNATIONAL JOURNAL OF SPORTS PHYSIOLOGY AND PERFORMANCE, SOUS PRESSE)

RESUME

Objectif : Le but de cette étude était de confronter les conclusions de l'étude n°3 (Hausswirth et al. 2010), fondées sur des épreuves individuelles contre-la-montre hors compétition, aux stratégies d'allure adoptées par les triathlètes lors d'une épreuve internationale majeure (départ en ligne).

Méthodes : Nous avons analysé les relations entre la stratégie d'allure en course à pied et la performance lors des Championnats d'Europe de triathlon distance Olympique 2009. Les temps intermédiaires des 107 arrivants (42 femmes et 65 hommes) ont été relevés grâce à cinq caméras synchronisées entre elles, disposées sur le circuit emprunté par la course à pied (4 tours de 2,42km). La vitesse de course et un indice de variabilité de la vitesse (IVV) ont été ensuite calculés sur chaque portion et pour la course entière, respectivement. **Résultats :** La vitesse sur les premiers 1272m était $0,76\text{km.h}^{-1}$ (+4,4%) et $1,00\text{km.h}^{-1}$ (+5,6%) plus élevée que la vitesse moyenne sur la même section lors des trois tours suivants, chez les femmes et les hommes, respectivement ($p < 0,001$). Une corrélation inverse significative a été constatée entre la performance en course à pied et la variabilité de la vitesse en considérant aussi bien l'ensemble de la population étudiée, les femmes et les hommes isolément, respectivement ($r = -0,41$, $p = 0,009$; $r = -0,65$, $p = 0,002$; $r = -0,76$, $p = 0,001$, pour les femmes, les hommes et tous les participants, respectivement). Les femmes ont révélé une plus grande variabilité de leur vitesse de course que les hommes ($6,1 \pm 0,5\text{km.h}^{-1}$ vs. $4,0 \pm 1,4\text{km.h}^{-1}$, pour les femmes et les hommes, respectivement, $p = 0,001$) en raison de leur plus grande baisse de vitesse dans les sections ascendantes du circuit. **Conclusion :** La stratégie d'allure adoptée par les triathlètes lors de la section pédestre est un facteur déterminant de la performance à haut niveau. Les triathlètes gagneraient à diminuer leur allure de course initiale lors des compétitions internationales, quand bien même leur haut niveau de motivation et la présence de leurs adversaires directs favorisent l'adoption d'une stratégie agressive.

4.1. BUT DE L'ETUDE

L'étude n°2 (Le Meur et al. 2009) et d'autres résultats collectés lors d'épreuves internationales distance Olympique (Vleck et al. 2008; Vleck et al. 2006) ont suggéré que la compréhension et l'amélioration de la stratégie d'allure adoptée en course à pied par les triathlètes de haut niveau est susceptible de jouer un rôle déterminant sur la performance globale réalisée. En effet, ces recherches ont montré qu'il existe une forte corrélation entre la position à l'arrivée et la performance en course à pied aussi bien chez les femmes que chez les hommes (coefficient de corrélation compris entre 0,71 et 0,99, $p < 0,01$) (Le Meur et al. 2009; Vleck et al. 2008; Vleck et al. 2006). Cette corrélation avec la performance globale était moins forte en considérant les performances en natation et en cyclisme isolément (coefficient de corrélation compris entre 0,36 et 0,52 pour la natation et inférieur à 0,74 pour le cyclisme). Dans ce contexte, ces études ont mis en évidence que les triathlètes ont tendance à progressivement réduire leur vitesse de course (stratégie d'allure décroissante) lors de la section pédestre des épreuves de Coupe du Monde. Par exemple, le premier kilomètre des épreuves internationales de Lausanne 2001 et 2002 a été couru significativement plus vite que toutes les autres sections du circuit, alors que c'est pourtant lors de cette phase que les altérations engendrées par le cyclisme sont les plus présentes (Vleck et al. 2008; Vleck et al. 2006). De même, l'étude n°2 a montré que l'ensemble des compétiteurs avait adopté une stratégie d'allure décroissante lors de l'épreuve de Coupe du Monde de Pékin en 2007. Lors de cette épreuve, le premier des 4 tours du circuit emprunté par la course à pied a été couru 10% plus vite que les trois tours suivants. Cette distribution du travail systématiquement observée chez les triathlètes « élite » est pourtant en contradiction avec les recommandations de la littérature scientifique qui soulignent les avantages d'une stratégie constante pour les épreuves de longue durée (Abbiss et Laursen 2008). De ce point de vue, plusieurs auteurs ont postulé que l'optimisation de la stratégie d'allure en course à pied incarne l'un des possibles axes de progression des triathlètes à haut niveau (Vleck et al. 2008; Vleck et al. 2006).

L'étude n°3 (Hausswirth et al. 2010) a mis en évidence que la performance de triathlètes très entraînés lors de la course à pied d'un triathlon contre-la-montre est optimisée lorsque le premier kilomètre est parcouru 5% plus lentement que leur allure moyenne adoptée lors d'un 10km isolé. Dans cette étude, une variation de 20s du temps nécessaire pour parcourir le premier kilomètre (210s vs. 190s, *i.e.* 17km.h^{-1} vs. 19km.h^{-1}) a mené à une amélioration de la performance de $150 \pm 21\text{s}$ sur le 10km du triathlon. Une diminution de la vitesse de course lors de l'enchaînement cyclisme-course à pied semble repousser l'apparition précoce de la fatigue et améliore la performance globale en course à pied par rapport à la stratégie de course systématiquement mise en place par les triathlètes, qui consiste à adopter un départ agressif. Il a été mis en évidence de l'évolution du niveau

de difficulté perçue serait le principal facteur d'influence de la régulation de la vitesse de course (Baron et al. 2010; Tucker 2009). Aussi, l'engagement d'un athlète lors d'une tâche (*i.e.* et sa stratégie d'allure) serait significativement influencé tant par des facteurs environnementaux (notamment les autres concurrents) que le niveau de motivation (Baron et al. 2010; Tucker 2009). Ceci suggère que la stratégie d'allure adoptée lors d'une compétition est pour partie déterminée par le contexte émotionnel particulier associé à la compétition. Dans cette perspective, Baron et al. (2010) ont fait l'hypothèse que les athlètes adoptent parfois un départ déraisonnablement rapide en compétition, par rapport à ce qu'ils ont l'habitude de faire à l'entraînement, en raison du haut niveau de motivation associé à la compétition. Etant donné le caractère contradictoire des résultats présentés par l'étude n°3 (Hausswirth et al. 2010) par rapport à la stratégie spontanément adoptée par les triathlètes en compétition à haut niveau, de nouvelles investigations sont nécessaires pour confirmer les bénéfices d'un départ moins agressif dans le cadre d'une compétition internationale (*i.e.* départ en ligne). Comme les stratégies d'allure sont fondées sur des représentations culturelles (Tucker et al. 2009) et tenant compte des très faibles écarts séparant les triathlètes sur la ligne d'arrivée lors des épreuves internationales (souvent < 30s entre le top 10 des triathlètes en Coupe du Monde), les informations concernant le meilleur moyen d'optimiser les ressources psychophysiologiques des triathlètes en compétition semblent d'une valeur potentielle importante.

L'objectif de cette étude a été de déterminer les relations existant entre la stratégie d'allure adoptée en course à pied et la performance lors d'une compétition internationale de triathlon distance Olympique. Etant donné que la stratégie d'allure peut influencer la performance en course pied qui apparaît déterminante en triathlon à haut niveau, nous avons étudié si les meilleurs coureurs révèlent des différences en termes d'évolution de leur vitesse de course lors du 10km d'un triathlon, indépendamment de leur sexe.

4.2. METHODES

4.2.1. PARTICIPANTS

La performance de 42 triathlètes féminines et 65 triathlètes masculins de haut niveau a été étudiée lors de ce travail de recherche. Le design expérimental de l'étude a été mené en accord avec la Déclaration d'Helsinki.

4.2.2. PROCEDURES

La performance en course à pied de chacun des triathlètes engagés lors d'une épreuve internationale de triathlon distance Olympique a été analysée (Championnats d'Europe de Triathlon, Pays-Bas, Holten, 5 juillet 2009). La section pédestre de cette compétition consistait en la réalisation de 4 tours vallonnés de 2,42km (total : 9,68km). Un dénivelé positif de 18m était réalisé chaque tour puisque les triathlètes devaient parcourir une montée de 335m à 3% de pente moyenne. Etant donné que toutes les autres portions du circuit présentaient une pente inférieure à $\pm 0,5\%$, aucune section n'était considérée comme descendante. Peu de vent a été constaté le jour de l'épreuve (moyenne $< 2\text{m.s}^{-1}$, d'après l'Institut Météorologique des Pays-Bas).

L'évolution de la vitesse en course à pied a été mesurée tout au long de l'épreuve grâce à 5 caméras synchronisées, permettant le relevé des temps de passage de l'ensemble des triathlètes au départ de la course à pied (*i.e.* à la sortie du parc vélo), après 283m, 937m, 1272m et 1829m. La distance entre ces points a été mesurées en utilisant à la fois un système de mesure GPS et un odomètre.

4.2.3. TRAITEMENT DES DONNEES

Les temps nécessaires pour parcourir le circuit pédestre dans son ensemble, chaque tour et chaque section (*i.e.* montée et portions planes) ont été déterminés pour chaque triathlète via l'analyse des données vidéographiques collectées. La vitesse de course était ainsi calculée pour les sections suivantes : 0-283m (plat), 283-937m (plat), 937-1272m (montée), 1272-1829m (plat) et 1829-2420m (plat). Afin de comparer les vitesses de course atteintes lors de chaque tour et sur chaque section du circuit, les données ont été regroupées pour chacun des quatre tours, ainsi que pour les sections planes et les montées, indépendamment.

La différence de vitesse sur le plat et en montée ($\Delta_{P/M}$, %) a été calculée pour chaque triathlète selon l'équation suivante :

$$\Delta P/M = \frac{\text{Vitesse moyenne sur les portions planes} - \text{Vitesse moyenne dans les montées}}{\text{Vitesse moyenne sur les portions planes}}$$

Pour étudier la stratégie d'allure adoptée par les triathlètes, un indice de variabilité de la vitesse de course sur le circuit entier (IVV_{course} , km.h^{-1}) grâce à l'équation suivante :

$$IVV_{course} = \frac{\sum_{n=1}^{20} ((\text{Vitesse sur la section (n)} - \text{Moyenne de course}) * \text{Temps pour parcourir sur la section (n)})}{\text{Temps de course global}}$$

Des indices de variabilité de la vitesse de course lors de chaque tour (IVV_{tour} , $km.h^{-1}$), sur les portions planes (IVV_{plat} , $km.h^{-1}$) et dans les montées ($IVV_{montée}$, $km.h^{-1}$) ont par ailleurs été mesurés indépendamment selon des méthodes de calcul similaire.

4.3. ANALYSE STATISTIQUE

Les effets des sections du circuit (*i.e.* plat / montée) et des tours ont été analysés grâce à une ANOVA à une voie à mesures répétées en utilisant la vitesse de course, IVV_{course} et $\Delta_{P/M}$ comme variables dépendantes. Une ANOVA à une voie a été utilisée pour déterminer l'effet du sexe sur $\Delta_{P/M}$, IVV_{course} , IVV_{plat} et $IVV_{montée}$. Lorsqu'un effet significatif était observé, un test *post-hoc* de Tukey a été employé pour déterminer les différences entre les sections du circuit pédestre (*i.e.* montée et plat) et les différents tours de la course. Un test de corrélation de Pearson a été utilisé pour déterminer les relations entre IVV_{course} et la vitesse de course moyenne sur l'ensemble de l'épreuve pédestre. L'équation de la fonction linéaire $f(x)$: $IVV = a * \text{vitesse de course} + b$ a été calculée pour l'ensemble des triathlètes étudiés ainsi que pour les femmes et les hommes, considérés isolément, en considérant aussi bien le circuit entier, que chaque tour de l'épreuve. Le seuil de significativité était accepté à $p < 0,05$.

4.4. RESULTATS

4.4.1. PERFORMANCE GLOBALE

Le temps total nécessaire pour réaliser l'épreuve a été de 121 ± 4 min et de 108 ± 3 min, pour les femmes et les hommes, respectivement.

4.4.2. VITESSE DE COURSE

La performance sur la partie course à pied a été de $37\text{min}32\text{s} \pm 3\text{min}$ ($15,6 \pm 1,0 km.h^{-1}$) pour les femmes et de $33\text{min}20\text{s} \pm 2\text{min}$ ($17,4 \pm 1,1 km.h^{-1}$) pour les hommes. La figure 1 représente l'évolution de la vitesse de course chez les femmes et les hommes tout au long de l'épreuve.

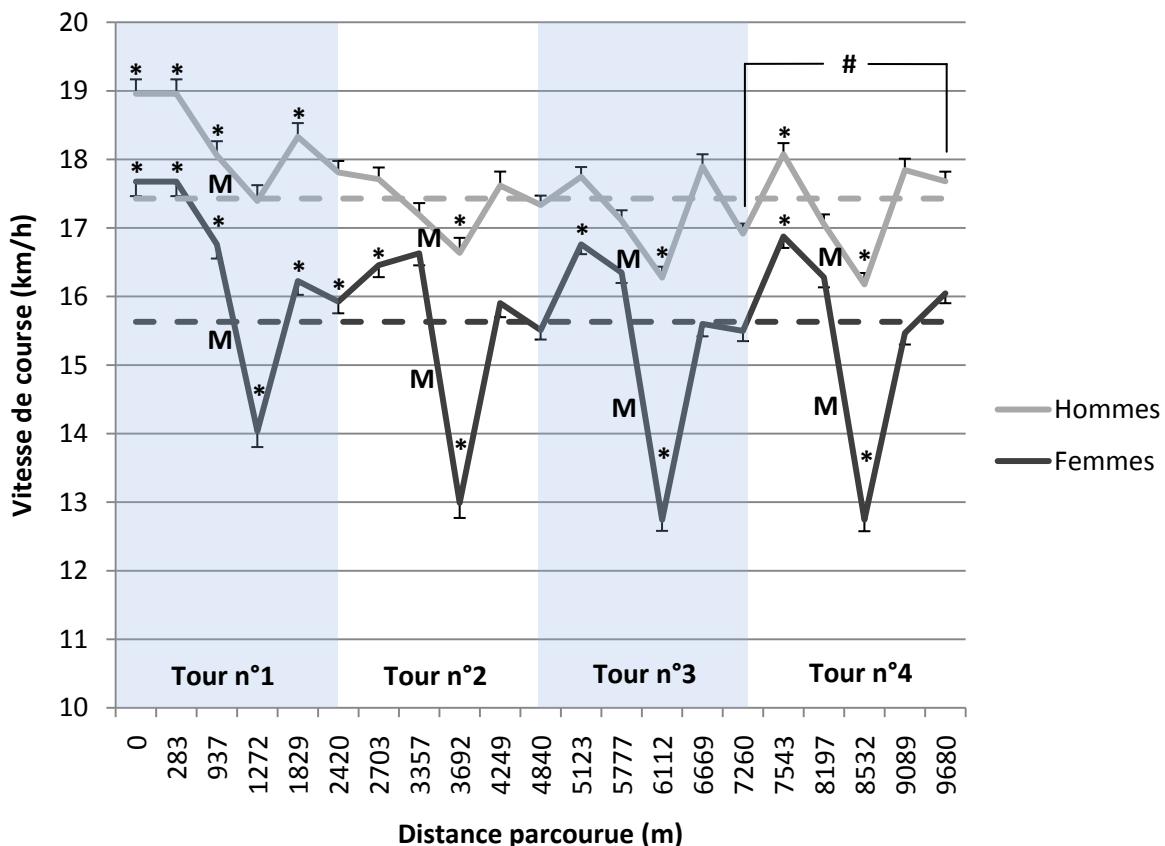


Figure 1. Evolution de la vitesse de course moyenne lors des Championnats d'Europe de triathlon distance Olympique 2009 chez les femmes ($n = 39$) et les hommes ($n = 55$) ayant franchi la ligne d'arrivée. Les droites en pointillés représentent la vitesse de course moyenne sur l'ensemble du 10km.. M: sections ascendantes (les portions ne portant pas de mention particulière étaient planes). *Significativement différent de la vitesse moyenne adoptée sur l'ensemble du circuit pédestre, $p < 0,05$. #Significativement différent de la vitesse adoptée sur la même section lors du tour précédent, $p < 0,05$.

Les valeurs détaillées de vitesse de course sont présentées dans le [Tableau 1](#). La vitesse de course moyenne sur les 1272 premiers mètres du tour 1 était supérieure de $0,76\text{km.h}^{-1}$ (+4,4 %) et de $1,00\text{km.h}^{-1}$ (+5,6%) à la vitesse de course moyenne sur la même section du circuit lors des trois derniers tours de l'épreuve pédestre, chez les femmes et les hommes, respectivement ($p < 0,001$). Un résultat similaire a été constaté en considérant le circuit tout entier (+0,6 km.h^{-1} et +3,7% pour les femmes et +0,8 km.h^{-1} et +4,3% pour les hommes, respectivement, $p < 0,0001$), les sections planes (+0,5 km.h^{-1} et +2,7% pour les femmes et +0,7 km.h^{-1} et +4,0% pour les hommes, respectivement, $p < 0,0001$) et les sections ascendantes isolément (+1,2 km.h^{-1} et +8,6% pour les femmes et +1,0 km.h^{-1} et +5,9% pour les hommes, respectivement, $p < 0,0001$) ([Tableau 1](#)). La vitesse (km.h^{-1}) à chaque point du circuit pédestre est représentée dans la [Figure 1](#). 37 des 95 arrivants (12 femmes et 25 hommes) ont démontré une augmentation d'au moins 5% de leur allure de déplacement sur la

dernière section de 591m menant à la ligne d'arrivée (tour 4), par rapport au tour précédent. Pour 11 d'entre eux (3 femmes et 8 hommes), cette augmentation était supérieure à 10%.

Sexe	Sections du circuit	Course entière	Tour 1	Tour 2	Tour 3	Tour 4
Femmes	Global (km.h ⁻¹)	15,6 ± 1,0	16,1 ± 1,0	15,6 ± 1,0 ^{*#}	15,4 ± 1,0 [*]	15,5 ± 1,1 [*]
	Plat (km.h ⁻¹)	16,1 ± 1,0	16,5 ± 1,0	16,1 ± 1,0 ^{*#}	16,0 ± 1,0 ^{*#}	16,1 ± 1,0 [*]
	Montée (km.h ⁻¹)	13,1 ± 0,9	14,0 ± 1,2	13,0 ± 0,9 ^{*#}	12,7 ± 0,8 ^{*#}	12,7 ± 0,8 [*]
	Δplat/montée (%)	18,9 ± 1,2	15,0 ± 0,5	19,2 ± 0,3 ^{*#}	20,2 ± 0,3 [*]	20,7 ± 0,3 [*]
Hommes	Global (km.h ⁻¹)	17,4 ± 1,1	18,0 ± 1,4	17,3 ± 1,2 ^{*#}	17,1 ± 1,1 ^{*#}	17,3 ± 1,0 [*]
	Plat (km.h ⁻¹)	17,6 ± 1,1	18,1 ± 1,2	17,4 ± 1,2 ^{*#}	17,3 ± 1,1 ^{*#}	17,5 ± 1,1 [*]
	Montée (km.h ⁻¹)	16,6 ± 1,1	17,4 ± 1,7	16,6 ± 1,6 ^{*#}	16,3 ± 1,2 ^{*#}	16,2 ± 1,2 [*]
	Δplat/montée (%)	5,9 ± 2,5	4,4 ± 0,5	4,5 ± 0,8	6,2 ± 0,4	8,0 ± 0,4 ^{*#}

Tableau 1. Vitesse de course au cours de la section pédestre de l'épreuve sur le circuit entier, les sections planes et dans les montées, chez triathlètes féminines et masculins ($n = 39$ et $n = 56$ pour les femmes et pour les hommes, respectivement). *Significativement différent du Tour 1, $p < 0,0001$. [#]Significativement différent du tour précédent, $p < 0,0001$. Les femmes ont démontré une différence significative par rapport aux hommes lors de chaque tour en termes de vitesse de course et de différence d'allure entre les sections planes et ascendantes du circuit (Δ plat/montée).

Les valeurs moyennes de vitesse de course sur chaque profil de dénivelé (*i.e.* plat ou montée) ainsi que les valeurs de $\Delta_{P/M}$ sont présentées dans le [Tableau 1](#). Les triathlètes féminines ont révélé des valeurs de $\Delta_{P/M}$ supérieures à celles de leurs homologues masculins lors de chaque tour ($p < 0,0001$, [Tableau 1](#)). $\Delta_{P/M}$ a augmenté significativement après le tour 1 chez les femmes ($p < 0,0001$), tandis que ce paramètre a demeuré stable jusqu'au tour 3 chez les hommes ($p = 0,99$, $p = 0,04$, $p = 0,001$ entre le tour 1 et les tours 2, 3, 4, respectivement, [Tableau 1](#)).

4.4.3. VARIABILITE DE LA VITESSE DE COURSE

Une corrélation inverse significative a été constatée entre la vitesse de moyenne de course et IVV_{course} chez tous les triathlètes, indépendamment de leur sexe ($r = -0,41$, $p = 0,009$; $r = -0,65$, $p = 0,002$; $r = -0,76$, $p = 0,001$, pour les femmes, les hommes et en considérant toute la population étudiée, respectivement, [Figure 2](#)).

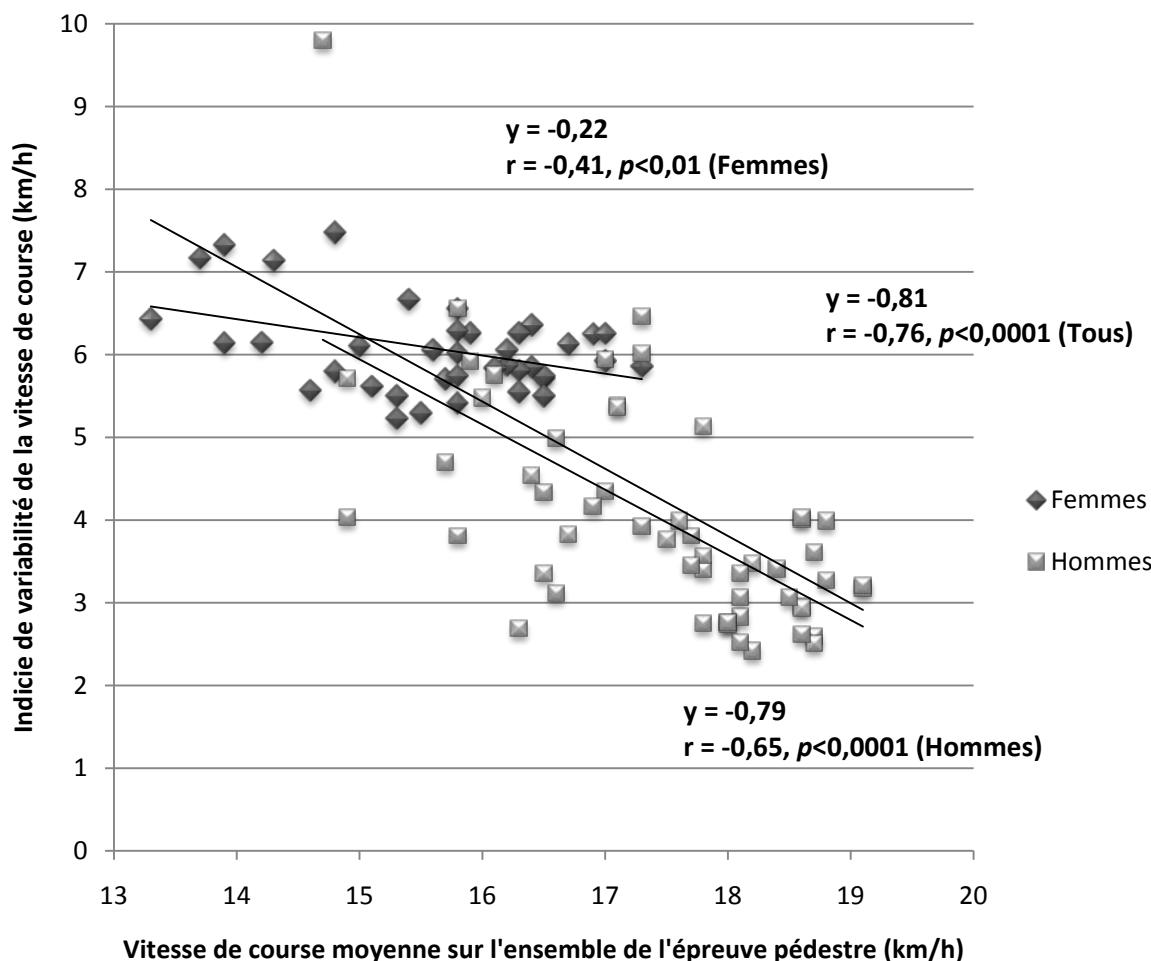


Figure 2. Indices de variabilité de la vitesse de course sur l'ensemble du circuit pédestre en considérant les hommes ($n = 55$), les femmes ($n = 39$) et l'ensemble des participants lors des Championnats d'Europe de Triathlon.

Un résultat similaire a été rapporté en considérant chaque tour indépendamment ($r = -0,61$, $-0,75$, $-0,57$ et $-0,57$, pour les tours 1, 2, 3 et 4, respectivement, en considérant l'ensemble des triathlètes de l'épreuve, $p < 0,001$). Les triathlètes féminines ont démontré une valeur moyenne de IVV_{course} supérieure à celle des hommes ($6,1 \pm 0,5 \text{ km.h}^{-1}$ et $4,0 \pm 1,4 \text{ km.h}^{-1}$, pour les femmes et les hommes, respectivement, $p = 0,001$, [Figure 2](#)). IVV_{tour} a augmenté après le tour 1 chez les femmes (+23,8%, +24,6% et +31,6% pour les tour 2, 3 et 4 par rapport au tour 1, respectivement, $p < 0,001$, [Figure 3](#)), alors qu'aucune différence significative n'a été constatée avant le tour 4 chez les hommes (+6,8%, $p = 0,88$; +21,9%, $p = 0,07$; +46,6%, $p = 0,004$, pour les tour 2, 3 et 4, par rapport au tour 1, respectivement, [Figure 3](#)).

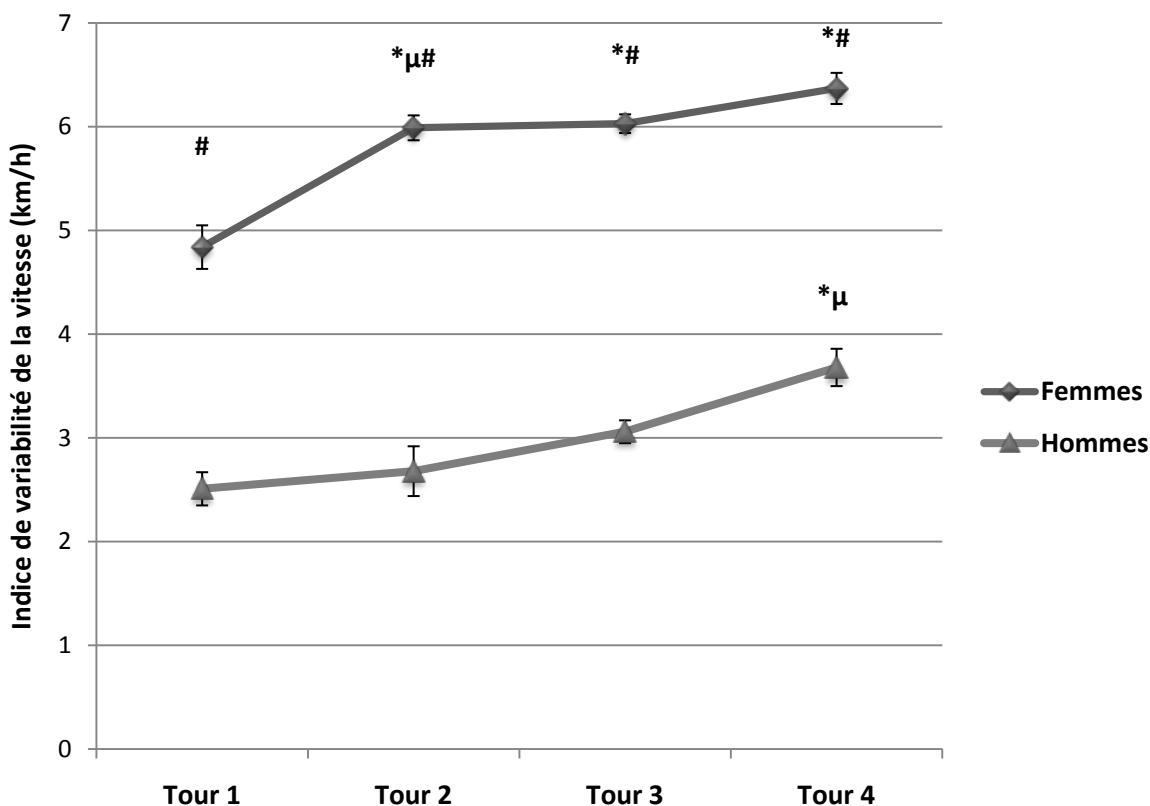


Figure 3. Evolution de l'indice de variabilité de la vitesse de course moyen chez les femmes ($n = 39$) et les hommes ($n = 55$) lors des Championnats d'Europe de triathlon 2009. *Significativement différent du tour 1. ^aSignificativement du tour précédent. ^bSignificativement différent des hommes sur le même tour.

La fonction linéaire représentative $f(x) : IVV_{course} = a * \text{Vitesse} + b$ a démontré une plus grande hétérogénéité de la variabilité de la vitesse de course entre les concurrents chez les hommes que chez les femmes étant donné qu'une plus grande pente (en valeur absolue) était constatée pour les hommes par rapport aux femmes ($|a| = 0.22$ (0,05–0,38) ; moyenne (intervalle de confiance à 95%), et $|a| = 0,79$ (0,53 – 1,04) pour les femmes et les hommes, respectivement, [Figure 2](#)).

Les résultats ont révélé une corrélation inverse significative entre IVV_{plat} et Vitesse_{plat} aussi bien chez les femmes que les hommes isolément, que pour la population toute entière ($r = -0,41, p = 0,01$; $r = -0,60, p = 0,0001$; $r = -0,37, p = 0,001$, pour les femmes, les hommes et toute la population, respectivement, [Figure 2](#)). La corrélation entre $IVV_{montée}$ et $\text{Vitesse}_{montée}$ était significative chez les hommes ($a = -0,78, r = -0,44, p < 0,0001$) mais non chez les femmes ($p = 0,09$) et pour la population entière ($p = 0,88$). Aucun effet significatif du sexe a été constaté concernant IVV_{plat} ($p = 0,23$) et $IVV_{montée}$ ($p = 0,15$).

4.5. DISCUSSION PARTIELLE

Cette étude a montré que la performance en course à pied (et la position sur la ligne d'arrivée) lors des Championnats d'Europe de triathlon distance Olympique 2009 était significativement corrélée avec la variabilité de la vitesse de course. Les meilleurs triathlètes féminines et masculins ont démontré une tendance à adopter une stratégie d'allure plus constante, tandis que leurs adversaires choisissent une stratégie déraisonnablement agressive lors de la phase initiale de la course à pied engendrant une baisse progressive de leur vitesse au fur et à mesure de la course. Ces résultats renforcent les conclusions de l'étude n°3 (Hausswirth et al. 2010) en suggérant que les triathlètes « élite » devraient réduire leur vitesse de course initiale lors de compétitions internationales majeures, quand bien même leur haut niveau de motivation et la présence de leurs adversaires directs les portent à adopter un départ rapide. De nouvelles études sont nécessaires pour déterminer d'une part la manière dont les triathlètes programment leur intensité d'exercice en situation de compétition et quelles procédures sont susceptibles de tempérer leur stratégie d'allure initiale en vue d'une optimisation de leur niveau de performance en course à pied. Cette recherche a par ailleurs mis en exergue que la performance en triathlon à haut niveau est potentiellement associée à la capacité à atteindre une haute vitesse de course à la fin du 10km et que les triathlètes féminines auraient avantage à développer leur aptitude à courir en montée via l'amélioration de leur technique de course et de leur ratio puissance/poids.

5. ETUDE N°5 : EVOLUTION DES PARAMETRES METABOLIQUES, NEUROMUSCULAIRES, BIOMECANIQUES ET PERCEPTUELS LORS D'UNE EPREUVE CYCLISME-COURSE A PIED MENEES A L'EPUISEMENT VOLONTAIRE PAR DES TRIATHLETES ENTRAINES (EN COURS D'EXPERTISE)

RESUME

Objectif : Le but de cette étude était d'identifier si la réalisation d'un enchaînement cyclisme-course à pied mené à l'épuisement volontaire par des triathlètes entraînés engendre des perturbations physiologiques, biomécaniques et/ou perceptuelles susceptibles d'expliquer pourquoi les triathlètes ne sont pas capables de maintenir une vitesse de course initiale imposée. **Méthodes :** 10 triathlètes entraînés ont réalisé 3 sessions de tests en laboratoire. Chaque participant a accompli 2 tests incrémentés maximaux (un en cyclisme, un en course à pied) pour déterminer les puissances associées aux seuils ventilatoires en cyclisme, son seuil d'accumulation de l'acide lactique en course à pied (SAAL) et sa consommation maximale d'oxygène dans ces deux disciplines ($\dot{V}O_{2\max}$). Lors du 3^{ème} test, les triathlètes ont réalisé une course-contrôle de 5min à V_{SAAL} (CàP-Ctrl) et un enchaînement cyclisme-course à pied mené à l'épuisement volontaire [30min à $\sim 80\%$ de $\dot{V}O_{2\max}$ puis une épreuve de course temps-limite à V_{SAAL} (T_{lim})]. **Résultats :** Tous les paramètres ($\dot{V}O_2$, débit ventilatoire, fréquence cardiaque, lactatémie) mesurés durant T_{lim} sont demeurés significativement plus faibles que leur valeur maximale respective atteinte lors du test de course incrémentée ($p < 0,05$), contrairement au niveau de difficulté perçue ($p = 0,71$). La valeur RMS moyenne du signal EMG lors de la foulée, le timing d'activation et le coefficient de *cross-correlation* n'ont pas révélé de différence significative durant T_{lim} pour l'ensemble des muscles investigués, hormis le *rectus femoris*. Les paramètres de la foulée (fréquence/longueur de foulée et temps de vol/contact) et la raideur du membre inférieur étaient similaires lors de CàP-Ctrl et à la fin de T_{lim} . **Conclusion :** Ces résultats suggèrent que les triathlètes ont stoppé l'exercice lors d'un enchaînement cyclisme-course à pied mené à l'épuisement volontaire, sans que la preuve d'une défaillance d'un système physiologique ne puisse être démontrée, et alors qu'ils avaient atteint un niveau de difficulté d'effort perçue tolérable maximal.

5.1. BUT DE L'ETUDE

Les études n°2 (Le Meur et al. 2009) et n°4 (Le Meur et al. in press) ainsi que les travaux de Vleck et al. (Vleck et al. 2008; Vleck et al. 2006) réalisés lors de compétitions internationales de triathlon distance Olympique, ont mis en évidence que la performance globale est fortement déterminée par leur performance en course à pied. Ces études ont mis en exergue que les triathlètes « élite » adoptent systématiquement un départ rapide avant de réduire leur allure de course (Le Meur et al. in press; Le Meur et al. 2009; Vleck et al. 2008; Vleck et al. 2006). L'étude n°4 (Le Meur et al. in press) a montré que les meilleurs triathlètes révèlent une moindre variabilité de leur allure de course à pied que leurs autres concurrents, grâce à un meilleur maintien de leur vitesse initiale. Dans cette perspective, la performance en course à pied lors d'un triathlon est probablement liée à la capacité du triathlète à résister à la fatigue, tel que l'ont suggéré plusieurs études menées sur la compréhension des stratégies d'allure décroissante (Abbiss et Laursen 2008). Ce qui précisément cause cette fatigue demeure pour autant controversé. Bien que différentes recherches aient caractérisé les effets de la natation (Delextrat et al. 2003a; Delextrat et al. 2005; Delextrat et al. 2003b; Peeling et al. 2005a) et du cyclisme (Bernard et al. 2003; Bernard et al. 2007; Hausswirth et al. 1996; Hausswirth et al. 2000; Hausswirth et al. 2001) sur le mode de locomotion subséquent en triathlon, aucune explication précise n'est disponible dans la littérature à l'heure actuelle.

Les recherches sur les relations entre la fatigue et la performance en triathlon distance Olympique (< 2h d'effort) révèlent différentes théories. La majorité d'entre elles a souligné que la performance en triathlon est principalement déterminée par la capacité des systèmes respiratoires et cardiovasculaires à ajuster leurs réponses en fonction de la demande musculaire imposée par l'exercice (modèle cardiorespiratoire/anaérobie de la fatigue). Galy et al. (2008) ont montré que lors d'un enchaînement cyclisme-course à pied réalisé à 75% de $\dot{V}O_{2\max}$ et mené à épuisement par des triathlètes très entraînés, on constate la survenue d'un phénomène d'hypoxémie induite par l'exercice, susceptible d'affecter leur performance en course à pied. De même, Vercruyssen et al. (2005) ont démontré que la performance en course à pied est améliorée lors d'un enchainement maximal cyclisme-course à pied (i.e. 30min de cyclisme à 90% du seuil anaérobie suivi d'une épreuve temps-limite en course à pied à 85% de la vitesse associée à l'atteinte de $\dot{V}O_{2\max}$), lorsque la charge métabolique du cyclisme est réduite grâce à une baisse de la fréquence de pédalage adoptée préalablement. Dans une autre perspective, Hausswirth et al. (2000) ont rapporté une baisse significative de la fréquence moyenne du signal EMG mesurée au niveau du muscle *vastus lateralis* lors d'une contraction isométrique maintenue 4s à 35% de la force maximale volontaire, après un triathlon simulé (30min de natation, 60min de pédalage et 45min de course à pied sur tapis roulant à 75% de la vitesse maximale aérobie). De plus, l'amplitude du signal EMG avait augmenté

significativement après le triathlon par rapport à sa valeur pré-exercice. Ces résultats suggèrent que la fatigue engendrée par la course à pied d'un triathlon est possiblement associée à l'incapacité du système périphérique à maintenir son activité tout au long de la course à pied. Dans une autre perspective, l'étude n°3 (Hausswirth et al. 2010) suggère que l'allure de course lors d'un triathlon distance Olympique est régulée au niveau central, de sorte à prévenir la survenue de dommages physiologiques sévères durant l'épreuve (modèle du gouverneur / contrôleur central). De ce point de vue, la sensation de fatigue ressentie par les triathlètes lors de la course à pied d'un triathlon serait le résultat d'un contrôle central préprogrammé et modifié par des feedbacks afférents en provenance de multiples origines physiologiques. D'après cette approche, l'augmentation de la difficulté d'effort perçue réduirait progressivement le désir conscient de dépasser ce mécanisme de contrôle, menant de la sorte à une réduction du travail fourni ou à l'arrêt de l'exercice si l'intensité de celui-ci est fixé de manière externe (Tucker et Noakes 2009). D'autres hypothèses explicatives de la fatigue dans les activités de longue durée sont par ailleurs susceptibles d'expliquer la fatigue dans les activités de longue durée et renvoient à des hypothèses concernant les mécanismes de thermorégulation, les processus affectifs et motivationnels, les dommages musculaires ou encore la modification des paramètres biomécaniques du mouvement (Abbiss et Laursen 2005).

L'objectif de la présente expérimentation a été de déterminer quel(s) paramètre(s) est (sont) susceptible(s) d'expliquer l'incapacité des triathlètes entraînés à maintenir une vitesse de course initiale imposée lors d'une épreuve enchaînée réalisée en laboratoire.

5.2. METHODES

Cette étude a été menée entre avril et mai, juste avant la période compétitive en triathlon. Dix triathlètes masculins entraînés et motivés ont été sélectionnés ([Tableau 1](#)). Leur sélection a été fondée sur leur meilleure performance sur triathlon distance Olympique au cours de la saison précédente de sorte à constituer un groupe relativement homogène en terme de niveau de pratique (performance moyenne de $2h15 \pm 5min$). Ces triathlètes avaient parcouru en moyenne $202 \pm 30km$ et $39 \pm 12km$ par semaine en cyclisme et en course à pied, respectivement, durant les 4 mois ayant précédé l'étude. Tous ont été informés des risques possibles associés à leur participation à l'étude et ont donné leur consentement écrit avant que celle-ci ne soit initiée. Le design expérimental de ce projet a été conçu en accord avec la Déclaration d'Helsinki.

	Age (années)	30 ± 6
	Poids (kg)	68,4 ± 7,4
	Taille (cm)	175 ± 4
Cyclisme	̇V̇O ₂ max (mLO ₂ .min ⁻¹ .kg ⁻¹)	63,0 ± 4,3
	PMA (W)	347 ± 29
	P _{SV1} (W)	219 ± 24
	P _{SV1} (%̇V̇O ₂ max)	70,6 ± 5,0
	P _{SV2} (W)	280 ± 30
	P _{SV2} (%̇V̇O ₂ max)	87,7 ± 4,9
Course à pied	̇V̇O ₂ max (mLO ₂ .min ⁻¹ .kg ⁻¹)	61,6 ± 3,7
	Vitesse maximale atteinte (km.h ⁻¹)	18,5 ± 0,7
	V _{SAAL} (km.h ⁻¹)	15,7 ± 0,6
	V _{SAAL} (%̇V̇O ₂ max)	86,9 ± 4,6

Tableau 1. Caractéristiques des triathlètes de l'étude ($n = 10$). Les valeurs sont exprimées en moyenne ± écart-type. $\dot{V}O_{2\max}$: consommation maximale d'oxygène, PMA: Puissance Maximale Aérobique, P_{SV1} : Puissance au premier seuil ventilatoire, P_{SV2} : Puissance au deuxième seuil ventilatoire, V_{SAAL} : vitesse au seuil d'accumulation de l'acide lactique.

5.2.1. PROTOCOLE EXPERIMENTAL

Chaque triathlète a participé à trois sessions expérimentales regroupées en une période de 15 jours. Durant tout le protocole, il était demandé aux triathlètes de ne réaliser aucun exercice fatigant lors des 48h précédent chaque test. Chaque session expérimentale était réalisée à la même heure dans un laboratoire dont l'ambiance était maintenue à une température constante de 20°C et un taux d'humidité entre 35 et 45%.

5.2.1.1. TEST MAXIMAL EN CYCLISME

Chaque triathlète a réalisé le test cycliste maximal incrémenté décrit dans l'étude n°1 afin de déterminer ($\dot{V}O_{2\max}$, FC_{\max} , la puissance maximale aérobie (PMA), les puissances au premier et au second seuils ventilatoires (P_{SV1} et P_{SV2} , respectivement).

5.2.1.2. TEST MAXIMAL EN COURSE A PIED

Tous les triathlètes ont réalisé le test maximal en course à pied présenté dans l'étude n°3, ce qui a permis d'identifier pour cette discipline $\dot{V}O_{2\max}$, FC_{\max} , la vitesse maximale aérobie (VMA), la

vitesse au seuil d'accumulation de l'acide lactique (V_{SAAL}) et la difficulté d'effort perçue atteinte à la fin de ce test.

5.2.1.3. COURSE-CONTROLE ET EPREUVE MAXIMALE CYCLISME-COURSE A PIED MENEES A EPUISEMENT

Ce troisième test était initié par un échauffement en course à pied de 20min sur le tapis roulant (*i.e.* 15min à 11km.h^{-1} puis 5min à 13km.h^{-1}) succédé de 5 min de récupération. Dès lors, les sujets devaient courir durant 5min à V_{SAAL} . Ces 5min de course constituaient la course à pied-contrôle (CàP-Ctrl).

Après 10min de récupération passive, une récupération active de 10min à 150W était réalisée de sorte à assurer une récupération complète. Dès lors, il leur était demandé d'accomplir une épreuve maximale cyclisme-course à pied consistant en 30min de pédalage à une l'intensité moyenne comprise entre P_{SV1} et P_{SV2} puis à réaliser une épreuve temps-limite en course à pied à $V_{SAAL}(T_{lim})$. D'après des études menées sur les effets du cyclisme sur la performance en course à pied (Vercruyssen et al. 2002; Vercruyssen et al. 2005), cette intensité d'exercice reflète celle atteinte par les triathlètes lors de la section cycliste d'épreuves sprint (750m natation – 20km en cyclisme – 5km en course à pied). La section pédestre était réalisée sur l'ergocycle employé lors du test maximal incrémenté, permettant aux triathlètes de maintenir une puissance de sortie constante indépendamment de leur cadence de pédalage. La cadence de pédalage était laissée libre durant tout le test. Afin de s'assurer que les triathlètes donnaient le meilleur d'eux-mêmes, ils étaient vigoureusement encouragés tout au long de T_{lim} . Le temps moyen de transition ($\pm ET$) entre la phase cycliste et la course à pied ($76 \pm 14\text{s}$) était représentatif de celui habituellement constaté en compétition (Millet et Vleck 2000).

5.2.1.3.1. PARAMETRES PHYSIOLOGIQUES

Les valeurs de $\dot{V}O_2$, $\dot{V}E$, QR, FC, VC et FR étaient mesurés tout au long de la course-contrôle et de l'épreuve maximale enchaînée avec le même analyseur des gaz employé lors des tests maximaux incrémentés. Des échantillons de sang ($5\mu\text{L}$) étaient collectés au lobe de l'oreille afin de mesurer la lactatémie ($[La^-]_s$) à de la fin de la phase cycliste et de T_{lim} .

5.2.1.3.2. PARAMETRES CINEMATIQUES ET CALCUL DE LA RAIDEUR DU MEMBRE INFÉRIEUR

Les paramètres cinématiques simples de la foulée (amplitude/fréquence de foulée, temps de vol et de contact) ont été mesurés tout au long de CàP-Ctrl et T_{lim} grâce à des capteurs de pression (Interlink Electronics, Camarillo, Etats-Unis) placés sous la semelle intérieure de chaque chaussure, au

niveau du talon et du premier métatarsé. Ces capteurs étaient reliés à un système d'enregistrement portable (ME6000, Mega Electronics Ltd., Kuopio, Finland). Les analyses subséquentes ont été réalisées avec le logiciel Origin 6.1. (OriginLab, Northampton, Etats-Unis). Les enregistrements étaient synchronisés temporellement.

Le recueil de ces données a permis de calculer la raideur des membres inférieurs tout au long de CàP-Ctrl et de T_{lim} grâce au modèle proposé par Morin et al. (2005).

F_{max} et Δy_c ont été calculés à partir de la formule de Morin et al. (2005):

$$F_{max} = \frac{mg\pi(\frac{t_f}{t_c} + 1)}{2}$$

et

$$\Delta y_c = \text{abs} \left(-F_{max} \cdot \frac{t_c^2}{m\pi^2} + g \cdot \frac{t_c^2}{8} \right)$$

où m représente la masse corporelle, g l'accélération liée à la gravité, t_f le temps de vol et t_c le temps de contact à chaque appui.

D'après Morin et al. (2005), K_{leg} (kN.m^{-1}) est défini comme le ratio entre le pic de force estimé (F_{max} ; kN) et la compression estimée du membre inférieur (ΔL ; m) calculée à partir de la longueur initiale de celui-ci L (distance séparant le grand trochanter du sol dans une position debout). Ainsi, K_{leg} était calculé de la manière suivante :

$$K_{leg} = F_{max} \cdot \Delta L^{-1}$$

avec

$$\Delta L = L - \sqrt{L^2 - \left(\frac{v \cdot t_c}{2}\right)^2} + \Delta y_c$$

où v représente la vitesse de déplacement horizontal du corps (m.s^{-1}) et t_c le temps de contact au sol à chaque pas. D'après Morin et al. (2005), la longueur initiale de la jambe d'un sujet peut être modélisée selon l'équation suivante:

où h représente la taille du sujet (en m). Cette équation est basée sur les paramètres anthropométriques standards de Winter (1979). Le modèle de Winter a été retenu car il incarne un modèle largement accepté pour estimer la longueur des segments d'un individu à partir de sa taille, et car l'estimation de cette valeur n'influence que faiblement les variations de valeurs de raideur (Morin et al. 2005).

5.2.1.3.3. PARAMETRES ELECTROMYOGRAPHIQUES

L'activité électromyographique (EMG) de neuf muscles du membre inférieur droit a été mesurée en continu tout au long de CàP-Ctrl et de T_{lim} avec des paires d'électrodes de surface Ag/AgCl (Blue Sensor Q-OO-S, Medicotest SARL, France). Les muscles concernés étaient : *tibialis anterior* (TA), *soleus* (SOL), *gastrocnemius lateralis* (GaL), *gastrocnemius medialis* (GaM), *vastus lateralis* (VL), *vastus medialis* (VM), *rectus femoris* (RF), *semimembranosus* (SM), and *biceps femoris* (BF). Les électrodes étaient disposées longitudinalement par rapport au grand axe du muscle, en respectant l'arrangement des fibres et les recommandations internationales concernant le placement des électrodes pour l'analyse EMG de surface (SENIAM). Les câbles permettant la liaison au système d'acquisition étaient solidement sécurisés à la peau par du ruban adhésif de sorte à limiter les artefacts engendrés par les mouvements de câble. Les signaux EMG étaient pré-amplifiés proches des électrodes (avec un gain de 375), filtrés (8 – 500Hz), amplifiés (ME6000, Mega Electronics Ltd., Kuopio, Finland) et convertis en signal digital à une fréquence d'échantillonnage de 1kHz. Les variables EMG étaient recueillies par l'enregistreur portable qui assurait l'acquisition des données émises par les capteurs de pression situés sous la semelle de la chaussure droite, ce qui permettait la synchronisation temporelle des données collectées. Les valeurs efficaces (RMS) de l'activité EMG durant le cycle de foulée entier ($RMS_{foulée}$) et le décalage temporel k résultant de la technique de *cross-correlation* étaient moyennées sur les mêmes périodes que les paramètres physiologiques et cinématiques.

5.2.1.3.4. DIFFICULTE D'EFFORT PERÇUE

La difficulté d'effort perçue était mesurée en utilisant l'échelle de Borg (Borg 1970). L'utilisation de celle-ci avait été au préalable expliquée avec soin aux sujets avant chaque test maximal incrémenté et avant le test temps-limite. Il était demandé aux triathlètes de quantifier leur difficulté d'effort perçue à la fin de CàP-Ctrl, à la fin de la phase cycliste et immédiatement à la fin de T_{lim} .

5.2.2. TRAITEMENT DES DONNEES

Les valeurs de $\dot{V}O_2$, $\dot{V}E$, $\dot{V}O_2/\dot{V}E$, $\dot{V}CO_2/\dot{V}E$, RER et FC ont été moyennées sur des périodes de 30s après 4min lors de CàP-Ctrl (pour assurer l'atteinte d'un état stable de ces paramètres), immédiatement au début de la transition cyclisme-course à pied ($T_{lim5\%}$) et après chaque 10% de la durée globale de T_{lim} ($T_{lim10\%}$, ..., $T_{lim100\%}$).

Un filtre passe-haut (20 Hz) a été appliqué au signal EMG (Chart 5.4, AD Instruments®, Hasting Royaume-Uni) pour éliminer les éventuels artefacts liés au mouvement. L'activité musculaire a été quantifiée en utilisant les données EMG collectées lors des différentes phases de la foulée. Le signal redressé et la valeur RMS était calculée à partir d'une fenêtre glissante sur 20ms. L'activité EMG était mesurée après 4min lors de CàP-Ctrl, immédiatement au début de T_{lim} ($T_{lim5\%}$) et tous les 10% du temps limite ($T_{lim10\%}$, ..., $T_{lim100\%}$). Les données de 30 foulées consécutives étaient moyennées et lissées (filtre FFT passe-bas ; fréquence de coupure : 30Hz) de sorte à obtenir une enveloppe RMS moyenne pour chaque muscle pour chaque période de course considérée. L'activité EMG globale était identifiée comme étant la valeur RMS moyenne sur le cycle de foulée entier ($RMS_{foulée}$). Une analyse du timing d'activation était réalisée grâce à la technique de *cross-correlation* afin de mesurer les changements relatifs des caractéristiques temporelles de l'activité neuromusculaire (Dorel et al. 2009; Li et Caldwell 1999). Les coefficients de *cross-correlation* des courbes EMG RMS (r) entre le patron d'activation de référence (CàP-Ctrl) et les patrons caractérisés *a posteriori* (de $T_{lim5\%}$ à $T_{lim100\%}$) étaient calculés pour chaque muscle, en utilisant la formule proposée par Li et Caldwell (1999). Ainsi, la magnitude du décalage temporel entre chaque patron de T_{lim} et le patron de référence était déterminée en identifiant pour quelle valeur de k la *cross-correlation* était maximisée. Les valeurs k obtenues représentaient une estimation de l'éventuel décalage temporel des enveloppes linéaires des patrons EMG (Li et Caldwell 1999).

5.3. ANALYSE STATISTIQUE

La normalité des données collectées a été testée grâce à un test Kolmogorov-Smirnov. Une fois que celle-ci était établie, les résultats ont été exprimés en moyenne \pm ET. Une analyse de la variance à une voie pour mesures répétées a été employée pour tester l'effet du temps sur le niveau de difficulté d'effort perçue, les valeurs physiologiques, métaboliques, cinématiques, EMG et de raideur, utilisées comme variables dépendantes. Lorsqu'une différence significative était constatée, un test *post-hoc* de Dunnett était conduit pour identifier les différences significatives entre les valeurs moyennes du temps-limite (de $T_{lim5\%}$ à $T_{lim100\%}$), les valeurs atteintes lors de CàP-Ctrl et à la fin du test maximal incrémenté en course à pied. Les différences significatives étaient considérées comme

significatives lorsque p était inférieur à 0,05. Toutes ces analyses statistiques ont été réalisées avec le logiciel Origin 8.1 pour Windows (Origin Laboratories, Northampton, MA, Etats-Unis).

5.4. RESULTATS ET DISCUSSION

Les résultats seront diffusés au moment de leur publication.

DISCUSSION GENERALE ET PERSPECTIVES SCIENTIFIQUES

A l'image des disciplines de longue durée, la performance en triathlon distance Olympique est conditionnée par l'atteinte combinée de hautes valeurs de $\dot{V}O_{2\max}$ en natation, en cyclisme et en course à pied, de la capacité à maintenir un pourcentage élevé de $\dot{V}O_{2\max}$, de la capacité musculaire à produire de la force et d'un bon rendement énergétique lors du déplacement (Suriano et Bishop 2010). Pour autant, l'ensemble de ces paramètres ne suffit pas à expliquer complètement les différences de performance constatées entre des athlètes spécialistes d'activités de longue durée, comme les triathlètes (Nummela et al. 2006). L'analyse des exigences de la compétition permet dans cette perspective de mieux appréhender la complexité de la performance en triathlon au plus haut niveau et d'identifier les facteurs qui influencent spécifiquement les différences entre les compétiteurs de niveau international. Ce challenge est aujourd'hui facilité par le développement et la validation d'outils de mesure légers, fiables et qui peuvent être portés ou embarqués par les triathlètes en compétition, sans altérer leurs performances. Profitant de ces progrès technologiques, le présent travail a permis de caractériser les stratégies adoptées par les triathlètes « élite » en compétition (études n°1 et n°2) et de montrer qu'il est possible d'optimiser significativement leur niveau de performance global via une modification de la stratégie d'allure décroissante qu'ils systématisent en course à pied (études n°3 et n°4). Le caractère stochastique de la vitesse en course à pied révélée par ces études a par ailleurs suggéré que l'intensité d'exercice lors de la course à pied d'un triathlon distance Olympique est régulée au niveau central en fonction des feedbacks périphériques afférents, de la distance restant à parcourir et de la situation de la course, comme le propose le modèle « Anticipation – Difficulté d'effort perçue – Feedbacks » (Tucker 2009). L'objectif de la dernière expérimentation (étude n°5) a été dans ce cadre d'identifier ce qui limite la capacité d'un triathlète à maintenir son allure de course initiale lors d'un enchaînement cyclisme-course à pied mené jusqu'à l'arrêt. Les résultats suggèrent que les triathlètes ont stoppé l'exercice, sans que la preuve d'une défaillance d'un système physiologique ne puisse être démontrée, et alors qu'ils avaient atteint un niveau de difficulté d'effort perçue tolérable maximal. De nouvelles investigations devront néanmoins tester cette hypothèse de manière plus directe.

1. DECRIRE LES STRATEGIES D'ALLURE EN TRIATHLON A HAUT NIVEAU

Les études n°1 (Bernard et al. 2009) et n°2 (Le Meur et al. 2009) ont permis de décrire les stratégies d'allure adoptées par les triathlètes lors d'épreuves internationales distance Olympique, de sorte à mieux caractériser les intensités atteintes en compétition en vue d'une meilleure compréhension des facteurs de la performance en triathlon à haut niveau. Quand bien même le triathlon constitue une discipline à part entière, nous discuterons des résultats principaux de ces études via une analyse par activité par souci de clarté.

1.1. EN NATATION

L'étude n°2 (Le Meur et al. 2009) a permis de montrer que les triathlètes « élite » adoptent une stratégie d'allure décroissante systématique lors de la partie natation d'une épreuve de Coupe du monde, indépendamment de leur sexe. L'adoption d'un départ rapide permet d'éviter la congestion à la première bouée, où les moins bons nageurs sont désavantagés. Les données collectées lors de la Coupe du Monde de Pékin 2007 révèlent d'ailleurs une forte corrélation entre la position à la première bouée et celle à l'issue de la natation, aussi bien pour les femmes que pour les hommes. Ainsi, il apparaît que même si les triathlètes nagent 1500m, ils ont tout intérêt à améliorer leur capacité à nager vite sur des distances courtes. Tel que l'ont distingué Thompson et al. (2003) il est dans cette perspective nécessaire d'améliorer la capacité à resynthétiser l'énergie par voie anaérobie, à accélérer rapidement la consommation d'oxygène et à atteindre une cadence de coups de bras pour pouvoir partir vite en natation. Le développement actuel de systèmes miniaturisés de positionnement par satellites devrait permettre prochainement de caractériser avec une plus grande précision la variabilité de l'allure adoptée par les triathlètes en natation lors de compétitions internationales.

1.2. EN CYCLISME

L'utilisation de systèmes de mesure embarqués a permis de caractériser les stratégies d'allure adoptées en cyclisme par les triathlètes « élite » lors d'épreuves de Coupe du monde (études n°1 et n°2).

Un effet significatif du temps a été constaté lors de l'épreuve de Coupe du Monde de Pékin en 2006 (étude n°1) pour les valeurs de puissance de pédalage et de FC, dont les maxima ont été atteints lors de la phase initiale de la section cycliste, révélant ainsi l'adoption d'une stratégie d'allure décroissante. Une évolution similaire avait d'ailleurs été observée lors d'épreuves de VTT *cross-country* (Impellizzeri et al. 2002; Stapelfeldt et al. 2004). Pour plusieurs auteurs, ce résultat n'est pas surprenant, étant donné que le début de l'épreuve joue souvent un rôle déterminant sur la performance globale (Impellizzeri et al. 2002; Stapelfeldt et al. 2004; Vleck et al. 2008; Vleck et al. 2006). Lors d'un triathlon distance Olympique, les plus faibles nageurs doivent regagner du temps sur les triathlètes en tête de la course en adoptant une allure significativement plus élevée que ces derniers lors de la première partie de la section cycliste. Les triathlètes les mieux positionnés à l'issue de la natation ont pour leur part avantage à augmenter leur avance pour obtenir un avantage décisif au départ de la course à pied (Vleck et al. 2006). L'étude n°1 a confirmé ces hypothèses, étant donné

que la puissance moyenne développée lors des deux premiers tours cyclistes était significativement plus élevée que la puissance moyenne développée sur l'ensemble de la course (+11%) et que la fréquence cardiaque moyenne durant cette période atteignait 94% de sa valeur maximale. Dès la partie médiane de la section cycliste (L3-L4), ces valeurs ont ensuite significativement diminué. La réduction de 3,6% de la vitesse de locomotion constatée entre la phase post-natation (L1-L2) et la phase terminale du cyclisme (L5-L6) est comparable aux valeurs rapportées par Vleck et al. (2008) lors de la Coupe du Monde de triathlon de Lausanne en 2002. La mesure de la puissance de pédalage a révélé que cette baisse de la vitesse de locomotion était associée à une réduction concomitante de 20% de la puissance de pédalage. Cette différence de baisse constatée pour les valeurs de vitesse et de puissance de pédalage semble pouvoir s'expliquer par la relation exponentielle qu'il existe entre ces variables dépendantes mais aussi par l'habileté des triathlètes à demeurer dans une position abritée à l'intérieur du peloton. Dans cette perspective, les bénéfices potentiels du *drafting* apparaissent évidents. Par exemple, dans une étude menée sans *drafting*, il a été rapporté que pour une vitesse de déplacement identique (38km.h^{-1}), la puissance moyenne développée était de 312W tandis que la puissance moyenne ici mesurée n'était que de 230W (Bernard et al. 2007). Aussi, en triathlon distance Olympique, la stratégie d'allure est influencée par le caractère multivarié de l'épreuve et notamment l'influence de l'enchaînement des disciplines (Ackland 2001). A l'issue de la natation, les triathlètes sont espacés les uns des autres, ce qui influence le nombre de triathlètes susceptibles de former chaque peloton et la quantité de travail à produire nécessaire pour revenir sur les triathlètes de tête. Le nombre de triathlètes composant le groupe influence la cohésion du groupe et les possibilités de s'abriter à l'intérieur du pack cycliste (Vleck et al. 2008). A l'inverse, le nombre de packs cyclistes est généralement réduit et stabilisé à l'approche de la transition cyclisme-course à pied, ce qui permet aux triathlètes de diminuer leur puissance de pédalage pour maintenir une vitesse donnée. Or, l'entretien avec des triathlètes révèle que la seconde transition est la plus difficile (Millet et Vleck 2000) et Suriano et al. (2007) ont montré qu'il est possible d'améliorer la performance en course à pied en diminuant la puissance développée lors de la phase finale de la section cycliste d'un triathlon lorsque celle-ci a été parcourue en développant une puissance constante. A notre connaissance, seules deux études ont caractérisé les effets physiologiques d'un protocole impliquant un effort cycliste stochastique enchaîné avec une épreuve de course à pied (Bernard et al. 2007; Suriano et al. 2007). Suriano et al. (2007) ont ainsi observé que la réduction de la puissance de pédalage lors des 5 dernières minutes de la partie cycliste permet d'améliorer la performance lors d'une course à pied enchaînée. A l'inverse, lorsque les triathlètes augmentent leur puissance de pédalage à la fin de la partie cycliste pour se placer à l'avant du pack à l'entrée de la zone de transition cyclisme-course à pied leur performance en course à pied est significativement dégradée (Bernard et al. 2007). Ainsi, dans l'étude n°1, les triathlètes ont probablement diminué leur

puissance de pédalage volontairement lors de la phase finale de la section cycliste pour se préparer à la partie pédestre en diminuant la fatigue engendrée par le cyclisme.

Par ailleurs, l'étude n°1 a permis de décrire la distribution des puissances développées par des triathlètes lors d'une compétition internationale. Lors des tests menés en laboratoire, les puissances aux seuils ventilatoires, la puissance maximale aérobie et la puissance maximale ont été mesurées et ont permis d'identifier le temps relatif passé dans chaque zone d'intensité. Nous avons ainsi constaté que $51 \pm 9\%$, $17 \pm 6\%$, $15 \pm 3\%$ et $17 \pm 6\%$ du temps cycliste était dépensé en zone 1, 2, 3 et 4, respectivement. De la sorte, 32% du temps était passé dans des intensités de travail supérieures au second seuil ventilatoire. Ces données peuvent être comparées avec les résultats rapportés par des études qui ont analysé les puissances développées par des cyclistes professionnels lors de compétitions internationales (Ebert et al. 2005; Lim et al. 2010; Stapelfeldt et al. 2004; Vogt et al. 2006). Par exemple, lors de Coupes du Monde sur route, la distribution constatée chez des cyclistes féminines était de 51%, 17%, 12% et 20% lors des épreuves disputées sur parcours plats, tandis qu'elle était de 52%, 22%, 13% et 13% lors des courses sur circuits vallonnés (Ebert et al. 2005). Vogt et al. (2006) ont montré que chez des cyclistes professionnels cette distribution était de 58% en zone 1, 14% en zone 2 et 28% dans une zone 3 correspondant à une augmentation supérieure à 1mmol.L^{-1} au-dessus du seuil lactique. Par ailleurs, l'étude n°1 a révélé des différences significatives entre les variations de FC et de la puissance de pédalage tout au long des étapes analysées. Les résultats ont ainsi mis en exergue que l'utilisation de la FC sous-estime le temps passé en zones 1 et 3 et surestime celui écoulé en zone 2. Le temps en zone 1 était ainsi significativement sous-estimé en comparant les valeurs de FC par rapport à celles de puissance (-47%), tandis que le temps passé en zone 2 et en zone 3 était surestimé de 52% et de 50%, respectivement. Dans cette perspective, les données collectées lors cette étude confirment que l'évolution de la FC ne permet pas une identification précise des stratégies d'allure adoptées par les triathlètes en compétition et en retour une planification adéquate de leur entraînement. La mesure de la FC semble néanmoins intéressante pour quantifier l'intensité relative de l'exercice, étant donné qu'avec l'apparition de la fatigue, une puissance de pédalage donnée peut correspondre à une exigence énergétique plus élevée (Guilhem et al. 2009).

L'étude n°1 a par ailleurs révélé que Pmax constitue un facteur potentiel de la performance en triathlon distance Olympique étant donné qu'une période de temps non négligeable de la course est associée à des intensités supramaximales. Classiquement, les compétitions de triathlon sont décrites comme des épreuves d'endurance et peu de mesures des variables mécaniques sont disponibles dans la littérature (Bernard et al. 2007; Hausswirth et al. 1999). Les valeurs enregistrées lors de l'étude n°1 ont révélé l'atteinte de valeurs supérieures à 60% de Pmax ($489 \pm 103\text{W}$) notamment lors

de l'ascension de la montée et des portions techniques du circuit. 57 périodes de 7s consécutives et 13 périodes de 15s passées au-dessus de PMA ont été répertoriées. 13 périodes de 7s consécutives (incluses dans les 57 précédentes) au-dessus de 60% de Pmax ont été relevées et 17% du temps cycliste global a par ailleurs été associé à des intensités supérieures à PMA. Lors de la phase initiale de la portion cycliste (L1-L2), cette fraction a atteint $20 \pm 6\%$ du temps écoulé lors de cette période. Ces résultats soulignent la contribution significative des processus de resynthèse anaérobie de l'énergie lors ce type d'épreuves. Dans cette perspective, les exigences énergétiques d'un triathlon international distance Olympique apparaissent très différentes de celles d'un triathlon longue distance *Ironman* et semblent plus proches de la typologie des efforts observée lors d'épreuves cyclistes professionnelles de type « critérium » (Abbiss et al. 2010).

A l'image des résultats récemment rapportés par Lim et al. (2010) chez des cyclistes professionnels féminines et masculins, aucune différence significative de distribution du temps dans les 5 zones d'intensité n'a par ailleurs été révélée par l'étude n°2, ce qui démontre une typologie des efforts en cyclisme assez similaire chez les triathlètes, quel que soit leur sexe. Un effet du sexe concernant la distribution géographique du temps passé au dessus de PMA (zone 5) a en revanche été constaté. Ainsi, les hommes atteignaient la zone 5 sur les sections techniques du parcours (*i.e.* changements de direction) pour rester dans le pack, tandis que les femmes passaient davantage de temps dans cette zone dans les portions ascendantes du circuit. La relation inversement significative entre le temps passé au dessus de PMA et le ratio PMA/poids ($r = -0,73$, $p < 0,05$) a de plus corroboré ce résultat, étant donné que les femmes suivies démontraient un ratio significativement moins bon que celui de leurs homologues masculins. Ce résultat suggère que les triathlètes féminines auraient intérêt à améliorer leur aptitude à progresser sur les phases ascendantes via une meilleure technique ou un meilleur ratio PMA/poids (Davison et al. 2000), tandis que les hommes devraient être incités à plutôt optimiser leur aptitude à accélérer (par l'amélioration de leur ratio Puissance Maximale / poids) et leur capacité à reproduire des sprints courts entrecoupés de période de récupération incomplète. Ainsi, les athlètes pourraient réduire les effets délétères engendrés par le circuit cycliste sur la fatigue voire profiter d'un avantage dans ces sections décisives.

Les similitudes entre hommes et femmes révélées par l'étude n°2 (Le Meur et al. 2009) concernant la stratégie d'allure en cyclisme n'ont en revanche concerné que la stratégie globale adoptée sur cette section. Les deux sexes ont démontré une baisse significative de la vitesse sur la partie cycliste entre le premier et le dernier tour (-5,6 et -4,6%, pour les hommes et les femmes, respectivement). Leur puissance de pédalage a diminué significativement durant la même période, respectivement de 19,4 et 16,8%, pour les femmes et les hommes, respectivement ($p < 0,05$). De manière comparable à l'étude de Vleck et al. (2008) réalisée lors de la coupe du Monde Lausanne en 2002, nous faisons

l'hypothèse que cette baisse était reliée par une plus grande stabilisation des packs cyclistes à l'approche de la transition cyclisme-course à pied par rapport à la transition natation-cyclisme (aucune modification de la composition des packs n'a été en effet observée après le 3^{ème} tour pour les deux sexes). La baisse de la vitesse durant la partie cycliste était en revanche plus prononcée chez les hommes. Ceux-ci ont accentué l'allure lors du premier tour avant de la diminuer lors des tours suivants, tandis que les femmes n'ont pas démontré de baisse de leur vitesse de déplacement avant le dernier tour, qui était parcouru plus lentement. Ces résultats ont été confirmés par les valeurs de puissance de pédalage puisque les hommes ont réduit celle-ci de 16,8% entre le 1^{er} et le 3^{ème} tour, tandis qu'aucune différence n'était observée sur la même période chez les femmes. La distribution du temps dans les zones d'intensité lors des deux premiers tours a par ailleurs révélé que les hommes passaient davantage de temps que les femmes en zone 3 (+7%) et moins de temps en zone 2 (-8%). Aucune différence significative n'était toutefois constatée entre femmes et hommes concernant la distribution du temps en zones 1, 4 et 5. Ainsi, les hommes pédalaient à une plus haute intensité relative que les femmes lors la phase initiale de la section cycliste en réduisant le temps passé à des intensités faibles. Si ce résultat venait à être confirmé sur d'autres épreuves internationales, il suggérerait qu'il est particulièrement important pour les hommes d'optimiser leur capacité à être performants lors dans la transition natation – cyclisme.

1.3. EN COURSE A PIED

Les résultats de l'étude n°2 ayant concerné la partie pédestre ont révélé une stratégie d'allure décroissante identique pour les deux genres. Sans exception ($n = 127$), le premier tour (et plus précisément les premiers 1500m) était couru significativement plus vite que les autres sections du circuit, aussi bien par les femmes que par les hommes.

Les résultats ont par ailleurs indiqué un effet du sexe sur l'influence du dénivelé sur la perte de vitesse en course à pied. Ainsi, les femmes ont diminué leur allure de course sur les portions ascendantes et descendantes, tandis que la baisse de vitesse était visible sur toutes les portions du parcours chez les hommes. En revanche, tous les triathlètes ont eu tendance à profiter de moins en moins de la descente du circuit pédestre (-12% de pente). Hormis pour le premier tour, la vitesse dans la descente n'était pas significativement différente de celle mesurée sur le plat tant chez les hommes que chez les femmes. Ce résultat suggère que les triathlètes tireraient avantage à s'entraîner sur des parcours vallonnés à l'image des coureurs *cross-country*, de sorte à s'habituer à améliorer leur habileté à ajuster leur fréquence/amplitude de foulée en fonction de leur état de fatigue.

Au-delà de la description des allures de course adoptées par les triathlètes « élite » lors d'épreuves de Coupe du Monde, ces données ont surtout permis de questionner le départ agressif adopté systématiquement par l'ensemble des compétiteurs lors de la course à pied. Les bénéfices d'une stratégie d'allure décroissante (*i.e. positive-split*) lors d'une épreuve comme le triathlon distance Olympique demeurent à clarifier, quand bien même ce départ rapide est systématiquement démontré par les triathlètes en compétition (Vleck et al. 2008; Vleck et al. 2006). D'un point de vue hémodynamique, il apparaît en effet hautement questionnable d'accroître l'allure au début de la partie pédestre lorsque les masses sanguines n'ont pas encore eu le temps d'être redistribuées en fonction des demandes particulières de la course à pied (Kreider et al. 1988a). Bien que le niveau d'expertise influence généralement positivement la stratégie d'allure adoptée par des sportifs en situation de compétition (Baron et al. 2010; Foster et al. 2009; Sandals et al. 2006), cette stratégie d'allure décroissante systématisée par les triathlètes semble en contradiction avec la littérature scientifique qui souligne les bénéfices d'une vitesse constante pour les compétitions d'une durée similaire (Abbiss et Laursen 2008).

Dans cette perspective, les études n°3 (Hausswirth et al. 2010) et n°4 (Le Meur et al. in press) ont étudié l'influence de la stratégie d'allure en course à pied sur la performance en triathlon, afin de déterminer quelle gestion de la vitesse en course à pied est optimale pour des triathlètes « élite ».

2. OPTIMISER LES STRATEGIES D'ALLURE EN TRIATHLON A HAUT NIVEAU

L'étude n°3 (Hausswirth et al. 2010) a montré que l'augmentation du temps de référence sur 10km (CàP-Réf) est de 1,4%, 4,4% et 8,9% lorsque le 1^{er} km d'un triathlon contre-la-montre est parcouru 5% plus lentement (Tri-CàP_{-5%}), 10% plus lentement (Tri-CàP_{-10%}), et 5% plus rapidement que l'allure moyenne sur un 10km isolé (Tri-CàP_{+5%}), respectivement. L'adoption d'un départ rapide lors du 1^{er} km d'un triathlon distance Olympique contre-la-montre (Tri-CàP_{+5%}, stratégie identifiée par l'étude n°2) a engendré une réduction significative de la vitesse de course à partir du troisième kilomètre (les 9 derniers kilomètres ont été parcourus $2,7 \pm 0,4 \text{ km.h}^{-1}$ plus lentement que le 1^{er} km lors de Tri-CàP_{+5%}). En revanche, les triathlètes sont parvenus à augmenter leur vitesse de $1,0 \pm 0,3 \text{ km.h}^{-1}$ sur cette même section lorsque le 1^{er} km de course à pied était parcouru à une allure 5% plus lente que celle adoptée lors d'une course contrôle de 10km. Une variation de 20s sur le temps nécessaire pour couvrir le 1^{er} kilomètre a ainsi engendré une différence significative de $150 \pm 21 \text{ s}$ sur la performance globale sur le 10km. Ce résultat paraît d'autant plus intéressant que la différence de temps sur la ligne d'arrivée entre le premier et le 10^{ème} triathlète lors d'épreuves de Coupe du

Monde de triathlon est souvent inférieure à 30s (Millet et Vleck 2000; Vleck et al. 2008; Vleck et al. 2006).

La principale hypothèse permettant d'expliquer ce plus faible niveau de performance associée à Tri-CàP_{+5%} est que l'allure est régulée par anticipation de sorte à prévenir l'apparition d'un état de fatigue prématué, tel que l'a suggéré Ulmer (1996). Tucker (2009) a récemment proposé que les variations d'allure lors d'un exercice donné permettent d'optimiser le niveau de performance, mais surtout de prévenir de manière ultime la survenue de défaillances physiologiques graves et irréversibles. Deux principales origines physiologiques semblent potentiellement pouvoir ici être identifiées pour expliquer la diminution d'allure constatée lors de Tri-CàP_{+5%}; l'une est d'origine métabolique, l'autre d'origine ventilatoire.

Hypothèse métabolique. Les valeurs de $\dot{V}O_2$ et de $\dot{V}E$ collectées lors de l'étude n°3 ont montré une demande métabolique significativement plus élevée durant le 1^{er} km de CàP-Tri_{+5%} que lors de CàP-Tri_{-5%} et CàP-Tri_{-10%}. Après 5km, une plus grande contribution anaérobie était par ailleurs observée pour CàP-Tri_{+5%} par rapport aux deux autres stratégies testées malgré une vitesse de course plus faible ($4,9 \pm 0,5 \text{ mmol.L}^{-1}$ et $16,4 \pm 0,4 \text{ km.h}^{-1}$, $3,8 \pm 0,2 \text{ mmol.L}^{-1}$ et $18,0 \pm 0,3 \text{ km.h}^{-1}$, $3,6 \pm 0,4 \text{ mmol.L}^{-1}$ et $16,7 \pm 0,4 \text{ km.h}^{-1}$ pour CàP-Tri_{+5%} avec CàP-Tri_{-5%} et CàP-Tri_{-10%}, respectivement). Ces résultats sont en accord avec des études menées sur les stratégies d'allure en natation (Thompson et al. 2003), en cyclisme (Foster et al. 1993; Hettinga et al. 2006) et en course à pied (Billat et al. 2001b), qui ont montré qu'un départ rapide augmente la sollicitation des voies de resynthèse anaérobie pour atteindre la vitesse cible souhaitée. Par ailleurs, Kreider et al. (1988a) ont suggéré que la transition cyclisme-course à pied engendre une redistribution du débit cardiaque étant donné que la course à pied sollicite certains groupes musculaires additionnels par rapport au cyclisme. Le délai pour assurer ce shunt vers les membres supérieurs et le tronc est donc susceptible d'accroître la sollicitation glycolytique au niveau des régions supérieures de l'organisme. La stratégie CàP-Tri_{+5%} est donc susceptible d'avoir induit de plus grandes perturbations métaboliques au départ de la course à pied que les conditions CàP-Tri_{-5%} et CàP-Tri_{-10%}.

Hypothèse ventilatoire. Une autre hypothèse est qu'un départ rapide (*i.e.* Tri-CàP_{+5%}) est susceptible d'avoir engendré des perturbations respiratoires prématuées lors de la transition cyclisme-course à pied. A la fin du 1^{er} km de CàP-Tri_{+5%}, les triathlètes ont atteint $93,9 \pm 6,1\%$ de la valeur de $\dot{V}_{E\max}$ déterminée lors du test incrémenté mené jusqu'à épuisement en course à pied. Ces valeurs étaient significativement plus hautes pour CàP-Tri_{+5%} que pour CàP-Tri_{-5%} et CàP-Tri_{-10%}. Hill et al. (1991) ont montré que la position courbée adoptée par les cyclistes sur leur vélo augmente l'impédance abdominale et le travail du diaphragme pour une valeur de $\dot{V}E$ donnée. De plus, Boussana et al. (2001) ont montré qu'un enchaînement cyclisme-course à pied réalisé à faible intensité suffit pour

diminuer la performance des muscles ventilatoires lors d'un test d'exploration fonctionnelle respiratoire. Une autre étude a révélé que la fatigue des muscles ventilatoires engendrée par un exercice cycliste est maintenue et non réduite lors d'un exercice de course à pied subséquent (Galy et al. 2003). Etant donné que les triathlètes ont atteint des intensités de travail supérieures lors de l'étude n°3 (87% de $\dot{V}O_{2\max}$ vs. 75% de $\dot{V}O_{2\max}$), CàP-Tri_{+5%} est susceptible d'avoir engendré de plus grandes perturbations respiratoires que CàP-Tri_{-5%} et CàP-Tri_{-10%}.

Néanmoins, trois observations principales laissent supposer que les moins bonnes performances associées à CàP-Tri_{+5%} étaient reliées à une baisse de la commande centrale et non à un phénomène de fatigue périphérique. Tout d'abord, les triathlètes sont parvenus à accélérer lors du dernier kilomètre, alors qu'ils démontraient des symptômes classiques de fatigue comme le laisse supposer la baisse de vitesse constatée après le 3^{ème} km. Tucker (2009) a proposé que l'occurrence d'une accélération finale indique que l'allure de course lors d'un exercice librement géré est contrôlée au niveau central selon un modèle « Anticipation – Difficulté d'effort perçue – Feedbacks ». Ce phénomène observé durant CàP-Tri_{+5%} supporte l'hypothèse selon laquelle la stratégie d'allure adoptée lors d'un triathlon est continuellement ajustée au cours de la section pédestre en fonction des afférences périphériques reçues et intégrées par le système nerveux central. Ce type de stratégie suggère aussi que les contraintes associées à l'exercice demeurent relativement incertaines au début de celui-ci avant d'être graduellement identifiées au fur et à mesure de l'épreuve (Tucker 2009). Etant donné que le rôle de ces processus adaptatifs semble être de prévenir la survenue de perturbations physiologiques graves (Tucker 2009), cette incertitude est susceptible d'avoir mené au maintien d'une réserve en unités motrices et d'une réserve métabolique tout au long de CàP-Tri_{+5%}. Dans cette perspective, le moins bon niveau de performance associé à CàP-Tri_{+5%} serait principalement associé à une réduction du recrutement neuromusculaire plutôt qu'à une perturbation grave du système ventilatoire ou de l'homéostasie au niveau des membres inférieurs. De plus, l'instauration d'un état de fatigue périphérique résulte en une baisse progressive de la production de force (Gandevia 2001). Dans l'étude n°3, les résultats n'ont pas révélé ce type de baisse progressive de la vitesse de course mais plutôt un soudain ralentissement après 2km. La vitesse a ainsi baissé de 1,5km.h⁻¹ par kilomètre entre les kilomètres 2 et 4 puis seulement de 0,2km.h⁻¹ par kilomètre durant les cinq kilomètres suivants. Nous faisons l'hypothèse que l'adoption d'un départ rapide a généré une augmentation plus rapide de la difficulté d'effort perçue que celle considérée optimale par le système central. Dans cette perspective, les triathlètes auraient soudainement ralenti de sorte à ce que leur difficulté d'effort perçue retrouve une valeur « tolérable » pour ce moment de la course. De nouvelles investigations semblent nécessaires pour mieux comprendre la manière dont les interactions physiologiques et psycho-perceptuelles influencent la stratégie d'allure adoptée par les triathlètes lors de la course à pied.

Un autre résultat intéressant de l'étude n°3 est que la différence de performance entre CàP-Tri_{-5%} et CàP-Tri_{-10%} a atteint 59 ± 11 s sur la ligne d'arrivée, alors que la différence de temps sur le premier kilomètre n'était que de 10s entre ces deux conditions. Les valeurs de $\dot{V}O_2$, \dot{V}_E et $[La^-]_s$ étaient significativement plus faibles après 5 et 9,5km pour CàP-Tri_{-10%} par rapport à CàP-Tri_{-5%}, ce qui suggère que les triathlètes ne sont pas parvenus à atteindre l'intensité maximale d'exercice qu'ils auraient été capables de soutenir. Les raisons de ce résultat demeurent à clarifier. Plusieurs études menées en conditions réelles de pratique ont mis en évidence que les triathlètes systématisent un départ rapide en course à pied aussi bien en compétition (Le Meur et al. 2009; Vleck et al. 2008; Vleck et al. 2006) qu'à l'entraînement lors de sessions de multi-enchainements (Millet et Vleck 2000). Par exemple, l'étude n°2 (Le Meur et al. 2009) a montré que lors de la Coupe du Monde de Pékin 2007 l'ensemble des 136 triathlètes engagés avaient adopté une stratégie d'allure décroissante lors de la course à pied. Durant cette épreuve, le premier des quatre tours avait été couru 10% plus vite que les trois tours suivants. Il est donc possible de considérer que la stratégie CàP-Tri_{+5%} ici imposée était représentative de la stratégie spontanément adoptée par les triathlètes en situation de compétition et qu'à cet égard la condition CàP-Tri_{-10%} était plus éloignée que la condition CàP-Tri_{-5%} de la stratégie qu'adoptent habituellement les triathlètes en compétition. Lors du premier kilomètre de CàP-Tri_{-5%}, les triathlètes étaient obligés de partir 20s plus lentement qu'à leur habitude (i.e. CàP-Tri_{+5%}), tandis que cet écart atteignait 30s dans la condition CàP-Tri_{-10%}. Plusieurs études ont à cet égard montré que l'expérience passée influence la stratégie d'allure adoptée par un athlète au cours d'une épreuve donnée (Ansley et al. 2004; Foster et al. 2009; Mauger et al. 2009; Micklewright et al. 2010). Une récente recherche menée par Foster et al. (2009) a montré que la manière dont se construit la programmation de la gestion de l'intensité d'exercice lors d'une épreuve contre-la-montre est conditionnée par le nombre de fois où l'athlète a tenté de mettre cette stratégie d'allure en place et par les feedbacks qu'il reçoit au cours de l'exercice (afférences physiologiques, distance parcourue/restant à parcourir). Dans cette perspective, la stratégie CàP-Tri_{-10%} est susceptible d'avoir été plus perturbante pour les triathlètes que la stratégie CàP-Tri_{-5%} en raison de son association à des feedbacks internes atypiques (difficultés musculaire et ventilatoire perçues notamment) par rapport à ceux habituellement éprouvés lors de la transition cyclisme-course à pied. Nous faisons l'hypothèse que les triathlètes de l'étude n°4 auraient tiré bénéfice à reproduire plusieurs fois la stratégie CàP-Tri_{-10%}, de sorte à optimiser leur capacité à ajuster rapidement leur allure de course et à adopter une allure optimale suite à un départ relativement lent. En effet, Mauger et al. (2009) ont mis en évidence que des cyclistes sont capables de s'approcher de leur record personnel sur un contre-la-montre de 4km alors qu'aucun feedback sur la distance parcourue ne leur est fourni uniquement s'ils ont répété suffisamment de fois l'épreuve (i.e. 4 essais) pour intégrer cette stratégie d'allure optimale. De façon similaire, Foster et al. (2009) ont montré que la programmation de la gestion de l'intensité d'exercice lors d'une épreuve contre-la-montre n'est pas établie a priori mais qu'elle

nécessite un temps suffisant pour pouvoir se développer. De nouvelles études sont nécessaires pour confirmer cette hypothèse.

Si les résultats de l'étude n°3 soulignent que les triathlètes auraient intérêt à automatiser un départ moins rapide lors de leurs entraînements multi-enchaînés (cyclisme - course à pied), les variations d'intensité que démontrent les triathlètes en compétition semblent toutefois aussi influencées par des facteurs environnementaux (notamment les autres concurrents) et par leur niveau de motivation (Baron et al. 2010). Ceci suggère que la stratégie d'allure adoptée lors d'une compétition est partiellement déterminée par le cadre émotionnel et perceptuel associé à ce type de contexte particulier. D'autre part, plusieurs études ont mis en évidence que la stratégie d'allure programmée et stabilisée par un athlète pour une épreuve donnée est le résultat d'un apprentissage long (Foster et al. 2009), emprunt de représentations culturelles qu'il est difficile de modifier (Tucker et al. 2009; Tucker et al. 2006a). Etant donné le caractère contradictoire des résultats présentés lors de l'étude n°3 et la stratégie spontanément adoptée par les triathlètes en situation de compétition, une nouvelle investigation s'est avérée nécessaire pour confirmer les bénéfices d'un départ moins rapide dans le contexte d'une compétition internationale (*i.e.* départ en ligne).

L'étude n°4, menée lors des Championnats d'Europe de triathlon 2009 (Holten, Pays-Bas), a dans ce cadre analysé les relations entre la stratégie d'allure en course à pied et la performance lors d'une épreuve internationale disputée sur distance Olympique. La corrélation inverse significative mise en évidence entre la variabilité de la vitesse de course et la performance en course à pied lors de cette compétition ($r = -0,76$, $p < 0,0001$) a confirmé les résultats de l'étude n°3. Ce résultat suggère qu'une stratégie d'allure constante en course à pied (*i.e.* d'un départ proche de l'allure moyenne sur l'ensemble course) est profitable y compris lors des épreuves internationales majeures disputées avec un départ en ligne. Etant donné que tous les triathlètes ont adopté une stratégie d'allure décroissante lors de la compétition analysée (à l'image de l'étude n°2), ces données prouvent en effet que les meilleurs coureurs (femmes et hommes) ont démontré une plus grande capacité que leurs adversaires à maintenir leur allure de course initiale lors des phases tardives de la course. Combinés à ceux de l'étude n°3, ces résultats soutiennent fortement que les triathlètes de haut niveau tireraient bénéfice à réduire leur allure de course initiale spontanée. A notre sens, l'adoption d'une haute intensité d'exercice au départ de la course à pied est probablement une stratégie choisie par les triathlètes « élite » pour rester au contact de leurs opposants directs lors de la course. Par ailleurs, Tucker et al. (2009) ont suggéré que la stratégie d'allure adoptée par des athlètes est associée avec un processus d'apprentissage culturel. Ces auteurs ont en effet analysé l'évolution de l'allure de course par kilomètre lors de 32 records du monde consécutifs du 5km depuis 1920 et ont montré que la variabilité de la vitesse de course a progressivement diminué lors de ces courses-

record jusqu'à aujourd'hui. En d'autres termes, les détenteurs du record du monde ont progressivement tendu d'une stratégie d'allure en « J inversé » vers une stratégie constante. Ces données suggèrent que des décennies semblent nécessaires pour que les athlètes « élite » optimisent la stratégie d'allure adoptée lors d'une épreuve donnée. Puisque plusieurs recherches ont rapporté que les triathlètes systématisent un départ rapide en course à pied aussi bien à l'entraînement lors de séances multi-enchainées « cyclisme – course à pied » (Millet et Vleck 2000) qu'en compétition (Le Meur et al. 2009; Vleck et al. 2008; Vleck et al. 2006), nous suggérons que cette stratégie est associée à une programmation apprise de la gestion de la vitesse de course. De nouvelles études sont nécessaires pour mieux identifier et comprendre comment les facteurs physiologiques et émotionnels interagissent à l'exercice pour déterminer les stratégies d'allure adoptées en compétition par les athlètes de haut niveau.

Alors que l'étude n°2 a montré que les triathlètes systématisent une stratégie d'allure décroissante, le nombre élevé de temps intermédiaires relevés dans l'étude n°4 (i.e. 20) a par ailleurs permis une description plus précise de l'évolution de leur vitesse de course en compétition. Ces données ont révélé une augmentation significative de l'allure de course à l'approche de la ligne d'arrivée pour 39% des arrivants. L'analyse vidéographique a montré qu'une majorité de ces compétiteurs étaient groupés à l'approche de la ligne d'arrivée (le dernier pointage ayant été réalisé à 571m de celle-ci), suggérant que cette accélération finale était destinée pour les triathlètes concernés à se détacher de leurs opposants directs. Cette observation confirme que la présence d'autres compétiteurs influence directement la stratégie d'allure par les triathlètes en situation de compétition et que ces derniers n'adoptent pas systématiquement une stratégie d'allure décroissante mais parfois plutôt une stratégie en « J inversé » (Abbiss et Laursen 2008), en fonction de la dynamique de course. Etant donné le haut pourcentage de triathlètes ayant augmenté leur allure de course en fin d'épreuve, ce résultat montre que la performance en triathlon à haut niveau semble liée à la capacité des triathlètes à atteindre des vitesses supra-maximales à la fin du 10km. Les écarts de plus en plus faibles constatés à l'arrivée des épreuves de Coupe du Monde *ITU World Championship Series* (données ITU) laissent supposer que cette capacité d'accélération finale est susceptible de devenir un facteur de plus en plus déterminant de la performance en triathlon à haut niveau dans les années à venir.

De manière générale, ces résultats suggèrent que la performance en course à pied lors d'un triathlon est notamment liée à la capacité du triathlète à maintenir son allure initiale (voire parfois à accélérer en fin d'épreuve) et donc à résister à la fatigue. Ce qui cause cette baisse de vitesse en course à pied reste néanmoins encore à déterminer. L'objectif de la dernière expérimentation a donc

été d'identifier ce qui limite de manière ultime la capacité de triathlètes entraînés à maintenir une allure de course initiale imposée lors d'un enchaînement cyclisme – course à pied.

3. COMPRENDRE LES STRATEGIES D'ALLURE EN TRIATHLON : VERS UNE APPROCHE MULTICENTRIQUE DE LA FATIGUE ?

L'analyse des résultats a révélé deux évolutions possibles pour l'ensemble des paramètres mesurés durant cette étude.

Paramètres stables durant l'épreuve temps-limite.

Consommation d'oxygène. Les valeurs de $\dot{V}O_2$ n'ont pas révélé de variation significative entre la course-référence (CàP-Ctrl) et les différentes périodes du temps-limite. Ces valeurs sont toujours demeurées inférieures à leur valeur maximale atteinte lors du test de course incrémenté et mené à l'épuisement volontaire. Une étude menée par Guilhem et al. (2009) n'a par ailleurs pas rapporté de différence significative de la valeur de $\dot{V}O_{2\max}$ atteinte lors d'un test maximal triangulaire réalisé après 30min de session d'exercice (à une intensité comprise entre P_{SV1} et P_{SV2}) par rapport à un test maximal incrémenté identique réalisé de manière isolé. Ces résultats suggèrent donc que les triathlètes de l'étude n°5 ont stoppé l'exercice alors qu'ils auraient pu augmenter leur $\dot{V}O_2$.

Paramètres EMG, cinématiques et raideur du membre inférieur. Plusieurs études ont investigué l'évolution de l'activité EMG des membres inférieurs lors d'épreuves contre-la-montre (Hettinga et al. 2006), lors d'exercices à charge constante menés à épuisement (Decorte et al. 2010; Dorel et al. 2009; Housh et al. 2000) et au cours de sprints répétés (Billaut et al. 2005). La plupart d'entre elles ont révélé une augmentation du ratio activité EMG / puissance développée (e.g. VL et VM), suggérant le recrutement d'unités motrices additionnelles pour compenser la baisse de force de contraction des fibres musculaires fatiguées (Decorte et al. 2010; Dorel et al. 2009; Hettinga et al. 2006; Housh et al. 2000). Ici, aucune augmentation de l'activité EMG n'a en revanche été constatée lors de T_{lim} par rapport à CàP-Ctrl. Ce résultat est en cohérence avec l'absence de modification significative de $\dot{V}O_2$ et des paramètres cinématiques (amplitude et fréquence de foulée) constatée lors de T_{lim} . De plus, la raideur du membre inférieur (K_{MI}) est apparue significativement supérieure à sa valeur moyenne lors de CàP-Ctrl durant la première moitié de T_{lim} sans toutefois qu'aucune différence significative ne soit ensuite encore observée. Bien que les raisons de ce résultat demeurent à clarifier et nécessitent de nouvelles investigations, ceux-ci suggèrent que l'arrêt de l'épreuve temps-limite n'a pas été engendré par une défaillance de la fonction musculaire. Etant donné la stabilité des paramètres cinématiques constatée tout au long de T_{lim} , nous faisons l'hypothèse que la baisse constatée du recrutement de RF a été compensée par l'activation accrue

d'autres muscles non investigués lors de la présente étude (e.g. *ilipsoas*). Dorel et al. (2009) ont suggéré que de tels phénomènes de compensation sont possibles lors l'un test cycliste temps-limite réalisé à 80% de la puissance maximale tolérée (performance moyenne : $13,8 \pm 6,0$ min). Ces auteurs ont révélé qu'une augmentation de l'activité des muscles *gluteus maximus* et BF pourrait être une adaptation mise en place par des cyclistes très entraînés pour compenser un potentiel phénomène de fatigue neuromusculaire et la baisse de force des muscles extenseurs du genou via un plus grand moment des extenseurs de la hanche. De nouvelles investigations sont requises pour vérifier si cette hypothèse peut s'appliquer en course à pied dans le cadre d'un triathlon.

L'absence d'augmentation significative du délai k lors du T_{lim} (<1% du temps de foulée) a démontré la stabilité de l'activation des muscles étudiés tout au long de l'épreuve temps-limite, notamment lors de l'enchaînement cyclisme-course à pied ($T_{lim5\%}$). De plus, la valeur moyenne du coefficient de corrélation maximal (R_{max}) déterminée pour chaque muscle était supérieure à 0,95 tout au long de T_{lim} , excepté pour RF ($0,936 \pm 0,048$ à $T_{lim100\%}$) et aucune différence n'était constatée entre $T_{lim5\%}$ et $T_{lim100\%}$ pour les 9 muscles étudiés. Ces résultats soulignent que le recrutement musculaire lors de la course est déterminé par un patron particulièrement robuste chez des triathlètes entraînés et que les générateurs centraux à l'origine de celui-ci ne sont affectés que d'une manière minime par les changements internes qui surviennent lors de la course (*i.e.* principalement des variations de $[La^-]_s$ et de \dot{V}_E dans l'étude n°5). Etant donné que les triathlètes ici impliqués étaient très entraînés, ces résultats semblent consistants avec ceux publiés par Millet et al. (2001), qui ont révélé que plus un triathlète est expérimenté, plus les altérations mécaniques de sa foulée sont faibles et éphémères lors de l'enchaînement cyclisme-course à pied.

Envisagés collectivement, l'absence d'altération des paramètres EMG, cinématiques et biomécaniques mesurés ou modélisés dans la présente étude suggère que l'incapacité des triathlètes à maintenir l'allure de course imposée n'était pas engendrée par une modification d'origine neuromusculaire.

Paramètres variables durant l'épreuve temps-limite

Fréquence cardiaque. L'augmentation de FC tout au long de T_{lim} était probablement reliée à une augmentation de l'activité du système nerveux sympathique, à l'augmentation des concentrations en norépinephrine circulante, à l'augmentation de la température corporelle ainsi qu'aux mécanismes thermorégulateurs associés (Freund et al. 1987). Toutefois, les valeurs de FC atteintes par les triathlètes lors de T_{lim} sont restées significativement inférieures à la valeur maximale atteinte lors du

test pédestre incrémenté mené à l'épuisement volontaire, suggérant que le débit cardiaque n'était pas le facteur responsable de l'arrêt de l'exercice.

Par ailleurs, la température et l'humidité relative du laboratoire (20°C et 35-45%, respectivement) étaient très en-dessous de l'intervalle de stress thermique associé à l'atteinte d'une température corporelle critique lors d'épreuves d'endurance (Marino 2004). Dans cette perspective, l'arrêt de l'exercice n'est pas susceptible d'avoir été dû à un phénomène d'hyperthermie dans la présente étude.

Paramètres ventilatoires. Les résultats ont révélé une augmentation significative du débit expiratoire (\dot{V}_E) lors de T_{lim} . De façon intéressante, \dot{V}_E a augmenté tout au long de la course à pied enchaînée mais sa valeur est toujours demeurée inférieure à la valeur maximale atteinte lors de l'épreuve incrémentée en course à pied (*i.e.* la valeur moyenne de \dot{V}_E lors de T_{lim} représentait $86 \pm 12\%$ de celle atteinte à la fin du test maximal incrémenté). Durant la même période, des valeurs significativement plus hautes que lors de CàP-Ctrl étaient constatées pour les équivalents respiratoires EqO₂ et EqCO₂ à partir de $T_{lim50\%}$ et tout au long de T_{lim} , respectivement. Ces valeurs étaient néanmoins inférieures à celles atteintes à la fin du test de course à pied maximal incrémenté. Ceci indique que la clairance du CO₂ réalisée par le tamponnage des ions hydrogène et par la ventilation n'était pas à son niveau maximal à la fin de T_{lim} . Ces résultats suggèrent que l'arrêt de l'exercice n'était pas relié à la baisse du pH sanguin. Ces données rendent en revanche possible l'hypothèse d'un phénomène d'hypoxémie-induite par l'exercice. Hue et al. (2001) ont montré en effet une baisse significative de la capacité de diffusion pulmonaire au monoxyde de carbone à la fin d'une épreuve enchaînée réalisée par des triathlètes de niveau régional (30min de pédalage à 67% de $\dot{V}O_{2max}$ puis 20min de course à pied à 64% de $\dot{V}O_{2max}$). L'hypoxémie induite par l'exercice est généralement engendrée par un œdème interstitiel et la baisse de la compliance pulmonaire, ce qui accroît la fatigue des muscles respiratoires engendrée par l'exercice (Dempsey et al. 1982). Toutefois, les résultats ici rapportés n'ont révélé ni une baisse significative des valeurs de $\dot{V}O_2$ ni l'atteinte de valeurs maximales de \dot{V}_E , ce qui suggère que l'arrêt de l'exercice n'était pas causé directement par des altérations d'origine ventilatoire.

Lactatémie. La valeur de $[La]_s$ à la fin du test maximal incrémenté en course à pied était significativement plus haute qu'à la fin de T_{lim} , ce qui suggère que l'accumulation des métabolites était plus faible à la fin de l'épreuve enchaînée qu'à la fin du test maximal incrémenté, si l'on considère que la lactatémie en constitue le reflet à l'exercice (Philp et al. 2005). Le recueil de paramètres additionnels (pH, réserve alcaline, hématocrite notamment) aurait néanmoins été nécessaire pour démontrer le maintien de l'homéostasie du milieu circulant à la fin de T_{lim} .

Difficulté d'effort perçue. Plusieurs auteurs ont proposé que la difficulté d'effort perçue est la variable qui limite de manière ultime la performance lors d'épreuves temps-limite à charge constante (Crewe et al. 2008; Tucker 2009). Dans cette perspective, la difficulté d'effort perçue augmenterait lors de l'exercice de sorte que ce dernier se terminerait lorsqu'une valeur maximale de difficulté perçue tolérable serait atteinte. Cette difficulté d'effort perçue maximale serait atteinte avant qu'une défaillance effective de l'un des systèmes physiologiques mis en jeu par l'exercice ne soit engendrée. Pour tester cette hypothèse, la difficulté d'effort perçue a été mesurée durant l'étude n°5 aussi bien lors de l'épreuve incrémentée que lors de l'épreuve cyclisme-course à pied. Les résultats ont révélé que l'arrêt de l'exercice coïncidait avec l'atteinte d'un niveau de difficulté maximal tolérable par les triathlètes ($> <\!\!\!>$ « très difficile » sur l'échelle de Borg). De plus, les valeurs de difficultés perçues à la fin de T_{lim} n'étaient pas significativement différentes de celles atteintes à la fin du test pédestre incrémenté. Etant donné les valeurs sous-maximales des paramètres métaboliques investigués à la fin de T_{lim} et la constance des paramètres neuromusculaires et biomécaniques, les présents résultats suggèrent que les triathlètes ont arrêté l'exercice alors qu'aucun système physiologique n'avait démontré de défaillances. Plusieurs hypothèses peuvent expliquer ce constat.

Baden et al. (2005) ont montré que la méconnaissance de la durée d'exercice engendre l'atteinte de plus hautes valeurs de difficulté perçue pour une intensité donnée. Par ailleurs, Swart et al. (2009) ont mis en évidence que lors d'un exercice où les sujets ont une connaissance de la durée d'effort à accomplir (exercice en boucle fermée), ils acceptent de développer une plus grande puissance de pédalage que lors d'une épreuve temps-limite, de sorte que la relation entre le travail produit et la difficulté d'effort perçue est moins forte à l'approche de la ligne d'arrivée. Ces observations suggèrent fortement que le test temps-limite cyclisme-course à pied de l'étude n°5 (exercice en boucle ouverte) est susceptible d'avoir confronté les triathlètes à une situation psychologique inconfortable engendrant un niveau de performance sous-maximale. Toutefois, leurs performances étaient supérieures à celles préalablement constatées chez des triathlètes très entraînés lors d'un protocole similaire consistant en 30min de pédalage à 90% du seuil lactique suivie d'un test temps-limite en course à pied à 85% de la vitesse associée à l'atteinte de $\dot{V}O_{2max}$ ($935 \pm 212s$ vs. $651 \pm 212s$, dans la présente étude et dans celle de Vercruyssen et al 2005, respectivement). Ceci suggère que le test cyclisme – course à pied réalisé par les triathlètes de l'étude n°5 pouvait être considéré comme maximal.

L'augmentation de la difficulté d'effort perçue lors de celui-ci semble principalement avoir été engendrée par la dérive de plusieurs paramètres physiologiques (*i.e.* notamment FC, \dot{V}_E et $[La^-]_s$). L'inconfort perçu au niveau des jambes, causé par la stimulation des nocicepteurs musculaires en raison de l'accumulation progressive des métabolites au cours de l'exercice, et la dyspnée, engendrée principalement par l'augmentation du débit ventilatoire, ont été identifiés comme les

deux principaux composants de la sensation de fatigue ressenties lors d'exercice de longue durée impliquant la mobilisation du corps entier (Marcora et al. 2008). Etant donné que le protocole expérimental de l'étude ne permettait pas aux triathlètes d'ajuster la cinétique d'augmentation de leur difficulté d'effort perçue par une modification leur allure de course, et que tous les paramètres physiologiques mesurés sont restés sous-maximaux à la fin du test cyclisme-course à pied, ces résultats suggèrent que l'exercice s'est terminé lorsqu'un niveau maximal de difficulté perçue a été atteint, sans pour autant qu'une défaillance physiologique n'ait été engendrée. L'arrêt semble avoir été engendré par l'épuisement des ressources psychologiques consenties par les triathlètes lors de cet exercice, avant que l'un des systèmes physiologiques mis en jeu n'atteigne ses limites adaptatives. D'autres investigations sont toutefois nécessaires pour confirmer cette hypothèse.

La charge constante imposée lors de la présente étude est susceptible d'être critiquée par les études n°2, n°3 et n°4 (Hausswirth et al. 2010; Le Meur et al. in press; Le Meur et al. 2009), menées lors de compétitions internationales, qui ont mis en évidence que les triathlètes révèlent des variations d'allure dans les trois disciplines. Toutefois, les résultats de l'étude n°3 soutiennent que ces fréquents ajustements de la vitesse de course permettent de prévenir la survenue de défaillances physiologiques graves. De façon intéressante, l'étude n°5 confirme ces données en suggérant que les triathlètes conservaient encore une capacité fonctionnelle de réserve (réserve en unités motrices et des réserves énergétiques notamment) lorsqu'ils ont stoppé l'exercice, malgré leur volonté de réaliser la meilleure performance possible. D'autres investigations apparaissent cependant indispensables étant donné qu'il n'est pas possible d'exclure que d'autres paramètres physiologiques, non mesurés durant la présente étude, aient été responsables de l'arrêt de l'exercice. L'atteinte de valeurs sous-maximales pour les paramètres métaboliques et cardiorespiratoires et la stabilité du patron de recrutement musculaire tout au long de l'épreuve maximale ne permettent pas d'affirmer avec certitude que l'arrêt de l'exercice n'était pas relié à une défaillance physiologique. L'interprétation de la commande centrale vers les muscles à partir de l'analyse du signal électromyographique de surface révèle notamment un certain nombre de limites (changements de coordination intramusculaire, déplacement du barycentre d'activation, phénomène d'annulation du signal), que nous ne pouvons exclure de notre analyse. Des phénomènes de compensation intermusculaire ne peuvent de plus être exclus ici, étant donné que l'activation de certains muscles du membre inférieur n'était pas mesurée. L'utilisation de la technique de neurostimulation (analyse de l'onde M) immédiatement après l'exercice aurait enfin permis de mieux pouvoir caractériser l'état de fatigue des muscles investigués post-exercice. Une analyse de certains paramètres sanguins (statut acido-basique, ammoniémie, hématocrite principalement), possiblement impliqués dans l'instauration d'un état de fatigue central aurait de même pu permettre

de tester l'hypothèse d'un maintien de l'état d'homéostasie du système circulant durant le test enchaîné mené à épuisement.

Enfin, un certain nombre de limites peuvent être adressées à la tâche à accomplir imposée aux triathlètes lors de l'étude n°5. Tel que l'ont mis en exergue les études n°1, n°2 et n°4, l'intensité d'exercice en triathlon distance Olympique est particulièrement variable, notamment lors de la section cycliste où le triathlète est libre de gérer celle-ci tout au long de l'épreuve, en fonction de l'évolution de son niveau de difficulté perçue et de la distance qu'il sait qu'il lui reste à parcourir. Dans cette perspective, le protocole mis en place dans la dernière étude n'est pas susceptible de refléter complètement le type de travail fourni par les triathlètes de haut niveau en compétition. Si les résultats obtenus par l'étude 5 semblent conforter l'hypothèse d'une limitation ultime de la performance en triathlon par le système nerveux central, des investigations complémentaires sont indispensables pour identifier si ce résultat se retrouve pour des triathlètes « élite », dans le cadre de protocoles reproduisant plus fidèlement les exigences de la compétition à haut niveau.

4. CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES

En résumé, ce travail de thèse aura permis de renforcer la compréhension des facteurs de la performance en triathlon à haut niveau et mis en exergue la possibilité d'optimiser la performance des triathlètes « élite » par l'adoption d'un départ moins rapide en course à pied. Les résultats obtenus ont souligné qu'il est nécessaire de s'inscrire dans une approche multidimensionnelle, tenant compte à la fois des caractéristiques intrinsèques du triathlète (caractéristiques physiologiques à l'exercice, sexe principalement) et de celles de son environnement (profil du parcours, adversaires) pour comprendre les stratégies d'allure adoptées en triathlon. Dans ce cadre, la construction d'une typologie des efforts associés aux principales conditions de course rencontrées en Coupe du Monde de triathlon, eût égard au profil du parcours notamment (plats ou vallonnés), incarne une perspective de recherche intéressante, afin d'optimiser la programmation de l'entraînement des triathlètes à haut niveau.

Au-delà de la modélisation des stratégies d'allure en triathlon, la compréhension de celles-ci aura constitué une opportunité intéressante d'appréhender le phénomène de fatigue aigue liée à la pratique de cette activité. Interroger ces stratégies oblige en effet à comprendre la manière dont les triathlètes s'adaptent en compétition pour gérer les modifications physiologiques engendrées par leur pratique de leur sport. Si cette analyse des variations de l'intensité d'exercice produite (régulée ?) est rendue complexe par les multiples facteurs qui influencent les variations d'allure des triathlètes lors d'épreuves internationales, l'étude de ces phénomènes incarne néanmoins

l'opportunité d'appréhender la fatigue en triathlon dans ses conditions écologiques d'expression.

Etant donné que l'étude de ces phénomènes ne semble possible qu'à condition de s'inscrire dans une approche multicentrique et synergique, les prochaines recherches devront tenter de modéliser la manière dont les processus physiologiques, psychologiques et contextuels interagissent pour déterminer la stratégie d'allure adoptée par les athlètes en compétition.

REFERENCES

- A**bbiss CR, Laursen PB (2005) Models to explain fatigue during prolonged endurance cycling. *Sports Med* 35: 865-898
- Abbiss CR, Laursen PB (2008) Describing and understanding pacing strategies during athletic competition. *Sports Med* 38: 239-252
- Abbiss CR, Quod MJ, Martin DT, Netto KJ, Nosaka K, Lee H, Surriano R, Bishop D, Laursen PB (2006) Dynamic pacing strategies during the cycle phase of an Ironman triathlon. *Med Sci Sports Exerc* 38: 726-734
- 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
- Ackland J (2001) Pack formation in cycling and orienteering. *Nature* 413: 127
- Albertus Y, Tucker R, St Clair Gibson A, Lambert EV, Hampson DB, Noakes TD (2005) Effect of distance feedback on pacing strategy and perceived exertion during cycling. *Med Sci Sports Exerc* 37: 461-468
- Albrecht TJ, Foster VL, Dickinson AL, De Bever JM (1989) Triathletes: exercise parameters measured during bicycle, swim bench and treadmill testing. *Medicine and Science in Sports and Exercise* 18: S86
- Allen DG, Lamb GD, Westerblad H (2008) Skeletal muscle fatigue: cellular mechanisms. *Physiol Rev* 88: 287-332
- Ansley L, Robson PJ, St Clair Gibson A, Noakes TD (2004) Anticipatory pacing strategies during supramaximal exercise lasting longer than 30 s. *Med Sci Sports Exerc* 36: 309-314
- Arai Y, Saul JP, Albrecht P, Hartley LH, Lilly LS, Cohen RJ, Colucci WS (1989) Modulation of cardiac autonomic activity during and immediately after exercise. *Am J Physiol* 256: H132-141
- Armstrong RB, Ogilvie RW, Schwane JA (1983) Eccentric exercise-induced injury to rat skeletal muscle. *J Appl Physiol* 54: 80-93
- Arsac LM, Locatelli E (2002) Modeling the energetics of 100-m running by using speed curves of world champions. *J Appl Physiol* 92: 1781-1788
- Astrand PO, Rodahl K (1970) *Textbook of Work Physiology*. McGraw-Hill, New York
- Astrand PO, Saltin B (1961) Maximal oxygen uptake and heart rate in various types of muscular activity. *J Appl Physiol* 16: 977-981
- Atkinson G, Brunskill A (2000) Pacing strategies during a cycling time trial with simulated headwinds and tailwinds. *Ergonomics* 43: 1449-1460
- Atkinson G, Edwards B (1997) Pacing strategy and cycling performance: field data from the 1997 British 16 km time-trial championship [abstract]. In: Sargeant AJ SH, editors. (ed) *Proceedings of the Third Annual Congress of the European College of Sports Science*, Liverpool
- Atkinson G, Peacock O, Law M (2007) Acceptability of power variation during a simulated hilly time trial. *Int J Sports Med* 28: 157-163
- Aubert AE, Seps B, Beckers F (2003) Heart rate variability in athletes. *Sports Med* 33: 889-919
- B**aden DA, McLean TL, Tucker R, Noakes TD, 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: 742-746; discussion 742-746
- Bailey SJ, Vanhatalo A, Dimenna FJ, Wilkerson DP, Jones AM (2010) A Fast-Start Strategy Improves VO₂ Kinetics and High-Intensity Exercise Performance. *Med Sci Sports Exerc*
- Bailey TW, Hermes SM, Andresen MC, Aicher SA (2006) Cranial visceral afferent pathways through the nucleus of the solitary tract to caudal ventrolateral medulla or paraventricular hypothalamus: target-specific

- synaptic reliability and convergence patterns. *J Neurosci* 26: 11893-11902
- Baldwin J, Snow RJ, Gibala MJ, Garnham A, Howarth K, Febbraio MA (2003) Glycogen availability does not affect the TCA cycle or TAN pools during prolonged, fatiguing exercise. *J Appl Physiol* 94: 2181-2187
- Balmer J, Davison RC, Coleman DA, Bird SR (2000) The validity of power output recorded during exercise performance tests using a Kingcycle air-braked cycle ergometer when compared with an SRM powermeter. *Int J Sports Med* 21: 195-199
- Baron B, Deruelle F, Moullan F, Dalleau G, Verkindt C, Noakes TD (2009) The eccentric muscle loading influences the pacing strategies during repeated downhill sprint intervals. *Eur J Appl Physiol* 105: 749-757
- Baron B, Moullan F, Deruelle F, Noakes TD (in press) The role of emotions on pacing strategies and performance in middle and long duration sport events. *Br J Sports Med*
- Basset FA, Boulay MR (2000) Specificity of treadmill and cycle ergometer tests in triathletes, runners and cyclists. *European Journal Of Applied Physiology* 81: 214-221
- Bassett DR, Jr., Flohr J, Duey WJ, Howley ET, Pein RL (1991) Metabolic responses to drafting during front crawl swimming. *Med Sci Sports Exerc* 23: 744-747
- Bassett DR, Jr., Howley ET (1997) Maximal oxygen uptake: "classical" versus "contemporary" viewpoints. *Med Sci Sports Exerc* 29: 591-603
- Bentley DJ, McNaughton LR, Lamyman R, Roberts SP (2003) The effects of prior incremental cycle exercise on the physiological responses during incremental running to exhaustion: relevance for sprint triathlon performance. *J Sports Sci* 21: 29-38
- Bentley DJ, McNaughton LR, Thompson D, Vleck VE, Batterham AM (2001) Peak power output, the lactate threshold, and time trial performance in cyclists. *Med Sci Sports Exerc* 33: 2077-2081
- Bentley DJ, Wilson GJ, Davie AJ, Zhou S (1998) Correlations between peak power output, muscular strength and cycle time trial performance in triathletes. *Journal of Sports Medicine and Physical Fitness* 38: 201-207
- Bergstrom J, Hermansen L, Hultman E, Saltin B (1967) Diet, muscle glycogen and physical performance. *Acta Physiol Scand* 71: 140-150
- Bernard T, Hausswirth C, Le Meur Y, Bignet F, Dorel S, Brisswalter J (2009) Distribution of power output during the cycling stage of a Triathlon World Cup. *Med Sci Sports Exerc* 41: 1296-1302
- Bernard T, Vercruyssen F, Grego F, Hausswirth C, Lepers R, Vallier JM, Brisswalter J (2003) Effect of cycling cadence on subsequent 3 km running performance in well trained triathletes. *Br J Sports Med* 37: 154-158; discussion 159
- Bernard T, Vercruyssen F, Mazure C, Gorce P, Hausswirth C, Brisswalter J (2007) Constant versus variable-intensity during cycling: effects on subsequent running performance. *Eur J Appl Physiol* 99: 103-111
- Berthelot G, Tafflet M, El Helou N, Len S, Escolano S, Guillaume M, Nassif H, Tolaini J, Thibault V, Desgorces FD, Hermine O, Toussaint JF (2010) Athlete atypicality on the edge of human achievement: performances stagnate after the last peak, in 1988. *PLoS One* 5: e8800
- Berthelot G, Thibault V, Tafflet M, Escolano S, El Helou N, Jouven X, Hermine O, Toussaint JF (2008) The citius end: world records progression announces the completion of a brief ultra-physiological quest. *PLoS One* 3: e1552
- Billat LV, Koralsztein JP, Morton RH (1999) Time in human endurance models. From empirical models to physiological models. *Sports Med* 27: 359-379
- Billat VL, Demarle A, Slawinski J, Paiva M, Koralsztein JP (2001a) Physical and training characteristics of top-class marathon runners. *Med Sci Sports Exerc* 33: 2089-2097
- Billat VL, Slawinski J, Danel M, Koralsztein JP (2001b) Effect of free versus constant pace on

- performance and oxygen kinetics in running. *Med Sci Sports Exerc* 33: 2082-2088
- Billaut F, Basset FA, Falgairette G (2005) Muscle coordination changes during intermittent cycling sprints. *Neurosci Lett* 380: 265-269
- Bishop D, Bonetti D, Dawson B (2002) The influence of pacing strategy on VO₂ and supramaximal kayak performance. *Med Sci Sports Exerc* 34: 1041-1047
- Bishop D, Jenkins DG, Mackinnon LT (1998) The relationship between plasma lactate parameters, *Wpeak* and 1-h cycling performance in women. *Med Sci Sports Exerc* 30: 1270-1275
- Boning D, Gonen Y, Maassen N (1984) Relationship between work load, pedal frequency, and physical fitness. *Int J Sports Med* 5: 92-97
- Boone T, Kreider RB (1986) Bicycle exercise before running: effect on performance. *Annals of Sports Med* 3: 25-29
- Borg G (1970) Perceived exertion as an indicator of somatic stress. *Scand J Rehabil Med* 2: 92-98
- Borg GA (1982) Psychophysical bases of perceived exertion. *Med Sci Sports Exerc* 14: 377-381
- Bourdin M, Pastene J, Germain M, Lacour JR (1993) Influence of training, sex, age and body mass on the energy cost of running. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol* 66: 439-444
- Boussana A, Matecki S, Galy O, Hue O, Ramonatxo M, Le Gallais D (2001) The effect of exercise modality on respiratory muscle performance in triathletes. *Med Sci Sports Exerc* 33: 2036-2043
- Brink-Elfegoun T, Kaijser L, Gustafsson T, Ekblom B (2007) Maximal oxygen uptake is not limited by a central nervous system governor. *J Appl Physiol* 102: 781-786
- Brisswalter J, Legros P (1994a) Daily stability in energy cost of running, respiratory parameters and stride rate among well-trained middle distance runners. *Int J Sports Med* 15: 238-241
- Brisswalter J, Legros P (1994b) Variability in energy cost of running during one training season in high level runners. *J Sports Med Phys Fitness* 34: 135-140
- Brooks GA (1985) Anaerobic threshold: review of the concept and directions for future research. *Med Sci Sports Exerc* 17: 22-34
- Brooks GA (1986) Lactate production under fully aerobic conditions: the lactate shuttle during rest and exercise. *Fed Proc* 45: 2924-2929
- Brooks GA, Mercier J (1994) Balance of carbohydrate and lipid utilization during exercise: the "crossover" concept. *J Appl Physiol* 76: 2253-2261
- Brosnan MJ, Martin DT, Hahn AG, Gore CJ, Hawley JA (2000) Impaired interval exercise responses in elite female cyclists at moderate simulated altitude. *J Appl Physiol* 89: 1819-1824
- Brown SN, Chitravanshi VC, Kawabe K, Sapru HN (2007) Microinjections of melanin concentrating hormone into the nucleus tractus solitarius of the rat elicit depressor and bradycardic responses. *Neuroscience* 150: 796-806
- Bruck K, Olschewski H (1987) Body temperature related factors diminishing the drive to exercise. *Can J Physiol Pharmacol* 65: 1274-1280
- Bunc V, Heller J, Horcic J, Novotny J (1996) Physiological profile of best Czech male and female young triathletes. *Journal of Sports Medicine and Physical Fitness* 36: 265-270
- Burke LM, Hawley JA, Angus DJ, Cox GR, Clark SA, Cummings NK, Desbrow B, Hargreaves M (2002) Adaptations to short-term high-fat diet persist during exercise despite high carbohydrate availability. *Med Sci Sports Exerc* 34: 83-91
- Butts NK, Henry BA, McLean D (1991a) Correlations between VO_{2max} and performance times of recreational triathletes. *J Sports Med Phys Fitness* 31: 339-344

- Butts NK, Henry BA, McLean D (1991b) Correlations between $VO_{2\text{max}}$ and performance times of recreational triathletes. *Journal of Sports Medicine and Physical Fitness* 31: 339-344
- C**farelli E (1982) Peripheral contributions to the perception of effort. *Med Sci Sports Exerc* 14: 382-389
- Cairns SP (2006) Lactic acid and exercise performance : culprit or friend? *Sports Med* 36: 279-291
- Carey AL, Staudacher HM, Cummings NK, Stepto NK, Nikolopoulos V, Burke LM, Hawley JA (2001) Effects of fat adaptation and carbohydrate restoration on prolonged endurance exercise. *J Appl Physiol* 91: 115-122
- Chatard JC, Chollet D, Millet G (1998) Performance and drag during drafting swimming in highly trained triathletes. *Med Sci Sports Exerc* 30: 1276-1280
- Chatard JC, Lavoie JM, Lacour JR (1990) Analysis of determinants of swimming economy in front crawl. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol* 61: 88-92
- Chatard JC, Senegas X, Selles M, Dreanot P, Geyssant A (1995) Wet suit effect: a comparison between competitive swimmers and triathletes. *Med Sci Sports Exerc* 27: 580-586
- Chatard JC, Wilson B (2003) Drafting distance in swimming. *Med Sci Sports Exerc* 35: 1176-1181
- Chen QH, Toney GM (2003) Identification and characterization of two functionally distinct groups of spinal cord-projecting paraventricular nucleus neurons with sympathetic-related activity. *Neuroscience* 118: 797-807
- Cheng B, Kuipers H, Snyder AC, Keizer HA, Jeukendrup A, Hesselink M (1992) A new approach for the determination of ventilatory and lactate thresholds. *Int J Sports Med* 13: 518-522
- Cheung SS, McLellan TM (1998) Influence of short-term aerobic training and hydration status on tolerance during uncompensable heat stress. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol* 78: 50-58
- Cheung SS, Sleivert GG (2004) Multiple triggers for hyperthermic fatigue and exhaustion. *Exerc Sport Sci Rev* 32: 100-106
- Chicharro JL, Perez M, Vaquero AF, Lucia A, Legido JC (1997) Lactic threshold vs ventilatory threshold during a ramp test on a cycle ergometer. *J Sports Med Phys Fitness* 37: 117-121
- Chollet D, Hue O, Auclair F, Millet G, Chatard JC (2000) The effects of drafting on stroking variations during swimming in elite male triathletes. *Eur J Appl Physiol* 82: 413-417
- Clarkson PM (2007) Exertional rhabdomyolysis and acute renal failure in marathon runners. *Sports Med* 37: 361-363
- Conley DL, Krahenbuhl GS (1980) Running economy and distance running performance of highly trained athletes. *Med Sci Sports Exerc* 12: 357-360
- Conley DL, Krahenbuhl GS, Burkett K, Lynn Millar A (1984) Following Steve Scott: Physiological Changes accompanying Training. *Phys Sportsmed* 12: 103-106
- Connell RJ, Gayeski TE, Honig CR (1984) Lactate accumulation in fully aerobic, working, dog gracilis muscle. *Am J Physiol* 246: H120-128
- Costill DL (1967) The relationship between selected physiological variables and distance running performance. *J Sports Med Phys Fitness* 7: 61-66
- Costill DL, Fink WJ, Pollock ML (1976) Muscle fiber composition and enzyme activities of elite distance runners. *Med Sci Sports* 8: 96-100
- Costill DL, Kovaleski J, Porter D, Kirwan J, Fielding R, King D (1985) Energy expenditure during front crawl swimming: predicting success in middle-distance events. *Int J Sports Med* 6: 266-270
- Costill DL, Thomason H, Roberts E (1973) Fractional utilization of the aerobic capacity

- during distance running. *Med Sci Sports* 5: 248-252
- Coyle EF (1995a) Integration of the physiological factors determining endurance performance ability. *Exerc Sport Sci Rev* 23: 25-63
- Coyle EF (1995b) Substrate utilization during exercise in active people. *Am J Clin Nutr* 61: 968S-979S
- Coyle EF, Coggan AR (1984) Effectiveness of carbohydrate feeding in delaying fatigue during prolonged exercise. *Sports Med* 1: 446-458
- Coyle EF, Coggan AR, Hopper MK, Walters TJ (1988) Determinants of endurance in well-trained cyclists. *J Appl Physiol* 64: 2622-2630
- Coyle EF, Martin WH, 3rd, Sinacore DR, Joyner MJ, Hagberg JM, Holloszy JO (1984) Time course of loss of adaptations after stopping prolonged intense endurance training. *J Appl Physiol* 57: 1857-1864
- Crewe H, Tucker R, Noakes TD (2008) The rate of increase in rating of perceived exertion predicts the duration of exercise to fatigue at a fixed power output in different environmental conditions. *Eur J Appl Physiol* 103: 569-577
- D**amasio AR, Grabowski TJ, Bechara A, Damasio H, Ponto LL, Parvizi J, Hichwa RD (2000) Subcortical and cortical brain activity during the feeling of self-generated emotions. *Nat Neurosci* 3: 1049-1056
- Dampney RA, Horiuchi J, Killinger S, Sheriff MJ, Tan PS, McDowall LM (2005) Long-term regulation of arterial blood pressure by hypothalamic nuclei: some critical questions. *Clin Exp Pharmacol Physiol* 32: 419-425
- Daniels J, Scardina N, Hayes J, Foley P (1984) Variations in VO₂ during submaximal treadmill running. *Med Sci Sports* 16: 108-112
- Daniels JT (1985) A physiologist's view of running economy. *Med Sci Sports Exerc* 17: 332-338
- Danner T, Plowman SA (1995) Running economy following an intense cycling bout in female duathletes and triathletes. *Women in Sport and Physical Activity Journal* 4: 29-39
- Davies KJ, Maguire JJ, Brooks GA, Dallman PR, Packer L (1982) Muscle mitochondrial bioenergetics, oxygen supply, and work capacity during dietary iron deficiency and repletion. *Am J Physiol* 242: E418-427
- Davis HA, Gass GC, Eager D, Bassett J (1981) Oxygen deficit during incremental exercise. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol* 47: 133-140
- Davis JA (1985) Anaerobic threshold: review of the concept and directions for future research. *Med Sci Sports Exerc* 17: 6-21
- Davison RC, Swan D, Coleman D, Bird S (2000) Correlates of simulated hill climb cycling performance. *J Sports Sci* 18: 105-110
- de Koning JJ, Bobbert MF, Foster C (1999) Determination of optimal pacing strategy in track cycling with an energy flow model. *J Sci Med Sport* 2: 266-277
- De Vito G, Bernardi M, Sproviero E, Figura F (1995) Decrease of endurance performance during Olympic triathlon. *Int J Sports Med* 16: 24-28
- Decorte N, Lafaix PA, Millet GY, Wuyam B, Verges S (in press) Central and peripheral fatigue kinetics during exhaustive constant-load cycling. *Scand J Med Sci Sports*
- Delestrat A, Bernard T, Hausswirth C, Vercruyssen F, Brisswalter J (2003a) [Effects of swimming with a wet suit on energy expenditure during subsequent cycling.]. *Can J Appl Physiol* 28: 356-369
- Delestrat A, Brisswalter J, Hausswirth C, Bernard T, Vallier JM (2005) Does prior 1500-m swimming affect cycling energy expenditure in well-trained triathletes? *Can J Appl Physiol* 30: 392-403
- Delestrat A, Tricot V, Bernard T, Vercruyssen F, Hausswirth C, Brisswalter J (2003b) Drafting during swimming improves efficiency during subsequent cycling. *Med Sci Sports Exerc* 35: 1612-1619
- Dempsey J, Hanson P, Pegelow D, Claremont A, Rankin J (1982) Limitations to exercise

- capacity and endurance: pulmonary system. *Can J Appl Sport Sci* 7: 4-13
- Dengel DR, Flynn MG, Costill DL, Kirwan JP (1989a) Determinants of success during triathlon competition. *Res Q Exerc Sport* 60: 234-238
- Dengel DR, Flynn MG, Costill DL, Kirwan JP (1989b) Determinants of success during triathlon competition. *Res Q Exerc Sport* 60: 234-238
- di Prampero PE (1981) Energetics of muscular exercise. *Rev Physiol Biochem Pharmacol* 89: 143-222
- di Prampero PE (1986) The energy cost of human locomotion on land and in water. *Int J Sports Med* 7: 55-72
- di Prampero PE (2000) Cycling on Earth, in space, on the Moon. *Eur J Appl Physiol* 82: 345-360
- di Prampero PE (2003) Factors limiting maximal performance in humans. *Eur J Appl Physiol* 90: 420-429
- di Prampero PE, Atchou G, Bruckner JC, Moia C (1986) The energetics of endurance running. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol* 55: 259-266
- Di Prampero PE, Capelli C, Pagliaro P, Antonutto G, Girardis M, Zamparo P, Soule RG (1993) Energetics of best performances in middle-distance running. *J Appl Physiol* 74: 2318-2324
- di Prampero PE, Cortili G, Mognoni P, Saibene F (1979) Equation of motion of a cyclist. *J Appl Physiol* 47: 201-206
- Dorel S, Drouet JM, Couturier A, Champoux Y, Hug F (2009) Changes of pedaling technique and muscle coordination during an exhaustive exercise. *Med Sci Sports Exerc* 41: 1277-1286
- Dousset E, Steinberg JG, Faucher M, Jammes Y (2002) Acute hypoxemia does not increase the oxidative stress in resting and contracting muscle in humans. *Free Radic Res* 36: 701-704
- Drust B, Rasmussen P, Mohr M, Nielsen B, Nybo L (2005) Elevations in core and muscle temperature impairs repeated sprint performance. *Acta Physiol Scand* 183: 181-190
- Dudley GA, Abraham WM, Terjung RL (1982) Influence of exercise intensity and duration on biochemical adaptations in skeletal muscle. *J Appl Physiol* 53: 844-850
- Duffield R, Dawson B, Pinnington HC, Wong P (2004) Accuracy and reliability of a Cosmed K4b2 portable gas analysis system. *J Sci Med Sport* 7: 11-22
- Duffield R, Green R, Castle P, Maxwell N (2010) Precooling can prevent the reduction of self-paced exercise intensity in the heat. *Med Sci Sports Exerc* 42: 577-584
- Durstine JL, Pate RR, Sparling PB, Wilson GE, Senn MD, Bartoli WP (1987) Lipid, lipoprotein, and iron status of elite women distance runners. *Int J Sports Med* 8 Suppl 2: 119-123
- Ebert TR, Martin DT, McDonald W, Victor J, Plummer J, Withers RT (2005) Power output during women's World Cup road cycle racing. *Eur J Appl Physiol* 95: 529-536
- Ebert TR, Martin DT, Stephens B, Withers RT (2006) Power output during a professional men's road-cycling tour. *Int J Sports Physiol Perform* 1: 324-335
- Edwards AG, Byrnes WC (2007) Aerodynamic characteristics as determinants of the drafting effect in cycling. *Med Sci Sports Exerc* 39: 170-176
- Ekblom B, Hermansen L (1968) Cardiac output in athletes. *J Appl Physiol* 25: 619-625
- Esteve-Lanao J, Foster C, Seiler S, Lucia A (2007) Impact of training intensity distribution on performance in endurance athletes. *J Strength Cond Res* 21: 943-949
- Faria EW, Parker DL, Faria IE (2005a) The science of cycling: factors affecting performance - part 2. *Sports Med* 35: 313-337
- Faria EW, Parker DL, Faria IE (2005b) The science of cycling: physiology and training - part 1. *Sports Med* 35: 285-312

- Farrell PA, Wilmore JH, Coyle EF, Billing JE, Costill DL (1979) Plasma lactate accumulation and distance running performance. *Med Sci Sports* 11: 338-344
- Farrell SW, Ivy JL (1987) Lactate acidosis and the increase in VE/VO_2 during incremental exercise. *J Appl Physiol* 62: 1551-1555
- Ferro A, Rivera O, Pagola I, Ferreruela M, Martin A, Rocandio V (2001) Biomechanical analysis of the 7th World Championships in Athletics Seville 1999. *News studies in athletics* 16: 25-60
- Fink WJ, Costill DL, Van Handel PJ (1975) Leg muscle metabolism during exercise in the heat and cold. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol* 34: 183-190
- Fiskerstrand A, Seiler KS (2004) Training and performance characteristics among Norwegian international rowers 1970-2001. *Scand J Med Sci Sports* 14: 303-310
- Fortney SM, Vroman NB (1985) Exercise, performance and temperature control: temperature regulation during exercise and implications for sports performance and training. *Sports Med* 2: 8-20
- Foster C, De Koning JJ, Hettinga F, Lampen J, La Clair KL, Dodge C, Bobbert M, Porcari JP (2003) Pattern of energy expenditure during simulated competition. *Med Sci Sports Exerc* 35: 826-831
- Foster C, deKoning JJ, Hettinga F, Lampen J, Dodge C, Bobbert M, Porcari JP (2004) Effect of competitive distance on energy expenditure during simulated competition. *Int J Sports Med* 25: 198-204
- Foster C, Hendrickson KJ, Peyer K, Reiner B, deKoning JJ, Lucia A, Battista RA, Hettinga FJ, Porcari JP, Wright G (2009) Pattern of developing the performance template. *Br J Sports Med* 43: 765-769
- Foster C, Hoyos J, Earnest C, Lucia A (2005) Regulation of energy expenditure during prolonged athletic competition. *Med Sci Sports Exerc* 37: 670-675
- Foster C, Lucia A (2007) Running economy : the forgotten factor in elite performance. *Sports Med* 37: 316-319
- Foster C, Schrager M, Snyder AC, Thompson NN (1994) Pacing strategy and athletic performance. *Sports Med* 17: 77-85
- Foster C, Snyder AC, Thompson NN, Green MA, Foley M, Schrager M (1993) Effect of pacing strategy on cycle time trial performance. *Med Sci Sports Exerc* 25: 383-388
- Francescato MP, Girardis M, di Prampero PE (1995) Oxygen cost of internal work during cycling. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol* 72: 51-57
- Freund BJ, Joyner MJ, Jilka SM, Kalis J, Nittolo JM, Taylor JA, Peters H, Feese G, Wilmore JH (1987) Thermoregulation during prolonged exercise in heat: alterations with beta-adrenergic blockade. *J Appl Physiol* 63: 930-936
- Fukuba Y, Whipp BJ (1999) A metabolic limit on the ability to make up for lost time in endurance events. *J Appl Physiol* 87: 853-861
- Fuller A, Carter RN, Mitchell D (1998) Brain and abdominal temperatures at fatigue in rats exercising in the heat. *J Appl Physiol* 84: 877-883
- G**esser GA, Brooks GA (1975) Muscular efficiency during steady-rate exercise: effects of speed and work rate. *J Appl Physiol* 38: 1132-1139
- Gagnon D, Lemire BB, Jay O, Kenny GP (2010) Aural canal, esophageal, and rectal temperatures during exertional heat stress and the subsequent recovery period. *J Athl Train* 45: 157-163
- Galloway SD, Maughan RJ (1997) Effects of ambient temperature on the capacity to perform prolonged cycle exercise in man. *Med Sci Sports Exerc* 29: 1240-1249
- Galy O, Hue O, Boussana A, Peyreigne C, Courret I, Le Gallais D, Mercier J, Prefaut C (2003) Effects of the order of running and cycling of similar intensity and duration on

- pulmonary diffusing capacity in triathletes. *Eur J Appl Physiol* 90: 489-495
- Galy O, Hue O, Chamari K, Boussana A, Chaouachi A, Prefaut C (2008) Influence of performance level on exercise-induced arterial hypoxemia during prolonged and successive exercise in triathletes. *Int J Sports Physiol Perform* 3: 482-500
- Gandevia SC (2001) Spinal and supraspinal factors in human muscle fatigue. *Physiol Rev* 81: 1725-1789
- Garcin M, Vandewalle H, Monod H (1999) A new rating scale of perceived exertion based on subjective estimation of exhaustion time: a preliminary study. *Int J Sports Med* 20: 40-43
- Garland SW (2005) An analysis of the pacing strategy adopted by elite competitors in 2000 m rowing. *Br J Sports Med* 39: 39-42
- Gastin PB (2001) Energy system interaction and relative contribution during maximal exercise. *Sports Med* 31: 725-741
- Glaister M (2005) Multiple sprint work : physiological responses, mechanisms of fatigue and the influence of aerobic fitness. *Sports Med* 35: 757-777
- Glaister M, Stone MH, Stewart AM, Hughes M, Moir GL (2005) The influence of recovery duration on multiple sprint cycling performance. *J Strength Cond Res* 19: 831-837
- Gonzalez-Alonso J (2007) Hyperthermia impairs brain, heart and muscle function in exercising humans. *Sports Med* 37: 371-373
- Gonzalez-Alonso J, Teller C, Andersen SL, Jensen FB, Hyldig T, Nielsen B (1999) Influence of body temperature on the development of fatigue during prolonged exercise in the heat. *J Appl Physiol* 86: 1032-1039
- Gray MA, Harrison NA, Wiens S, Critchley HD (2007) Modulation of emotional appraisal by false physiological feedback during fMRI. *PLoS One* 2: e546
- Green HJ, Hughson RL, Orr GW, Ranney DA (1983) Anaerobic threshold, blood lactate, and muscle metabolites in progressive exercise. *J Appl Physiol* 54: 1032-1038
- Gregg SG, Mazzeo RS, Budinger TF, Brooks GA (1989a) Acute anemia increases lactate production and decreases clearance during exercise. *J Appl Physiol* 67: 756-764
- Gregg SG, Willis WT, Brooks GA (1989b) Interactive effects of anemia and muscle oxidative capacity on exercise endurance. *J Appl Physiol* 67: 765-770
- Guezennec CY, Vallier JM, Bigard AX, Durey A (1996) Increase in energy cost of running at the end of a triathlon. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol* 73: 440-445
- Guilhem G, Dorel S, Hug F (2009) Effects of a prior short simulated training session on the subsequent occurrence of ventilatory thresholds. *J Sci Med Sport* 12: 273-279
- Guyenet PG (2006) The sympathetic control of blood pressure. *Nat Rev Neurosci* 7: 335-346
- H**agberg JM, Coyle EF, Carroll JE, Miller JM, Martin WH, Brooke MH (1982) Exercise hyperventilation in patients with McArdle's disease. *J Appl Physiol* 52: 991-994
- Hampson DB, St Clair Gibson A, Lambert MI, Dugas JP, Lambert EV, Noakes TD (2004) Deception and perceived exertion during high-intensity running bouts. *Percept Mot Skills* 98: 1027-1038
- Hampson DB, St Clair Gibson A, Lambert MI, Noakes TD (2001) The influence of sensory cues on the perception of exertion during exercise and central regulation of exercise performance. *Sports Med* 31: 935-952
- Hardy CJ, Rejeski WJ (1989) Not what, but how one feels – the measurement of affect during exercise. *J Sport Psychol* 11: 304-317
- Hausswirth C, Bigard AX, Berthelot M, Thomaidis M, Guezennec CY (1996) Variability in energy cost of running at the end of a triathlon and a marathon. *Int J Sports Med* 17: 572-579
- Hausswirth C, Bigard AX, Guezennec CY (1997a) Relationships between running mechanics and energy cost of running at the end of a triathlon and a marathon. *Int J Sports Med* 18: 330-339

- Hausswirth C, Bigard AX, Le Chevalier JM (1997b) The Cosmed K4 telemetry system as an accurate device for oxygen uptake measurements during exercise. *Int J Sports Med* 18: 449-453
- Hausswirth C, Brisswalter J (2008) Strategies for improving performance in long duration events: Olympic distance triathlon. *Sports Med* 38: 881-891
- Hausswirth C, Brisswalter J, Vallier JM, Smith D, Lepers R (2000) Evolution of electromyographic signal, running economy, and perceived exertion during different prolonged exercises. *Int J Sports Med* 21: 429-436
- Hausswirth C, Le Meur Y, Bieuzen F, Brisswalter J, Bernard T (2010) Pacing strategy during the initial phase of the run in triathlon: influence on overall performance. *Eur J Appl Physiol* 108: 1115-1123
- Hausswirth C, Le Meur Y, Couturier A, Bernard T, Brisswalter J (2009) Accuracy and repeatability of the Polar RS800sd to evaluate stride rate and running speed. *Int J Sports Med* 30: 354-359
- Hausswirth C, Lehenaff D (2001) Physiological demands of running during long distance runs and triathlons. *Sports Med* 31: 679-689
- Hausswirth C, Lehenaff D, Dreano P, Savonen K (1999) Effects of cycling alone or in a sheltered position on subsequent running performance during a triathlon. *Med Sci Sports Exerc* 31: 599-604
- Hausswirth C, Vallier JM, Lehenaff D, Brisswalter J, Smith D, Millet G, Dreano P (2001) Effect of two drafting modalities in cycling on running performance. *Med Sci Sports Exerc* 33: 485-492
- Havemann L, West SJ, Goedecke JH, Macdonald IA, St Clair Gibson A, Noakes TD, Lambert EV (2006) Fat adaptation followed by carbohydrate loading compromises high-intensity sprint performance. *J Appl Physiol* 100: 194-202
- Herman JP, Figueiredo H, Mueller NK, Ulrich-Lai Y, Ostrander MM, Choi DC, Cullinan WE (2003) Central mechanisms of stress integration: hierarchical circuitry controlling hypothalamo-pituitary-adrenocortical responsiveness. *Front Neuroendocrinol* 24: 151-180
- Hettinga FJ, De Koning JJ, Broersen FT, Van Geffen P, Foster C (2006) Pacing strategy and the occurrence of fatigue in 4000-m cycling time trials. *Med Sci Sports Exerc* 38: 1484-1491
- Hettinga FJ, de Koning JJ, Hulleman M, Foster C (in press) Relative importance of pacing strategy and mean power output in 1500-m self-paced cycling. *Br J Sports Med*
- Hill AV, Long CHN, Lupton H (1924) Muscular exercise, lactic acid and the supply and utilisation of oxygen: parts VII-VIII. *Proc Royal Soc Bri* 97: 155-176
- Hill AV, Lupton H (1923) Muscular activity, lactic acid, and the supply and utilization of oxygen. *Quart J Med* 16: 135-171
- Hill NS, Jacoby C, Farber HW (1991) Effect of an endurance triathlon on pulmonary function. *Med Sci Sports Exerc* 23: 1260-1264
- Hirsch JA, Bishop B (1982) Human breathing patterns on mouthpiece or face mask during air, CO₂, or low O₂. *J Appl Physiol* 53: 1281-1290
- Holloszy JO, Rennie MJ, Hickson RC, Conlee RK, Hagberg JM (1977) Physiological consequences of the biochemical adaptations to endurance exercise. *Ann N Y Acad Sci* 301: 440-450
- Hopkins WG (2009) The implausible governor. *Sportsci* 13: 9-11
- Horowitz JF, Sidossis LS, Coyle EF (1994) High efficiency of type I muscle fibers improves performance. *Int J Sports Med* 15: 152-157
- Housh TJ, Perry SR, Bull AJ, Johnson GO, Ebersole KT, Housh DJ, deVries HA (2000) Mechanomyographic and electromyographic responses during submaximal cycle ergometry. *Eur J Appl Physiol* 83: 381-387
- Howley ET, Bassett DR, Jr., Welch HG (1995) Criteria for maximal oxygen uptake: review

- and commentary. *Med Sci Sports Exerc* 27: 1292-1301
- Hue O (2003) Prediction of drafted-triathlon race time from submaximal laboratory testing in elite triathletes. *Canadian Journal Of Applied Physiology* 28: 547-560
- Hue O, Le Gallais D, Boussana A, Galy O, Chamari K, Mercier B, Prefaut C (2000a) Catecholamine, blood lactate and ventilatory responses to multi-cycle-run blocks. *Med Sci Sports Exerc* 32: 1582-1586
- Hue O, Le Gallais D, Boussana A, Prefaut C (2001) DLCO response to experimental cycle-run succession in triathletes. *J Sports Med Phys Fitness* 41: 441-447
- Hue O, Le Gallais D, Chollet D, Prefaut C (2000b) Ventilatory threshold and maximal oxygen uptake in present triathletes. *Canadian J Appl Physiol* 25: 102-113
- Hulleman M, De Koning JJ, Hettinga FJ, Foster C (2007) The effect of extrinsic motivation on cycle time trial performance. *Med Sci Sports Exerc* 39: 709-715
- Mpellizzi F, Sassi A, Rodriguez-Alonso M, Mognoni P, Marcora S (2002) Exercise intensity during off-road cycling competitions. *Med Sci Sports Exerc* 34: 1808-1813
- Jeukendrup AE, Martin J (2001) Improving cycling performance: how should we spend our time and money. *Sports Med* 31: 559-569
- Julia F, Steinberg JG, Faucher M, Jamin T, Ulmer C, Kipson N, Jammes Y (2003) Breath-hold training of humans reduces oxidative stress and blood acidosis after static and dynamic apnea. *Respir Physiol Neurobiol* 137: 19-27
- Joyner MJ, Coyle EF (2008) Endurance exercise performance: the physiology of champions. *J Physiol* 586: 35-44
- Karlsson J, Jacobs I (1982) Onset of blood lactate accumulation during muscular exercise as a threshold concept. I. Theoretical considerations. *Int J Sports Med* 3: 190-201
- Kay D, Marino FE, Cannon J, St Clair Gibson A, Lambert MI, Noakes TD (2001) Evidence for neuromuscular fatigue during high-intensity cycling in warm, humid conditions. *Eur J Appl Physiol* 84: 115-121
- Kayser B (2003) Exercise starts and ends in the brain. *Eur J Appl Physiol* 90: 411-419
- Kayser B, Narici M, Binzoni T, Grassi B, Cerretelli P (1994) Fatigue and exhaustion in chronic hypobaric hypoxia: influence of exercising muscle mass. *J Appl Physiol* 76: 634-640
- Keller JB (1974) Optimal velocity in a race. *Am Math Monthly* 81: 474-480
- Kindermann W, Simon G, Keul J (1979) The significance of the aerobic-anaerobic transition for the determination of work load intensities during endurance training. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol* 42: 25-34
- Kohrt WM, Morgan DW, Bates B, Skinner JS (1987) Physiological responses of triathletes to maximal swimming, cycling, and running. *Med Sci Sports Exerc* 19: 51-55
- Kohrt WM, O'Connor JS, Skinner JS (1989) Longitudinal assessment of responses by triathletes to swimming, cycling, and running. *Med Sci Sports Exerc* 21: 569-575
- Kreider RB, Boone T, Thompson WR, Burkes S, Cortes CW (1988a) Cardiovascular and thermal responses of triathlon performance. *Med Sci Sports Exerc* 20: 385-390
- Kreider RB, Boone T, Thompson WR, Burkes S, Cortes CW (1988b) Cardiovascular and thermal responses of triathlon performance. *Med Sci Sports Exerc* 20: 385-390
- Kreider RB, Cundiff DE, Hammett JB, Cortes CW, Williams KW (1988c) Effects of cycling on running performance in triathletes. *Annals Sports Med* 3: 220-225
- Lambert EV, St Clair Gibson A, Noakes TD (2005) Complex systems model of fatigue: integrative homoeostatic control of peripheral physiological systems during exercise in humans. *Br J Sports Med* 39: 52-62

- Lambert MI, Dugas JP, Kirkman MC (2004) Changes in running speeds in a 100 km ultra-marathon race. *J Sports Sci Med* 3: 167-173
- Larenson NM, Fulcher KY, Korkia P (1993a) Physiological characteristics of elite and club level female triathletes during running. *Int J Sports Med* 14: 455-459
- Larenson NM, Fulcher KY, Korkia P (1993b) Physiological characteristics of elite and club level triathletes during running. *Int J Sports Med* 14: 455-459
- Laursen PB, Knez WL, Shing CM, Langill RH, Rhodes EC, Jenkins DG (2005) Relationship between laboratory-measured variables and heart rate during an ultra-endurance triathlon. *J Sports Sci* 23: 1111-1120
- Laursen PB, Rhodes EC (2001) Factors affecting performance in an ultraendurance triathlon. *Sports Med* 31: 195-209
- Laursen PB, Rhodes EC, Langill RH, McKenzie DC, Taunton JE (2002) Relationship of exercise test variables to cycling performance in an Ironman triathlon. *Eur J Appl Physiol* 87: 433-440
- Laursen PB, Shing CM, Tennant SC, Prentice CM, Jenkins DG (2003) A comparison of the cycling performance of cyclists and triathletes. *J Sports Sci* 21: 411-418
- Laursen PB, Suriano R, Quod MJ, Lee H, Abbiss CR, Nosaka K, Martin DT, Bishop D (2006) Core temperature and hydration status during an Ironman triathlon. *Br J Sports Med* 40: 320-325; discussion 325
- Le Meur Y, Bernard T, Dorel S, Abbiss CR, Honnorat G, Brisswalter J, Hausswirth C (in press) Relationships between triathlon performance and pacing strategy during the run in an international event. *Int J Sports Physiol Perform*
- Le Meur Y, Hausswirth C, Dorel S, Bignet F, Brisswalter J, Bernard T (2009) Influence of gender on pacing adopted by elite triathletes during a competition. *Eur J Appl Physiol* 106: 535-545
- Lepers R, Maffiuletti NA, Rochette L, Brugniaux J, Millet GY (2002) Neuromuscular fatigue during a long-duration cycling exercise. *J Appl Physiol* 92: 1487-1493
- Lepers R, Theurel J, Hausswirth C, Bernard T (2008) Neuromuscular fatigue following constant versus variable-intensity endurance cycling in triathletes. *J Sci Med Sport* 11: 381-389
- Lewis SF, Taylor WF, Graham RM, Pettinger WA, Schutte JE, Blomqvist CG (1983) Cardiovascular responses to exercise as functions of absolute and relative work load. *J Appl Physiol* 54: 1314-1323
- Li L, Caldwell GE (1999) Coefficient of cross correlation and the time domain correspondence. *J Electromyogr Kinesiol* 9: 385-389
- Liedl MA, Swain DP, Branch JD (1999) Physiological effects of constant versus variable power during endurance cycling. *Med Sci Sports Exerc* 31: 1472-1477
- Lim AC, Peterman JE, Turner BM, Sweeney LR, Byrnes WC (in press) Comparison of Male and Female Road Cyclists Under Identical Stage Race Conditions. *Med Sci Sports Exerc*
- Lind E, Welch AS, Ekkekakis P (2009) Do 'mind over muscle' strategies work? Examining the effects of attentional association and dissociation on exertional, affective and physiological responses to exercise. *Sports Med* 39: 743-764
- Lindstedt SL, LaStayo PC, Reich TE (2001) When active muscles lengthen: properties and consequences of eccentric contractions. *News Physiol Sci* 16: 256-261
- Linossier MT, Dormois D, Arsac L, Denis C, Gay JP, Geyssant A, Lacour JR (2000) Effect of hyperoxia on aerobic and anaerobic performances and muscle metabolism during maximal cycling exercise. *Acta Physiol Scand* 168: 403-411
- Loftin M, Warren BL, Zingraf S, Brandon JE, Scully B (1988) Peak physiological function and performance of recreational triathletes. *J Sports Med Phys Fitness* 28: 330-335
- Lucia A, Esteve-Lanao J, Olivan J, Gomez-Gallego F, San Juan AF, Santiago C, Perez M,

- Chamorro-Vina C, Foster C (2006) Physiological characteristics of the best Eritrean runners-exceptional running economy. *Appl Physiol Nutr Metab* 31: 530-540
- Lucia A, Hoyos J, Chicharro JL (2001) Physiology of professional road cycling. *Sports Med* 31: 325-337
- Lucia A, Hoyos J, Perez M, Santalla A, Chicharro JL (2002) Inverse relationship between VO₂max and economy/efficiency in world-class cyclists. *Med Sci Sports Exerc* 34: 2079-2084
- Lucia A, Joyos H, Chicharro JL (2000) Physiological response to professional road cycling: climbers vs. time trialists. *Int J Sports Med* 21: 505-512
- Lucia A, Olivan J, Bravo J, Gonzalez-Freire M, Foster C (2008) The key to top-level endurance running performance: a unique example. *Br J Sports Med* 42: 172-174; discussion 174
- Lucia A, Pardo J, Durantez A, Hoyos J, Chicharro JL (1998) Physiological differences between professional and elite road cyclists. *Int J Sports Med* 19: 342-348
- Luke AC, Bergeron MF, Roberts WO (2007) Heat injury prevention practices in high school football. *Clin J Sport Med* 17: 488-493
- Lundberg MA, Hughson RL, Weisiger KH, Jones RH, Swanson GD (1986) Computerized estimation of lactate threshold. *Comput Biomed Res* 19: 481-486
- M**arcora SM (2008) Do we really need a central governor to explain brain regulation of exercise performance? *Eur J Appl Physiol* 104: 929-931; author reply 933-925
- Marcora SM, Bosio A, de Morree HM (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: R874-883
- Marcora SM, Staiano W (2010) The limit to exercise tolerance in humans: mind over muscle? *Eur J Appl Physiol* 109: 763-770
- Margaria R, Edwards HT, Dill DB (1933) The possible mechanisms of contraction and paying the oxygen debt and the role of lactic acid in muscular contraction. *Am J Physiol* 106: 689-715
- Marino FE (2004) Anticipatory regulation and avoidance of catastrophe during exercise-induced hyperthermia. *Comp Biochem Physiol B Biochem Mol Biol* 139: 561-569
- Marino FE (2010) Is it time to retire the 'central Governor'? A philosophical and evolutionary perspective. *Sports Med* 40: 265-268; author reply 268-270
- Marino FE, Lambert MI, Noakes TD (2004) Superior performance of African runners in warm humid but not in cool environmental conditions. *J Appl Physiol* 96: 124-130
- Marino FE, Mbambo Z, Kortekaas E, Wilson G, Lambert MI, Noakes TD, Dennis SC (2000) Advantages of smaller body mass during distance running in warm, humid environments. *Pflugers Arch* 441: 359-367
- Martin V, Kerherve H, Messonnier LA, Banfi JC, Geyssant A, Bonnefoy R, Feasson L, Millet GY (2010) Central and peripheral contributions to neuromuscular fatigue induced by a 24-h treadmill run. *J Appl Physiol* 108: 1224-1233
- Mattern CO, Kenefick RW, Kertzer R, Quinn TJ (2001) Impact of starting strategy on cycling performance. *Int J Sports Med* 22: 350-355
- Mauger AR, Jones AM, Williams CA (2009) Influence of feedback and prior experience on pacing during a 4-km cycle time trial. *Med Sci Sports Exerc* 41: 451-458
- McCole SD, Claney K, Conte JC, Anderson R, Hagberg JM (1990) Energy expenditure during bicycling. *J Appl Physiol* 68: 748-753
- Medbo JI, Mamen A, Holt Olsen O, Evertsen F (2000) Examination of four different instruments for measuring blood lactate concentration. *Scand J Clin Lab Invest* 60: 367-380

- Medbo JI, Mohn AC, Tabata I, Bahr R, Vaage O, Sejersted OM (1988) Anaerobic capacity determined by maximal accumulated O₂ deficit. *J Appl Physiol* 64: 50-60
- Micklewright D, Papadopoulou E, Swart J, Noakes T (2010) Previous experience influences pacing during 20 km time trial cycling. *Br J Sports Med*
- Millet G, Chollet D, Chatard JC (2000) Effects of drafting behind a two- or a six-beat kick swimmer in elite female triathletes. *Eur J Appl Physiol* 82: 465-471
- Millet GP, Bentley DJ (2004) The physiological responses to running after cycling in elite junior and senior triathletes. *Int J Sports Med* 25: 191-197
- Millet GP, Bentley DJ, Vleck VE (2007) The relationships between science and sport: application in triathlon. *Int J Sports Physiol Perform* 2: 315-322
- Millet GP, Candau RB, Barbier B, Busso T, Rouillon JD, Chatard JC (2002a) Modelling the transfers of training effects on performance in elite triathletes. *Int J Sports Med* 23: 55-63
- Millet GP, Chollet D, Chalies S, Chatard JC (2002b) Coordination in front crawl in elite triathletes and elite swimmers. *Int J Sports Med* 23: 99-104
- Millet GP, Millet GY, Candau RB (2001) Duration and seriousness of running mechanics alterations after maximal cycling in triathletes. Influence of the performance level. *J Sports Med Phys Fitness* 41: 147-153
- Millet GP, Vleck VE (2000) Physiological and biomechanical adaptations to the cycle to run transition in Olympic triathlon: review and practical recommendations for training. *Br J Sports Med* 34: 384-390
- Millet GY, Lepers R, Maffiuletti NA, Babault N, Martin V, Lattier G (2002c) Alterations of neuromuscular function after an ultramarathon. *J Appl Physiol* 92: 486-492
- Millet GY, Martin V, Lattier G, Ballay Y (2003a) Mechanisms contributing to knee extensor strength loss after prolonged running exercise. *J Appl Physiol* 94: 193-198
- Millet GY, Martin V, Maffiuletti NA, Martin A (2003b) Neuromuscular fatigue after a ski skating marathon. *Can J Appl Physiol* 28: 434-445
- Millet GY, Millet GP, Lattier G, Maffiuletti NA, Candau R (2003c) Alteration of neuromuscular function after a prolonged road cycling race. *Int J Sports Med* 24: 190-194
- Miura H, Kitagawa K, Ishiko T (1997) Economy during a simulated laboratory test triathlon is highly related to Olympic distance triathlon. *Int J of Sports Med* 18: 276-280.
- Mizrahi J, Verbitsky O, Isakov E (2000) Shock accelerations and attenuation in downhill and level running. *Clin Biomech (Bristol, Avon)* 15: 15-20
- Morgan DW, Baldini FD, Martin PE, Kohrt WM (1989) Ten kilometer performance and predicted velocity at VO₂max among well-trained male runners. *Med Sci Sports Exerc* 21: 78-83
- Morgan DW, Martin PE, Krahenbuhl GS, Baldini FD (1991) Variability in running economy and mechanics among trained male runners. *Med Sci Sports Exerc* 23: 378-383
- Morin JB, Dalleau G, Kyrolainen H, Jeannin T, Belli A (2005) A simple method for measuring stiffness during running. *J Appl Biomech* 21: 167-180
- Morin JB, Samozino P, Millet GY (in press) Changes in Running Kinematics, Kinetics, and Spring-Mass Behavior over a 24-H Run. *Med Sci Sports Exerc*
- Morrison S, Sleivert GG, Cheung SS (2004) Passive hyperthermia reduces voluntary activation and isometric force production. *Eur J Appl Physiol* 91: 729-736
- Morton RH, Fukuba Y, Banister EW, Walsh ML, Kenny CT, Cameron BJ (1994) Statistical evidence consistent with two lactate turnpoints during ramp exercise. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol* 69: 445-449
- Mueller FO, Cantu RC (2004) Twentieth annual report: Fall 1982-Spring 2002. National Center for Catastrophic Sport Injury Research., Chapel Hill (NYC), University of North Carolina

- Mureika JR (1997) A simple model for predicting sprint race times accounting for energy loss on the curve. *Can J Physiol* 75: 837-851
- Myers J, Ashley E (1997) Dangerous curves. A perspective on exercise, lactate, and the anaerobic threshold. *Chest* 111: 787-795
- Myers J, Walsh D, Buchanan N, McAuley P, Bowes E, Froelicher V (1994) Increase in blood lactate during ramp exercise: comparison of continuous and threshold models. *Med Sci Sports Exerc* 26: 1413-1419
- N**akamura Y, Yamamoto Y, Muraoka I (1993) Autonomic control of heart rate during physical exercise and fractal dimension of heart rate variability. *J Appl Physiol* 74: 875-881
- Neilan TG, Januzzi JL, Lee-Lewandrowski E, Ton-Nu TT, Yoerger DM, Jassal DS, Lewandrowski KB, Siegel AJ, Marshall JE, Douglas PS, Lawlor D, Picard MH, Wood MJ (2006a) Myocardial injury and ventricular dysfunction related to training levels among nonelite participants in the Boston marathon. *Circulation* 114: 2325-2333
- Neilan TG, Yoerger DM, Douglas PS, Marshall JE, Halpern EF, Lawlor D, Picard MH, Wood MJ (2006b) Persistent and reversible cardiac dysfunction among amateur marathon runners. *Eur Heart J* 27: 1079-1084
- Neptune RR, van den Bogert AJ (1998) Standard mechanical energy analyses do not correlate with muscle work in cycling. *J Biomech* 31: 239-245
- Neumayr G, Pfister R, Mitterbauer G, Gaenzer H, Sturm W, Eibl G, Hoertnagl H (2002) Exercise intensity of cycle-touring events. *Int J Sports Med* 23: 505-509
- Neumayr G, Pfister R, Mitterbauer G, Maurer A, Hoertnagl H (2004) Effect of ultramarathon cycling on the heart rate in elite cyclists. *Br J Sports Med* 38: 55-59
- Nielsen B, Hales JR, Strange S, Christensen NJ, Warberg J, Saltin B (1993) Human circulatory and thermoregulatory adaptations with heat acclimation and exercise in a hot, dry environment. *J Physiol* 460: 467-485
- Nielsen B, Hyldig T, Bidstrup F, Gonzalez-Alonso J, Christoffersen GR (2001a) Brain activity and fatigue during prolonged exercise in the heat. *Pflugers Arch* 442: 41-48
- Nielsen B, Savard G, Richter EA, Hargreaves M, Saltin B (1990) Muscle blood flow and muscle metabolism during exercise and heat stress. *J Appl Physiol* 69: 1040-1046
- Nielsen B, Strange S, Christensen NJ, Warberg J, Saltin B (1997) Acute and adaptive responses in humans to exercise in a warm, humid environment. *Pflugers Arch* 434: 49-56
- Nielsen OB, de Paoli F, Overgaard K (2001b) Protective effects of lactic acid on force production in rat skeletal muscle. *J Physiol* 536: 161-166
- Nikolopoulos V, Arkinstall MJ, Hawley JA (2001) Pacing strategy in simulated cycle time-trials is based on perceived rather than actual distance. *J Sci Med Sport* 4: 212-219
- Noakes TD (2000) Physiological models to understand exercise fatigue and the adaptations that predict or enhance athletic performance. *Scand J Med Sci Sports* 10: 123-145
- Noakes TD (2004) Linear relationship between the perception of effort and the duration of constant load exercise that remains. *J Appl Physiol* 96: 1571-1572; author reply 1572-1573
- Noakes TD (2008a) Rating of perceived exertion as a predictor of the duration of exercise that remains until exhaustion. *Br J Sports Med* 42: 623-624
- Noakes TD (2008b) Testing for maximum oxygen consumption has produced a brainless model of human exercise performance. *Br J Sports Med* 42: 551-555
- Noakes TD, Lambert MI, Hauman R (2009) Which lap is the slowest? An analysis of 32 world mile record performances. *Br J Sports Med* 43: 760-764
- Noakes TD, Marino FE (2009) Point: maximal oxygen uptake is limited by a central nervous system governor. *J Appl Physiol* 106: 338-339; discussion 341

- Noakes TD, Peltonen JE, Rusko HK (2001) Evidence that a central governor regulates exercise performance during acute hypoxia and hyperoxia. *J Exp Biol* 204: 3225-3234
- Noakes TD, Snow RJ, Febbraio MA (2004a) Perceived exertion and duration of exercise. *J Appl Physiol* 96: 1571-1573
- Noakes TD, St Clair Gibson A (2004) Logical limitations to the "catastrophe" models of fatigue during exercise in humans. *Br J Sports Med* 38: 648-649
- Noakes TD, St Clair Gibson A, Lambert EV (2004b) From catastrophe to complexity: a novel model of integrative central neural regulation of effort and fatigue during exercise in humans. *Br J Sports Med* 38: 511-514
- Noakes TD, St Clair Gibson A, Lambert EV (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: 120-124
- Noakes TD, Tucker R (2008) Do we really need a central governor to explain brain regulation of exercise performance? A response to the letter of Dr. Marcra. *Eur J Appl Physiol* 104: 933-935
- Noble BJ, Metz KF, Pandolf KB, Cafarelli E (1973) Perceptual responses to exercise: a multiple regression study. *Med Sci Sports* 5: 104-109
- Nummela A, Vuorimaa T, Rusko H (1992) Changes in force production, blood lactate and EMG activity in the 400-m sprint. *J Sports Sci* 10: 217-228
- Nummela AT, Heath KA, Paavolainen LM, Lambert MI, St Clair Gibson A, Rusko HK, Noakes TD (2008) Fatigue during a 5-km running time trial. *Int J Sports Med* 29: 738-745
- Nummela AT, Paavolainen LM, Sharwood KA, Lambert MI, Noakes TD, Rusko HK (2006) Neuromuscular factors determining 5 km running performance and running economy in well-trained athletes. *Eur J Appl Physiol* 97: 1-8
- Nybo L, Nielsen B (2001a) Hyperthermia and central fatigue during prolonged exercise in humans. *J Appl Physiol* 91: 1055-1060
- Nybo L, Nielsen B (2001b) Perceived exertion is associated with an altered brain activity during exercise with progressive hyperthermia. *J Appl Physiol* 91: 2017-2023
- O**'Toole ML, Douglas PS, Hiller WD (1998) Use of heart rate monitors by endurance athletes: lessons from triathletes. *J Sports Med Phys Fitness* 38: 181-187
- O'Toole ML, Douglas PS, Hiller WDB (1989) Lactate, oxygen uptake, and cycling performance in triathletes. *Int J Sports Med* 10: 413-418
- Olds T (2001) Modelling human locomotion: applications to cycling. *Sports Med* 31: 497-509
- Owles WH (1930) Alterations in the lactic acid content of the blood as a result of light exercise, and associated changes in the co(2)-combining power of the blood and in the alveolar co(2) pressure. *J Physiol* 69: 214-237
- P**aavolainen L, Hakkinen K, Hamalainen I, Nummela A, Rusko H (1999a) Explosive-strength training improves 5-km running time by improving running economy and muscle power. *J Appl Physiol* 86: 1527-1533
- Paavolainen L, Nummela A, Rusko H, Hakkinen K (1999b) Neuromuscular characteristics and fatigue during 10 km running. *Int J Sports Med* 20: 516-521
- Padilla S, Mujika I, Angulo F, Goirienna JJ (2000a) Scientific approach to the 1-h cycling world record: a case study. *J Appl Physiol* 89: 1522-1527
- Padilla S, Mujika I, Cuesta G, Goirienna JJ (1999) Level ground and uphill cycling ability in professional road cycling. *Med Sci Sports Exerc* 31: 878-885
- Padilla S, Mujika I, Orbananos J, Angulo F (2000b) Exercise intensity during competition time trials in professional road cycling. *Med Sci Sports Exerc* 32: 850-856

- Palmer GS, Borghouts LB, Noakes TD, Hawley JA (1999) Metabolic and performance responses to constant-load vs. variable-intensity exercise in trained cyclists. *J Appl Physiol* 87: 1186-1196
- Pandolf KB (1982) Differentiated ratings of perceived exertion during physical exercise. *Med Sci Sports Exerc* 14: 397-405
- Patterson MJ, Warlters D, Taylor NA (1994) Attenuation of the cutaneous blood flow response during combined exercise and heat stress. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol* 69: 367-369
- Peeling PD, Bishop DJ, Landers GJ (2005a) Effect of swimming intensity on subsequent cycling and overall triathlon performance. *Br J Sports Med* 39: 960-964; discussion 964
- Peeling PD, Bishop DJ, Landers GJ (2005b) The effect of swimming intensity on subsequent cycling and overall triathlon performance. *Brit J Sports Med* 39: 960-964
- Peltonen JE, Rantamaki J, Niittymaki SP, Sweins K, Viitasalo JT, Rusko HK (1995) Effects of oxygen fraction in inspired air on rowing performance. *Med Sci Sports Exerc* 27: 573-579
- Peltonen JE, Rusko HK, Rantamaki J, Sweins K, Niittymaki S, Viitasalo JT (1997) Effects of oxygen fraction in inspired air on force production and electromyogram activity during ergometer rowing. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol* 76: 495-503
- Peronnet F, Morton RH (1994) Plasma lactate concentration increases as a parabola with delay during ramp exercise. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol* 68: 228-233
- Perret C, Mueller G (2006) Validation of a new portable ergospirometric device (Oxycon Mobile) during exercise. *Int J Sports Med* 27: 363-367
- Philp A, Macdonald AL, Watt PW (2005) Lactate--a signal coordinating cell and systemic function. *J Exp Biol* 208: 4561-4575
- Pilowsky PM, Goodchild AK (2002) Baroreceptor reflex pathways and neurotransmitters: 10 years on. *J Hypertens* 20: 1675-1688
- Pirnay F, Lamy M, Dujardin J, Doroanne R, Petit JM (1972) Analysis of femoral venous blood during maximum muscular exercise. *J Appl Physiol* 33: 289-292
- Pollatos O, Kirsch W, Schandry R (2005) Brain structures involved in interoceptive awareness and cardioafferent signal processing: a dipole source localization study. *Hum Brain Mapp* 26: 54-64
- Pollock ML (1977) Submaximal and maximal working capacity of elite distance runners. Part I: Cardiorespiratory aspects. *Ann N Y Acad Sci* 301: 310-322
- Pollock ML, Gettman LR, Jackson A, Ayres J, Ward A, Linnerud AC (1977) Body composition of elite class distance runners. *Ann N Y Acad Sci* 301: 361-370
- Poole DC, Gaesser GA (1985) Response of ventilatory and lactate thresholds to continuous and interval training. *J Appl Physiol* 58: 1115-1121
- Pryor SL, Lewis SF, Haller RG, Bertocci LA, Victor RG (1990) Impairment of sympathetic activation during static exercise in patients with muscle phosphorylase deficiency (McArdle's disease). *J Clin Invest* 85: 1444-1449
- Pugh LG (1962) Physiological and medical aspects of the Himalayan scientific and mountaineering expedition, 1960-61. *Br Med J* 2: 621-627
- Pugh LG (1971) The influence of wind resistance in running and walking and the mechanical efficiency of work against horizontal or vertical forces. *J Physiol* 213: 255-276
- Pugh LG, Corbett JL, Johnson RH (1967) Rectal temperatures, weight losses, and sweat rates in marathon running. *J Appl Physiol* 23: 347-352
- Pyne DB, Boston T, Martin DT, Logan A (2000) Evaluation of the Lactate Pro blood lactate analyser. *Eur J Appl Physiol* 82: 112-116

- R**ainoldi A, Melchiorri G, Caruso I (2004) A method for positioning electrodes during surface EMG recordings in lower limb muscles. *J Neurosci Methods* 134: 37-43
- Rasmussen P, Stie H, Nybo L, Nielsen B (2004) Heat induced fatigue and changes of the EEG is not related to reduced perfusion of the brain during prolonged exercise in humans. *J Therm Biol* 29: 731-737
- Rauch HG, St Clair Gibson A, Lambert EV, Noakes TD (2005) A signalling role for muscle glycogen in the regulation of pace during prolonged exercise. *Br J Sports Med* 39: 34-38
- Reinhard U, Muller PH, Schmulling RM (1979) Determination of anaerobic threshold by the ventilation equivalent in normal individuals. *Respiration* 38: 36-42
- Rejeski WJ, Ribisl PM (1980) Expected task duration and perceived effort: an attributional analysis. *J Sport Psychol* 39: 249-254
- Ribeiro JP, Cadavid E, Baena J, Monsalvete E, Barna A, De Rose EH (1990) Metabolic predictors of middle-distance swimming performance. *Br J Sports Med* 24: 196-200
- Roberts RA, Ghiasvand F, Parker D (2004) Biochemistry of exercise-induced metabolic acidosis. *Am J Physiol Regul Integr Comp Physiol* 287: R502-516
- Robertson RJ (1982) Central signals of perceived exertion during dynamic exercise. *Med Sci Sports Exerc* 14: 390-396
- Robinson S, Edwards HT, Dill DB (1937) New Records in Human Power. *Science* 85: 409-410
- Robinson S, Robinson DL, Mountjoy RJ, Bullard RW (1958) Influence of fatigue on the efficiency of men during exhausting runs. *J Appl Physiol* 12: 197-201
- Roels B, Schmitt L, Libicz S, Bentley D, Richalet J-P, Millet G (2003) Specificity of $VO_{2\max}$ and the ventilatory threshold in free swimming and cycle ergometry: comparison between triathletes and swimmers. *British Journal of Sports Med* 39: 965-968
- Rowbottom DG, Keast D, Garcia-Webb P, Morton A (1997) Training adaptation and biological changes among well-trained triathletes. *Med Sci Sports Exerc* 29: 1233-1239
- Rowell LB, Marx HJ, Bruce RA, Conn RD, Kusumi F (1966) Reductions in cardiac output, central blood volume, and stroke volume with thermal stress in normal men during exercise. *J Clin Invest* 45: 1801-1816
- Rusko H, Nummela A, Mero A (1993) A new method for the evaluation of anaerobic running power in athletes. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol* 66: 97-101
- Rusko HK, Nummela A (1996) Measurement of maximal and submaximal anaerobic performance capacity: concluding chapter. *Int J Sports Med* 17 Suppl 2: S125-129
- S**altin B, Astrand PO (1967) Maximal oxygen uptake in athletes. *J Appl Physiol* 23: 353-358
- Saltin B, Larsen H, Terrados N, Bangsbo J, Bak T, Kim CK, Svedenhag J, Rolf CJ (1995) Aerobic exercise capacity at sea level and at altitude in Kenyan boys, junior and senior runners compared with Scandinavian runners. *Scand J Med Sci Sports* 5: 209-221
- Sandals LE, Wood DM, Draper SB, James DV (2006) Influence of pacing strategy on oxygen uptake during treadmill middle-distance running. *Int J Sports Med* 27: 37-42
- Sargent RM (1926) The Relation between Oxygen Requirement and Speed in Running. *J Physiol* 100: 10-22
- Saunders PU, Pyne DB, Telford RD, Hawley JA (2004) Factors affecting running economy in trained distance runners. *Sports Med* 34: 465-485
- Savard GK, Nielsen B, Laszczynska J, Larsen BE, Saltin B (1988) Muscle blood flow is not reduced in humans during moderate exercise and heat stress. *J Appl Physiol* 64: 649-657
- Schabot EJ, Killian SC, St Clair Gibson A, Hawley JA, Noakes TD (2000) Prediction of triathlon race time from laboratory testing in national triathletes. *Med Sci Sports Exerc* 32: 844-849

- Schiff HB, MacSearraigh ET, Kallmeyer JC (1978) Myoglobinuria, rhabdomyolysis and marathon running. *Q J Med* 47: 463-472
- Schneider DA, Lacroix KA, Atkinson GR, Troped PJ, Pollack J (1990) Ventilatory threshold and maximal oxygen uptake during cycling and running in triathletes. *Med Sci Sports Exerc* 22: 257-264
- Schwane JA, Armstrong RB (1983) Effect of training on skeletal muscle injury from downhill running in rats. *J Appl Physiol* 55: 969-975
- Seedat YK, Aboo N, Naicker S, Parsoo I (1989) Acute renal failure in the "Comrades Marathon" runners. *Ren Fail* 11: 209-212
- Seiler KS, Kjerland GO (2006) Quantifying training intensity distribution in elite endurance athletes: is there evidence for an "optimal" distribution? *Scand J Med Sci Sports* 16: 49-56
- Shephard R (1981) Ischemic heart disease and exercise. Croom Helm, London
- Shephard R (1997) Aging, physical activity and health. Human Kinetics, Champaign (IL)
- Shephard RJ (2009a) Hard evidence for a central governor is still lacking! *J Appl Physiol* 106: 343-346
- Shephard RJ (2009b) Is it time to retire the 'central governor'? *Sports Med* 39: 709-721
- Sidossis LS, Horowitz JF, Coyle EF (1992) Load and velocity of contraction influence gross and delta mechanical efficiency. *Int J Sports Med* 13: 407-411
- Siler WL (1993) Is running style and economy affected by wearing respiratory apparatus? *Med Sci Sports Exerc* 25: 260-264
- Sjodin B, Svedenhag J (1985) Applied physiology of marathon running. *Sports Med* 2: 83-99
- Skinner JS, Hutsler R, Bergsteinova V, Buskirk ER (1973) Perception of effort during different types of exercise and under different environmental conditions. *Med Sci Sports* 5: 110-115
- Skinner JS, McLellan TH (1980) The transition from aerobic to anaerobic metabolism. *Res Q Exerc Sport* 51: 234-248
- Sleivert GG, Wenger HA (1993) Physiological predictors of short-course triathlon performance. *Med Sci Sports Exerc* 25: 871-876
- Smith D, Lee H, Sutton B, Hunter E (1997) Power demands of the cycle leg during elite triathlon competition. 2nd INSEP International Triathlon Congress European Symposium, Paris (France)
- Smith LL (1991) Acute inflammation: the underlying mechanism in delayed onset muscle soreness? *Med Sci Sports Exerc* 23: 542-551
- St Clair Gibson A, Baden DA, Lambert MI, Lambert EV, Harley YX, Hampson D, Russell VA, Noakes TD (2003) The conscious perception of the sensation of fatigue. *Sports Med* 33: 167-176
- St Clair Gibson A, Foster C (2007) The role of self-talk in the awareness of physiological state and physical performance. *Sports Med* 37: 1029-1044
- St Clair Gibson A, Lambert EV, Rauch LH, 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
- St Clair Gibson A, Lambert ML, Noakes TD (2001a) Neural control of force output during maximal and submaximal exercise. *Sports Med* 31: 637-650
- St Clair Gibson A, Noakes TD (2004) Evidence for complex system integration and dynamic neural regulation of skeletal muscle recruitment during exercise in humans. *Br J Sports Med* 38: 797-806
- St Clair Gibson A, Schabot EJ, Noakes TD (2001b) Reduced neuromuscular activity and force generation during prolonged cycling. *Am J Physiol Regul Integr Comp Physiol* 281: R187-196

- Stainsby WN, Gladden LB, Barclay JK, Wilson BA (1980) Exercise efficiency: validity of baseline subtractions. *J Appl Physiol* 48: 518-522
- Stamford BA, Noble BJ (1974) Metabolic cost and perception of effort during bicycle ergometer work performance. *Med Sci Sports* 6: 226-231
- Stapelfeldt B, Schwirtz A, Schumacher YO, Hillebrecht M (2004) Workload demands in mountain bike racing. *Int J Sports Med* 25: 294-300
- Stepto NK, Carey AL, Staudacher HM, Cummings NK, Burke LM, Hawley JA (2002) Effect of short-term fat adaptation on high-intensity training. *Med Sci Sports Exerc* 34: 449-455
- Suriano R, Bishop D (2010) Physiological attributes of triathletes. *J Sci Med Sport* 13: 340-347
- Suriano R, Vercruyssen F, Bishop D, Brisswalter J (2007) Variable power output during cycling improves subsequent treadmill run time to exhaustion. *J Sci Med Sport* 10: 244-251
- Swain DP (1997) A model for optimizing cycling performance by varying power on hills and in wind. *Med Sci Sports Exerc* 29: 1104-1108
- Swart J, Lamberts RP, Lambert MI, Lambert EV, Woolrich RW, Johnston S, Noakes TD (2009) Exercising with reserve: exercise regulation by perceived exertion in relation to duration of exercise and knowledge of endpoint. *Br J Sports Med* 43: 775-781
- T**akai K (1998) Cognitive strategies and recall of pace by long-distance runners. *Percept Mot Skills* 86: 763-770
- Tatterson AJ, Hahn AG, Martin DT, Febbraio MA (2000) Effects of heat stress on physiological responses and exercise performance in elite cyclists. *J Sci Med Sport* 3: 186-193
- Taylor AD, Bronks R, Smith P, Humphries B (1997) Myoelectric evidence of peripheral muscle fatigue during exercise in severe hypoxia: some references to m. vastus lateralis myosin heavy chain composition. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol* 75: 151-159
- Tew GA (2005) The effect of cycling cadence on subsequent 10 km running performance in well-trained triathletes. *J Sports Sci Med* 4: 342-353
- Theurel J, Lepers R (2008) Neuromuscular fatigue is greater following highly variable versus constant intensity endurance cycling. *Eur J Appl Physiol* 103: 461-468
- Thompson KG, Haljand R, MacLaren DP (2000) An analysis of selected kinematic variables in national and elite male and female 100-m and 200-m breaststroke swimmers. *J Sports Sci* 18: 421-431
- Thompson KG, MacLaren DP, Lees A, Atkinson G (2003) The effect of even, positive and negative pacing on metabolic, kinematic and temporal variables during breaststroke swimming. *Eur J Appl Physiol* 88: 438-443
- Thompson KG, MacLaren DP, Lees A, Atkinson G (2004) The effects of changing pace on metabolism and stroke characteristics during high-speed breaststroke swimming. *J Sports Sci* 22: 149-157
- Tibshirani R (1997) Who is the fastest man in the world? *Am Statistician* 51: 106-111
- Todd G, Butler JE, Taylor JL, Gandevia SC (2005) Hyperthermia: a failure of the motor cortex and the muscle. *J Physiol* 563: 621-631
- Toussaint HM (1990) Differences in propelling efficiency between competitive and triathlon swimmers. *Med Sci Sports Exerc* 22: 409-415
- Toussaint HM, Hollander AP (1994) Energetics of competitive swimming. Implications for training programmes. *Sports Med* 18: 384-405
- 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: 392-400
- Tucker R, Dugas J, Fitzgerald M (2009) *Runner's World The Runner's Body: How the Latest Exercise Science Can Help You Run*

- Stronger, Longer, and Faster (Runners World). Rodale Books, New York
- Tucker R, Kayser B, Rae E, Rauch L, Bosch A, Noakes T (2007) Hyperoxia improves 20 km cycling time trial performance by increasing muscle activation levels while perceived exertion stays the same. *Eur J Appl Physiol* 101: 771-781
- Tucker R, Lambert MI, Noakes TD (2006a) An analysis of pacing strategies during men's world-record performances in track athletics. *Int J Sports Physiol Perform* 1: 233-245
- Tucker R, Marle T, Lambert EV, Noakes TD (2006b) The rate of heat storage mediates an anticipatory reduction in exercise intensity during cycling at a fixed rating of perceived exertion. *J Physiol* 574: 905-915
- Tucker R, Noakes TD (2009) The physiological regulation of pacing strategy during exercise: a critical review. *Br J Sports Med* 43: e1
- Tucker R, Rauch L, Harley YX, Noakes TD (2004) Impaired exercise performance in the heat is associated with an anticipatory reduction in skeletal muscle recruitment. *Pflugers Arch* 448: 422-430
- U**lmer HV (1996) Concept of an extracellular regulation of muscular metabolic rate during heavy exercise in humans by psychophysiological feedback. *Experientia* 52: 416-420
- V**an Ingen Schenau GJ, Cavanagh PR (1990) Power equations in endurance sports. *J Biomech* 23: 865-881
- van Ingen Schenau GJ, de Koning JJ, de Groot G (1992) The distribution of anaerobic energy in 1000 and 4000 metre cycling bouts. *Int J Sports Med* 13: 447-451
- Van Schuylenbergh R, Eynde BV, Hespel P (2004) Prediction of sprint triathlon performance from laboratory tests. *Eur J Of Appl Physiol* 91: 94-99
- Vandewalle H, Peres G, Monod H (1987) Standard anaerobic exercise tests. *Sports Med* 4: 268-289
- Vercruyssen F, Brisswalter J, Hausswirth C, Bernard T, Bernard O, Vallier JM (2002) Influence of cycling cadence on subsequent running performance in triathletes. *Med Sci Sports Exerc* 34: 530-536
- Vercruyssen F, Suriano R, Bishop D, Brisswalter J (2005) Cadence selection affects metabolic responses during cycling and subsequent running time to fatigue. *Br J Sports Med* 39: 267-272
- Vleck VE, Bentley DJ, Millet GP, Burgi A (2008) Pacing during an elite Olympic distance triathlon: comparison between male and female competitors. *J Sci Med Sport* 11: 424-432
- Vleck VE, Burgi A, Bentley DJ (2006) The consequences of swim, cycle, and run performance on overall result in elite olympic distance triathlon. *Int J Sports Med* 27: 43-48
- Vleck VE, Grubb G, Bentley DJ (2002) Longitudinal analysis of race performance and world cup ranking in elite triathlon. 7th Annual Congress of the European College of Sports Sciences, Athens, Greece
- Vogt S, Heinrich L, Schumacher YO, Blum A, Roecker K, Dickhuth HH, Schmid A (2006) Power output during stage racing in professional road cycling. *Med Sci Sports Exerc* 38: 147-151
- Vogt S, Schumacher YO, Blum A, Roecker K, Dickhuth HH, Schmid A, Heinrich L (2007a) Cycling power output produced during flat and mountain stages in the Giro d'Italia: a case study. *J Sports Sci* 25: 1299-1305
- Vogt S, Schumacher YO, Roecker K, Dickhuth HH, Schoberer U, Schmid A, Heinrich L (2007b) Power Output during the Tour de France. *Int J Sports Med* 28: 756-761
- W**alsh ML, Banister EW (1988) Possible mechanisms of the anaerobic threshold. A review. *Sports Med* 5: 269-302
- Wasserman K, McIlroy MB (1964) Detecting the Threshold of Anaerobic Metabolism in Cardiac Patients during Exercise. *Am J Cardiol* 14: 844-852

- Wasserman K, Whipp BJ, Koyl SN, Beaver WL (1973) Anaerobic threshold and respiratory gas exchange during exercise. *J Appl Physiol* 35: 236-243
- Watson P, Hasegawa H, Roelands B, Piacentini MF, Looverie R, Meeusen R (2005) Acute dopamine/noradrenaline reuptake inhibition enhances human exercise performance in warm, but not temperate conditions. *J Physiol* 565: 873-883
- Weir JP, Beck TW, Cramer JT, Housh TJ (2006) Is fatigue all in your head? A critical review of the central governor model. *Br J Sports Med* 40: 573-586; discussion 586
- Whyte G, Lumley S, George K, Gates P, Sharma S, Prasad K, McKenna WJ (2000) Physiological profile and predictors of cycling performance in ultra-endurance triathletes. *J Sports Med Phys Fitness* 40: 103-109
- Whyte GP (2008) Clinical significance of cardiac damage and changes in function after exercise. *Med Sci Sports Exerc* 40: 1416-1423
- Widrick JJ, Freedson PS, Hamill J (1992) Effect of internal work on the calculation of optimal pedaling rates. *Med Sci Sports Exerc* 24: 376-382
- Wilberg RB, Pratt J (1988) A survey of the race profiles of cyclists in the pursuit and kilo track events. *Can J Sport Sci* 13: 208-213
- Williams TJ, Krahnenbuhl GS, Morgan DW (1991) Daily variation in running economy of moderately trained male runners. *Med Sci Sports Exerc* 23: 944-948
- Winter DA (1979) Biomechanics of human movement. Wiley & Sons, New York
- Wittekind AL, Micklewright D, Beneke R (in press) Teleoanticipation in all-out short duration cycling. *Br J Sports Med*
- Wright RA (1996) Brehm's theory of motivation as a model of effort and cardiovascular response. In: Gollwitzer PM BJe (ed) The psychology of action: linking cognition and motivation to behavior. Guilford, New York, pp. 424-453
- Zamparo P, Bonifazi M, Faina M, Milan A, Sardella F, Schena F, Capelli C (2005) Energy cost of swimming of elite long-distance swimmers. *Eur J Appl Physiol* 94: 697-704
- Zamparo P, Capelli C, Pendergast D (2010) Energetics of swimming: a historical perspective. *Eur J Appl Physiol*
- Zavorsky GS (2007) Evidence of pulmonary oedema triggered by exercise in healthy humans and detected with various imaging techniques. *Acta Physiol (Oxf)* 189: 305-317
- Zhou S, Robson SJ, King MJ, Davie AJ (1997) Correlations between short-course triathlon performance and physiological variables determined in laboratory cycle and treadmill tests. *J Sports Med Phys Fitness* 37: 122-130

ABSTRACT

Performance in endurance sports is associated with several factors including pacing strategies. The aim of the present work was to describe, understand and optimize the variability of speed in Olympic distance triathlon (1.5km swimming - 40km cycling - 10km running).

The first section described pace variability of high level triathletes competing in international events and the effects of sex on pacing strategies (study #1 and #2). The results revealed a systematic positive pacing (whereby speed gradually declined throughout the duration of the race) in swimming, cycling and running with an increasing speed variability in cycling and running events for both sexes. Even if these strategies looked consistent with the benefits of drafting in swimming and cycling, the gain associated with a fast running start appeared controversial.

In this perspective, the second section investigated the effects of pacing strategy during the initial running phase of a time-trial triathlon on overall performance (study #3). The results demonstrated that triathletes would benefit to set a pace 5% slower than their 10-km control running speed. Higher running speed on the first kilometer involved weaker overall performance. Study #4 confirmed this conclusion by demonstrating that the running performance (and overall performance) during an international triathlon is correlated with running speed variability. Top female and male triathletes adopted a more constant pace, whereas less successful athletes chose an unreasonably aggressive pacing pattern over the initial phase of the run resulting in a significant subsequent decrease in running speed.

As studies #3 and #4 revealed that running performance during a triathlon is linked with the ability to maintain running speed and to resist fatigue, the third section investigated which factor is responsible for this speed decrement. The fifth study evaluated respiratory, cardiovascular, metabolic, activities, stride kinematic/biomechanical parameters, and the rating of perceived exertion throughout a laboratory cycle-to-run combination performed until volitional exhaustion by well-trained triathletes. The results showed that triathletes stopped when they reached a rating of maximum perceived exertion without revealing any metabolic or muscular failure. Further investigations are required to confirm this hypothesis and to modelise how physiological, psychological and contextual processes interact to determine pacing strategy (and performance) during competitions.

Keywords: pacing strategies, high level performance, long duration exercise, fatigue, variability, power output, sex, triathlon.

RESUME

La performance dans les activités de locomotion de longue durée est déterminée par de multiples facteurs, parmi lesquels la stratégie d'allure. Ces travaux ont visé à décrire, comprendre et optimiser les variabilités d'allure dans la performance sportive de haut niveau à travers une activité multivariée ; le triathlon distance Olympique.

La première partie a caractérisé les variabilités d'allure démontrées par des triathlètes « élite » lors d'épreuves internationales et a différencié celles-ci en fonction du sexe (études n°1 et n°2). Les résultats obtenus ont permis de mieux caractériser les facteurs de la performance en triathlon à haut niveau. Ces derniers ont par ailleurs révélé l'adoption d'une stratégie d'allure décroissante systématique en natation, en cyclisme et en course à pied aussi bien chez les hommes que chez les femmes. Ces études ont aussi mis en évidence une augmentation de la variabilité de la vitesse de locomotion au cours des épreuves de cyclisme et de course à pied, pour les deux sexes. Si ces stratégies ont semblé cohérentes avec les bénéfices associés à l'adoption d'une position abritée en natation et en cyclisme, l'intérêt d'un départ rapide en course à pied a semblé discutable.

Les travaux de la seconde partie ont donc investigué l'effet de la stratégie d'allure adoptée lors de la phase initiatrice de la course à pied sur la performance globale et la réponse physiologique lors d'un triathlon distance Olympique contre-la-montre (étude n°3). Les résultats ont démontré que la meilleure stratégie consiste à privilégier sur le premier kilomètre une allure 5% plus lente que celle adoptée en moyenne sur une course de 10km isolée. La performance globale réalisée est alors en effet meilleure que celle associée à l'adoption d'une vitesse de course initiale plus élevée. Les résultats ont par ailleurs suggéré que la baisse de vitesse consécutive à un départ rapide est reliée à une diminution de la commande centrale et non à un phénomène de fatigue périphérique. L'étude n°4 a confirmé que ces résultats expérimentaux sont transférables à la compétition à haut niveau en montrant que les meilleurs triathlètes révèlent une vitesse de course moins variable que leurs concurrents grâce à un meilleur maintien de celle-ci tout au long de l'épreuve.

Dans la continuité de ces travaux, la troisième partie a investigué ce qui engendre l'incapacité des triathlètes à maintenir leur allure de course initiale. L'étude n°5 a ainsi caractérisé l'évolution simultanée des paramètres cardiorespiratoires, électromyographiques, biomécaniques et perceptuels chez des triathlètes entraînés réalisant un enchaînement cyclisme-course à pied mené à l'arrêt volontaire. Les résultats ont révélé le maintien des paramètres cardiorespiratoires à des valeurs sous-maximales tout au long de l'exercice ainsi qu'une grande stabilité du patron de recrutement musculaire du membre inférieur. Ces données suggèrent que les triathlètes ont stoppé l'exercice, alors qu'ils avaient atteint un niveau maximal de difficulté d'effort tolérable, sans que la preuve d'une défaillance physiologique puisse être apportée. De prochaines recherches devront confirmer cette conclusion et modéliser la manière dont les processus physiologiques, psychologiques et contextuels interagissent et déterminent la stratégie d'allure adoptée par les triathlètes en compétition.

Mots-clés : stratégie d'allure, performance, exercice de longue durée, fatigue, variabilité, puissance de pédalage, sexe, triathlon, haut niveau.

Accuracy and Repeatability of the Polar® RS800sd to Evaluate Stride Rate and Running Speed

Authors

C. Hausswirth¹, Y. Le Meur^{1,2}, A. Couturier¹, T. Bernard², J. Brisswalter²

Affiliations

¹Laboratory of Biomechanics and Physiology, Research Department, INSEP, Paris, France

²Department of Ergonomics, Handibio Laboratory, University of Toulon Var, Toulon, France

Key words

- running
- stride frequency
- stride length
- validation

Abstract



The purpose of this study was to evaluate the accuracy and the repeatability of a new running computer system (RS800sd, Polar®, Kempele, Finland) which included the measurement of running speed (RS) and stride rate (SR). Eight well-trained triathletes participated in this study. First, they completed an incremental continuous maximum test on a treadmill (from 12 km.h⁻¹ to 18 km.h⁻¹) at 0% grade. Then the subjects took part in a second test to determine RS800sd intrareproducibility to evaluate running speed. They ran twice during 5 min at a pace corresponding to their maximal lactate steady-state. During

these two tests, RS and SR were recorded by the RS800sd system, by an optical sensor system (for RS) and a force-sensitive device (for SR). No difference was found between the RS800sd system and the reference systems both for RS (ICC=0.95) and SR (ICC=0.69). Moreover RS measures were statistically repeatable. This study provided evidence for the validity of the RS800sd system for measuring the kinematic characteristics of running (speed and frequency). Further investigations are needed to replicate these findings at lower running speeds, notably during walking to assess its capacity to evaluate physical activity in natural conditions.

Introduction



Recent studies have highlighted a possible discrepancy between factors affecting efficiency during competition and those classically identified during experimental settings in the laboratory. One of the main differences is related to the stability of power output and/or running speed in laboratory studies when compared with pacing strategies used during races in competition. Over the last decades technological improvements have enabled sport scientists and coaches to identify and understand the characteristics of physical performance in sport. Due to miniaturization, new devices such as powermeters [14], heart rate monitors [10] or gas analyzers [20] can now be worn by athletes in order to facilitate multiple measurements under field conditions. Therefore, technology has been massively used to understand skills and expertise in human locomotion such as running [15], cycling [1], swimming [28]. In running events, descriptive kinematic parameters such as running speed (RS), stride rate (SR) and stride length (SL) are often investigated. Evi-

dence suggests that they are identified as main factors for coaches designing training programs [2, 13]. Initially, the analysis of running characteristics was limited to laboratory sessions or restricted areas to determine descriptive kinematic analysis such as SL and SR. In this context, heavy scientific protocols have been set using photographic [19] or video analysis [11], photoelectric systems [2] or contact-sensors [7]. More recently, pacing strategies during running competitions and/or training have also been identified as being stochastic [33]. Even if the reproduction of this situation is difficult to reproduce in laboratory conditions, the variability of running pace has been investigated to underline the genesis of induced fatigue and its consequences on the overall performance [3]. Recording kinematic parameters continuously during a running race or during a marathon, triathlon or duathlon running event is still difficult for sport scientists. Mastroianni et al. [21] explained that many studies examining self pacing have been limited to relatively global characterizations of exercise over moderate or long distances.

accepted after revision
October 9, 2008

Bibliography

DOI 10.1055/s-0028-1105936
Published online:
March 10, 2009
Int J Sports Med 2009; 30:
354–359 © Georg Thieme
Verlag KG Stuttgart · New York
ISSN 0172-4622

Correspondence

Prof. C. Hausswirth

Laboratory of Biomechanics
and Physiology
Research Department
INSEP
11 avenue du Tremblay
75012 Paris
France
Tel.: +33/141/74 43 85
Fax: +33/141/74 45 35
christophe.hausswirth@insep.fr

In this context, objective physical activity monitoring technologies (e.g. accelerometers) have been developed to provide robust measures of physical activity [6, 9, 32]. This accelerometer technology mostly employed in population-based surveillance has begun to supplement usual data with step counts, which provide a simple, stable metric to monitor ambulatory physical activity. The accelerometer RS800sd (Polar Electro, Kempele, Finland) has been developed to enable such an evaluation from a performance point of view, in both competition and training. Thus, this device could be a practical mean for recording stride characteristics (SL/SR, RS) without discomfort for athletes, coaches and sport scientists. The major purpose of this study was to test the validity and the accuracy of the Polar® RS800sd on a treadmill ranging from low to high running intensity in well-trained triathletes. A second aim of this investigation was to evaluate the reproducibility of speed measurement during a repeated rectangular test with intervening recovery time.

Material and Methods

▼

Subjects

Eight well-trained triathletes volunteered to participate in this study after they were informed of the nature and possible inconveniences associated with the experiment. The subjects were familiar with all testing procedures and gave their written informed consent before participation. Subjects mean (\pm SD) age, weight, height and $\dot{V}O_{2\text{max}}$ were 31.7 ± 5.3 yrs, 69.7 ± 7.9 kg, 177.5 ± 6.8 cm and 62.6 ± 3.8 $\text{mlO}_2 \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$, respectively. All of them were endurance trained triathletes, who trained 6–8 times per week. Five of them were confirmed runners with personal best under 37 min over 10 km running performance.

Instrumentation

Uniaxial accelerometry (anteroposterior axis)

The s3 accelerometer (Polar RS800sd, Kempele, Finland) is a very small ($3.5 \times 5 \times 0.7$ cm) and light weight (20 g) commercial device with a time-sampling mechanism that allows it to provide a chronological measure of the frequency, intensity and duration of movement. It was necessary to hook this system to the shoe laces to prevent any extraneous movement. This tool allows data to be analyzed over user-defined intervals (ranging from 1 s to 1 min). In this study, epoch duration was set at 30 s for each running speed. This epoch was selected, as this was the epoch duration that would not likely be used in field-based studies, allowing data to be collected for up to 15 days with no download. The unit was stored in the supplied watch worn by the subjects during running. Before each test, the s3 sensor was calibrated, as recommended by the manufacturer to integrate each runner's stride characteristics. Each subject had to follow the pace (i.e. 12 km/h) imposed by the treadmill including acceleration and deceleration phases for 5 min. Hence the distance measured by each system was identical. The distance calculated by the RS800sd system was then compared, corrected manually according to the distance calculated thanks to the optical system mounted on the treadmill.

Optical sensor system

During both tests, treadmill speed was recorded with a custom made optical device. The device mainly consisted of an infra-red sensor connected to a USB data acquisition board (DT9800, Data Translation, Marlboro, USA) and reflectors evenly spaced on the

treadmill strip. The signal was continuously acquired at a 1 kHz sampling frequency and processed in real time so that treadmill speed was displayed on a PC screen with a 0.1 km.h^{-1} accuracy (Testpoint software, Measurement Computing Corporation, Norton, USA). Treadmill speed signal was simultaneously stored on hard drive for further comparison with RS800sd.

Force-sensitive system

SR was calculated from two force sensing resistors (Interlink Electronics, Camarillo, USA) connected to a portable data logger device (ME6000, Mega Electronics Ltd., Kuopio, Finland). These footswitches which were very small in size ($1.5 \times 1.5 \times 0.02$ cm) were mounted on the sockliner of the right shoe, under the heel and the base of the first metatarsus. Subsequent analyses were performed using the Origin 6.1 software (OriginLab, Northampton, USA).

Recordings of all measurements were referenced to the time-synchronization, so that the retrieved data could be matched temporally.

Protocol

Each subject completed two experimental sessions separated by at least 3 days. The first one was an incremental treadmill test to determine maximal oxygen uptake ($\dot{V}O_{2\text{max}}$) and the speed corresponding to the maximal lactate steady state (MLSS). The second one was a rectangular test performed at the maximal lactate steady state intensity to evaluate the repeatability of speed and stride rate measurement. During all the experimental protocol strenuous physical activity was restricted.

Maximal Running Test (MRT)

Before the test, subjects performed a familiarization period lasting 15 min $\dot{a} 10 \text{ km.h}^{-1}$. After 15 min rest, the test began at 12 km.h^{-1} , at 0% grade and the speed was increased by 1 km.h^{-1} every 3 min until volitional exhaustion. Subjects were requested to maintain the same position on the treadmill using a rope tied around their waist. Between each increment, there was a 30 s rest period to collect capillary blood samples from ear lobes. Blood lactate was analyzed using the Lactate Pro system previously validated by Pyne et al. [25]. Oxygen uptake ($\dot{V}O_2$) was also recorded every 5 s using the portable gas analyser Cosmed K4b² System (Cosmed, Roma, Italy) [20]. $\dot{V}O_{2\text{max}}$ was determined according to criteria described by Howley et al. [17] – that is, a plateau in $\dot{V}O_2$ despite an increase in power output, a respiratory exchange ratio value of 1.15, or a heart rate (HR) over 90% of the predicted maximal HR. MLSS was assessed according to the method previously described by Snyder et al. [30]. During the entire test mean running speed (RS) and stride rate (SR) values were determined during 120 s for each step using both the RS800sd and the optical and the force-sensitive capture systems. RS and SR values were recorded at a sampling rate of 1 Hz for the RS800sd system and at 1 and 1000 Hz for the optical and the force-sensitive capture systems respectively. The data recorded during the first and the last thirty seconds of each 3 min interval were annulled in order to ensure the steady-state of the speed imposed by the treadmill. During this test values of SR and RS recorded using the different devices were compared at low and high pace (12 km.h^{-1} , 18 km.h^{-1}).

Repeatability test (RT)

After a three-day recovery period, the subjects took part in a second test in order to evaluate the repeatability of RS and SR mea-

Table 1 Running speed and stride rate during incremental maximum running test. Comparison between RS800 and optical sensor or force-sensitive systems.

Optical sensor system	RS800sd Running speed (km.h ⁻¹)	Force-sensitive system Stride rate (Hz)	RS800sd Stride rate (Hz) Means±SD
Means±SD	Means±SD	Means±SD	Means±SD
12±0.07	11.96±0.27	1.49±0.07	1.50±0.08
13±0.05	12.98±0.27	1.50±0.04	1.49±0.07
14±0.06	13.90±0.38	1.54±0.06	1.53±0.04
15.01±0.07	15.12±0.59	1.48±0.07	1.50±0.04
16±0.03	16.08±0.60	1.46±0.06	1.47±0.05
17.02±0.03	16.82±0.52	1.47±0.06	1.47±0.06
18±0.08	17.49±0.64	1.48±0.07	1.48±0.08

surements. The subjects had to run two times for 5 min at a pace corresponding to their maximal lactate steady-state. The treadmill speed was monitored with the optical system. The speed values measured during each running bout were compared to evaluate the repeatability of pace calculated by the RS800sd. Similarly to the MRT mean RS and SR data were calculated by the average of the values recorded during the middle 120 s of each interval. These data were collected at a sampling rate of 1 Hz by both systems as undertaken in the MRT protocol.

Statistical analysis

All the results are expressed as mean±standard deviation, and level of significance was set as $P<0.05$. For both sessions, SR and RS values were compared between periods and devices using a two-way repeated measures ANOVA. The normality of all distributions of the values were previously tested using the Shapiro-Wilk test. A Tukey post-hoc test was used to determine any differences between the intervals. SR and RS reliability was assessed by comparing the variability of different values of the same subject to the total variation across all measurements and all subjects using the intraclass correlation coefficient (ICC). The standard error of measurement of typical error (SEM) was determined to estimate an absolute measure of reliability according to the equation, $SEM = SD \cdot \sqrt{1 - ICC}$, where SD is the standard deviation. Furthermore, the accuracy of the Polar RS800sd for RS and SR was determined according to the method of Bland and Altman [4]. For this analysis, the measuring agreement of this device was estimated by indicating the differences in speeds and SR between the two methods measurement systems. The mean of the difference represented the bias between the two measurement systems. This value plus and minus two standard deviations represented the limits of agreement for speed and SR measurement using the Polar RS800sd system. The data were presented graphically comparing the difference between the methods versus their average values for both RS and SR.

Results

▼

Maximal Running Test (MRT)

Values of stride rate and running speed during the incremental test are presented in **Table 1**. During this test RS or SR values were unaffected by the system of measurement at low and high pace ($P>0.05$, respectively for RS and SR, $ICC=0.97$ and 0.97 , $SEM=0.036\text{ km.h}^{-1}$ and 0.002 Hz). In addition, as shown in **Fig. 1**, the confidence interval for the bias (i.e. mean differ-

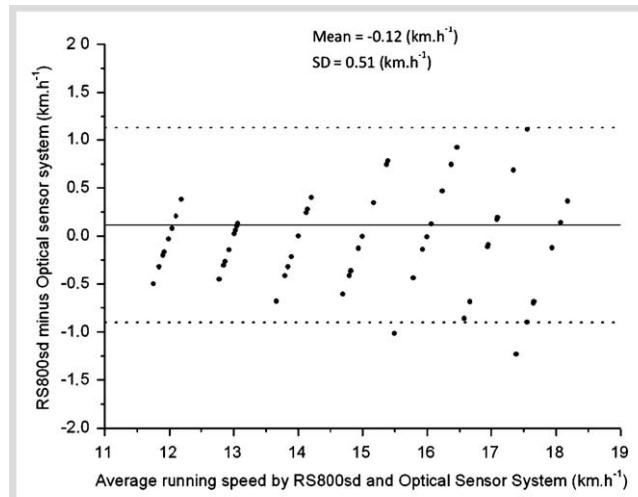


Fig. 1 Bland-Altman plot depicting the calculated bias between the two devices of measurement and the limits of agreement for speed running measurement using the RS800sd system ($n=56$).

ence between the two systems) for RS was 0.39 to -0.63 km.h^{-1} . Almost all the individual values were within the limits of agreement, and for each of the exercise intensities, only two individual values (out of 56) were outside the limits of agreement. Thus, 95% of the measurements were less than two standard deviations.

Repeatability test (RT)

Values of stride rate and running speed during the reproducibility test are presented in **Table 2**.

SR and RS measurements appeared consistent for the same subject during the repeatability test while the pace imposed by the treadmill was strictly the same for both legs ($P>0.05$, respectively for RS and SR, $ICC=0.95$ and 0.69 ; $SEM=0.054\text{ km.h}^{-1}$ and 0.011 Hz). For SR, results revealed that 95.4% of the values were also within the range of values authorized for the agreement although the confidence interval for the bias was very narrow (0.03 Hz) (**Fig. 2**).

In addition, there was a high correlation between SR results obtained by use of RS800sd or the force-sensitive system ($r^2=0.973$, $P<0.001$).

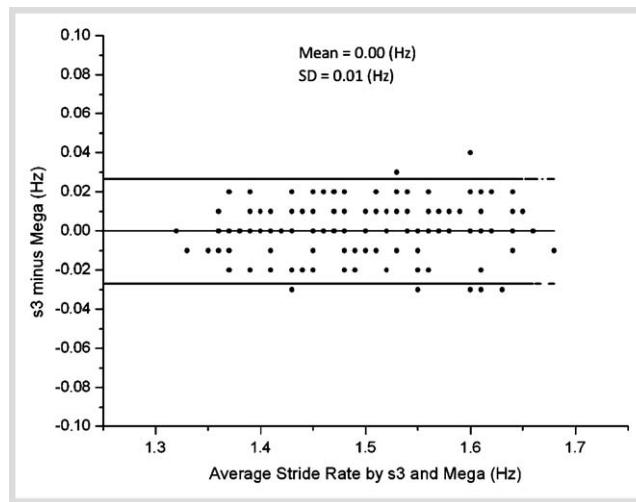
Discussion

▼

The aim of this study was to evaluate the accuracy and the reliability of a new running computer system (RS800sd, Polar®, Kempele, Finland) for measuring running speed and stride rate. The first obvious finding of this study indicated that running speed measurements using the RS800sd system were not statistically different compared to those obtained with the optical sensor system (i.e. reference system). The results showed a validity of 95% for the RS800sd system for RS measurements of the same subjects over a range of speeds from 12 to 18 km.h^{-1} . Moreover, these measures were statistically repeatable ($r=0.92$, $P<0.01$). The second main finding of this study was the proof of performance of the stride rate measurement within the new s3 accelerometer. The data from the MRT assessment indicated that the accuracy of the RS800sd did not differ from the criterion of the force-sensitive system (error of 1.4%).

Table 2 Running speed and stride rate reproducibility during rectangular submaximum running test (RS800sd measurements).

Subjects	Running speed		Stride rate	
	Leg 1 (km.h^{-1})		Leg 2 (km.h^{-1})	
	Means \pm SD	Means \pm SD	Leg 1 (Hz)	Leg 2 (Hz)
1	14.8 \pm 0.2	15.3 \pm 0.4	1.44 \pm 0.03	1.41 \pm 0.02
2	15.1 \pm 0.1	15.2 \pm 0.1	1.54 \pm 0.01	1.50 \pm 0.04
3	15.4 \pm 0.2	15.5 \pm 0.2	1.49 \pm 0.03	1.47 \pm 0.04
4	14 \pm 0.2	14.6 \pm 0.3	1.48 \pm 0.05	1.46 \pm 0.03
5	13.3 \pm 0.5	13.3 \pm 0.2	1.56 \pm 0.02	1.52 \pm 0.03
6	15.5 \pm 0.1	15.4 \pm 0.1	1.45 \pm 0.03	1.45 \pm 0.02
7	14.6 \pm 0.1	14.8 \pm 0.1	1.40 \pm 0.03	1.42 \pm 0.01
8	16 \pm 0.3	16.3 \pm 0.2	1.50 \pm 0.04	1.49 \pm 0.03

**Fig. 2** Bland-Altman plot depicting the calculated bias between the two devices of measurement and the limits of agreement for stride rate measurement using the s3.

Running speed measurement

The speed values recorded with the RS800sd system were significantly different for each interval ($p < 0.05$). This is a positive finding because many researches studies have demonstrated that vertical axis accelerometers often fail to evaluate high RS. Brage et al. [6] suggested that accelerometers may reach the upper limit of their dynamic range with increasing speed. This could explain some levelling-off observed at high RS. As speed increased, the relative duration of the contact phase of the stride decreases and the rebound becomes assymetric. To restore the vertical momentum (constant across running speeds), average contact phase acceleration must increase with shorter contact duration. In this perspective, Bouten and al. [5] reported for the triaxial Tracmor that the oxygen uptake was better predicted from registrations in the anterior-posterior direction, despite the major acceleration component occurring along the longitudinal axis. This anterior-posterior axis may be required to differentiate intensity in the running range with accelerometry. The accuracy of the s3 sensor to evaluate RS from 12 to 18 km.h^{-1} could be explained by its horizontal axis. At fast speeds, horizontal power increased indeed from 12 to 18 km.h^{-1} of running, whereas vertical power is almost constant in this interval [8]. Hence, as horizontal power predominates during running, the RS800sd system seems to be particularly adapted to the biomechanical characteristics of running. Moreover, as its output rose approximately linearly until 18 km.h^{-1} , the dynamic range

of this system appeared large enough to ensure RS measurement without levelling-off.

Mostly, the continuous recording of pace and heart rate (HR) are widely used to control training intensity. Usually, HR is the most common parameter used by coaches to program training, despite a large discomfort caused through wearing an elastic belt. Managing training programs based on HR is obvious but also questionable because its concordance with RS can be altered by physiological modifications during prolonged exercises (e.g. dehydration, environmental conditions, stress...) [24]. Consequently, measuring RS is a more reliable means for keeping an objective control of absolute intensity during training sessions when environmental conditions remain stable. The results of the present study demonstrated the accuracy of the RS800sd for RS evaluation (error of 4.9%). The results were significantly better than those observed in the pedometer/accelerometer literature. For example, Brage et al. [6] observed that the Computer Science and Applications Model 7164 output rose approximately linearly with speed until 8 or 9 km.h^{-1} , but at higher velocities its output levelled off and showed a tendency to drop close to 16 km.h^{-1} . Nevertheless, recent studies demonstrated a greater accuracy for global positioning system (GPS) technique to measure RS. Townshend et al. [32] demonstrated that the speed determined by GPS was highly correlated with actual speed ($r = 0.9994$). Mean error was only 0.01 m.s^{-1} . A second method (using differential GPS, DGPS) involves placing a stationary receiver at a known location that compares its position with that given by the satellites, sending correctional information to the roving receiver. Some authors [29] showed that the accuracy of speed assessment using the DGPS mode could even be improved as compared to non-differential GPS. The GPS technique has all the same some limitations. Speed can only be measured in an environment in which access to the satellites is not obstructed by urban canyons, tall skyscrapers, tunnels, caves and compact trees. Moreover, RS measurements cannot be completed by SR ones using the GPS technique. In addition the differential GPS equipment remains still cumbersome for the athletes to transport [32].

While pace is recognized as a central parameter to control during training for maximizing performance in aerobic sports [3], the present device could improve the adjustment of intensity particularly during interval training sessions. The present study demonstrated the instrument reliability of RS measurement ($r = 0.95$, $P < 0.05$). Such reliability levels could help the athlete to reproduce exactly the same pace during repeated single running bouts of a training session.

The instantaneous recording of RS also represents an interesting opportunity for coaches and sport scientists to accurately deter-

mine pacing strategies adopted in competition by athletes. As this study demonstrated that the recording of RS with RS800sd is reproducible at 96%, using the RS800sd enables the identical reproduction of the speed achieved during competition in training. The light weight of the Polar RS800sd (20 g) allows measurement without disturbing the running pattern of athletes. A thorough study of the literature revealed that the analysis of pacing strategies is a highly investigated area because of their strong impact on performance and direct link to neuromuscular and central fatigue [26]. The continuous measurement of RS in competition offers an attractive variable to appreciate pacing strategies in competition.

In this context, the use of the RS800sd system could help triathletes to adjust their RS during the cycle-to-run transition. Bernard et al. [2] found that triathletes prefer to run at a high pace after cycling at 80 and 100 rpm because of high SR (1.51–1.52 Hz). The knowledge of RS but also of SR could subsequently help triathletes to better optimize their stride patterns after the cycling stage and, consequently to improve their pacing strategies. In this perspective, providing bio-feedback to the runners concerning their SR could help adjust their running technique according to the task demands of cycling via the commercialisation of cadence-meters.

Stride rate measurement

The second major result of this investigation was the accuracy of the SR values recorded with the s3 accelerometer. This study demonstrated a level of accuracy at 98.6% of SR values recorded with this device ($P < 0.001$). These results were positive in comparison with the values obtained using other commercial pedometers/accelerometers. Eslinger et al. [12] observed that the Actical accelerometer tended to overestimate intervals at speeds higher than 9.6 km.h^{-1} . A possible explanation for this overestimation could be a lack of specificity in terms of discrimination between actual steps and spurious accelerometer movement caused by the bouncing of the accelerometer on the waist belt. As the RS800sd system was hooked to the shoe laces to prevent any extraneous movement, this could explain the accuracy of this system in evaluating SR.

When considering the effect of selected descriptor of running mechanics on economy under controlled running speeds, SR is one of the few variables that has been shown to affect economy using a direct experimental device. A basic curvilinear relationship between SL and economy has been well documented [16]. The Bland-Altman method to confront SR measurement using both force-sensitive system and s3-sensor demonstrated indeed a very narrow bias (► Fig. 2); only 4.6% of the values had a greater difference than 0.026 Hz (i.e. 1.56 strides. min^{-1}). These results demonstrated the accuracy of the RS800sd system in SR recording in the same subjects in a range from 80 to 95 strides. min^{-1} which corresponded to the range of values adopted by runners in endurance events [18]. Thus, the RS800sd enables coaches and sport scientists to appreciate the ability of athletes to improve their SR in relation to speed variations when faced with fatigue or changes in circuit gradient.

For any given running speed, it is generally known that metabolic efficiency is optimized through one specific combination of SL and SR. Clearly, individuals do modify their running styles. Saito et al. [27] showed that trained runners increased their speed to 7 m.s^{-1} by lengthening their stride, whereas untrained runners increased SL only up to 5.5 m.s^{-1} ; any further increase in running speed was achieved primarily by increasing SR. In the

same way, Nelson and Gregor [22] observed that a group of distance runners shortened their strides at a given speed by an average of 7 cm during the 4 year of their varsity careers. The simple process of shortening or lengthening the stride has an important effect on all the active musculature. Each muscle is forced to work on a slightly different region of its force-velocity curve and, as a consequence, changes in efficiency can be anticipated [27]. Thus, the RS800sd could be used during training to accelerate the adoption of a higher SR for a given speed by providing instantaneous bio-feedback to the athlete.

The accuracy of the RS800sd system in measuring SR and SL enables the athlete to adjust his/her own characteristics and to the task demands. Nummela et al. [23] demonstrated for example a decrease in SL during a 5-km running race for well-trained distance runners. According to these authors, fatigue is determined by the neuromuscular capacity to produce a force which can be evidenced by kinematic parameters (SL/SR, flying and contact times). Although the RS800sd does not measure flying and contact times, the knowledge of SL and SR enables coaches and scientists to appreciate the ability of an athlete to maintain identical speeds and to adapt his/her stride according to muscular fatigue during a race. The use of the RS800sd system could allow coaches to design better training programs via the understanding of biomechanical changes induced by fatigue on stride pattern.

In conclusion, we have demonstrated in the present study the validity (accuracy and reliability) of a new accelerometer device for measuring kinematic characteristics while running (speed and frequency) for only 8 trained triathletes performing in laboratory condition. This new device is practical and useful both for laboratory and field testing, thanks to its practicality and light weight. Further investigations are needed to test the validity of the Polar RS800sd system at speeds above 19 km.h^{-1} and for measuring unsteady activity with sudden change in acceleration. Other populations could be tested and the number of subjects could be increased to improve the accuracy of the results obtained. Moreover, it would be interesting to evaluate the RS800sd system at lower speeds, notably during walking, to assess its capacity to evaluate physical activity in a free-living conditions.

Acknowledgements



The authors would like to express their appreciation, firstly to the subjects for their participation in this project, and secondly to Patricia Vandewalle for her help in the correction of this manuscript.

References

- 1 Atkinson G, Davison R, Jeukendrup A, Passfield L. Science and cycling: current knowledge and future directions for research. *J Sports Sci* 2003; 21: 767–787
- 2 Bernard T, Vercruyssen T, Grego F, Hausswirth C, Lepers R, Vallier JM, Brisswalter J. Effect of cycling cadence on subsequent 3 km running performance in well trained triathletes. *Br J Sport Med* 2003; 37: 154–159
- 3 Billat VL, Slawinski J, Danel M, Koralzstein JP. Effect of free versus constant pace on performance and oxygen kinetics in running. *Med Sci Sports Exerc* 2001; 33: 2082–2088
- 4 Bland JM, Altman DG. Statistical methods for assessing agreement between two methods of clinical measurement. *Lancet* 1986; 1: 307–310

- 5 Bouter CV, Westerterp KR, Verduin M, Janssen JD. Assessment of energy expenditure for physical activity using a triaxial accelerometer. *Med Sci Sports Exerc* 1994; 26: 1516–1523
- 6 Brage S, Wedderkopp N, Franks PW, Andersen LB, Froberg K. Reexamination of validity and reliability of the CSA monitor in walking and running. *Med Sci Sports Exerc* 2003; 35: 1447–1454
- 7 Brisswalter J, Legros P. Comparaison du coût énergétique dans une population de coureurs de moyennes, de longues distances. *Sci Sports* 1992; 7: 43–49
- 8 Cavagna GA, Thys H, Zamboni A. The sources of external work in level walking and running. *J Physiol* 1976; 262: 639–657
- 9 Crouter SE, Schneider PL, Karabulut M, Bassett DR Jr. Validity of 10 electronic pedometers for measuring steps, distance, and energy cost. *Med Sci Sports Exerc* 2003; 35: 1455–1460
- 10 Crouter SE, Albright C, Bassett DR Jr. Accuracy of polar S410 heart rate monitor to estimate energy cost of exercise. *Med Sci Sports Exerc* 2004; 36: 1433–1439
- 11 Elliott BC, Roberts AD. A biomechanical evaluation of the role of fatigue in middle-distance running. *Can J Appl Sport Sci* 1980; 5: 203–207
- 12 Eslinger DW, Probert A, Gorber SC, Bryan S, Laviolette M, Tremblay MS. Validity of the Actical accelerometer step-count function. *Med Sci Sports Exerc* 2007; 39: 1200–1204
- 13 Eston RG, Lemmey AB, MacHugh P, Byrne C, Walsh SE. Effect of stride length on symptoms of exercise-induced muscle damage during a repeated bout of downhill running. *Scand J Med Sci Sports* 2000; 10: 199–204
- 14 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: 1252–1258
- 15 Hausswirth C, Lehénaaff D. Physiological demands of long distance running. *Sports Med* 2001; 31: 678–689
- 16 Höglberg P. How do stride length and stride frequency influence the energy-output during running? *Arbeitsphysiologie* 1952; 14: 437–441
- 17 Howley ET, Bassett DR Jr, Welch HG. Criteria for maximal oxygen uptake: review and commentary. *Med Sci Sports Exerc* 1995; 27: 1292–1301
- 18 Hunter I, Smith G. Preferred and optimal stride frequency, stiffness and economy: changes with fatigue during a 1-h high-intensity run. *Eur J Appl Physiol* 2007; 100: 653–661
- 19 Jones FP, Hanson JA. Fatigue effects on patterns of movement. *Ergonomics* 1971; 14: 391–410
- 20 MacNaughton LR, Sherman R, Roberts S, Bentley DJ. Portable gas analyser Cosmed K4b² compared to a laboratory based mass spectrometer system. *J Sports Med Phys Fitness* 2005; 45: 315–323
- 21 Mastroianni GR, Zupan MF, Chuba DM, Berger RC, Wile AL. Voluntary pacing and energy cost of off-road cycling and running. *Appl Ergon* 2000; 31: 479–485
- 22 Nelson RC, Gregor RJ. Biomechanics of distance running: a longitudinal study. *Res Q* 1976; 47: 417–428
- 23 Nummela AT, Leena L, Paavolainen M, Sharwood KA, Lambert MI, Noakes TD, Rusko HK. Neuromuscular factors determining 5 km running performance and running economy in well-trained athletes. *Eur J Appl Physiol* 2006; 97: 1–8
- 24 O'Toole ML, Douglas PS, Hiller WD. Use of heart rate monitors by endurance athletes: lessons from triathletes. *J Sports Med Phys Fitness* 1998; 38: 181–187
- 25 Pyne DB, Boston T, Martin DT, Logan A. Evaluation of the Lactate Pro blood lactate analyser. *Eur J Appl Physiol* 2000; 82: 112–116
- 26 St Clair Gibson A, Lambert EV, Rauch LH, Tucker R, Baden DA, Foster C, Noakes TD. The role of information processing between the brain and peripheral physiological systems in pacing and perception of effort. *Sports Med* 2006; 36: 705–722
- 27 Saito M, Kobayani K, Miyashita M, Hoshikawa T. Temporal patterns in running. In: Nelson RC, Morehouse CA, eds. *Biomechanics IV*. Baltimore: University Park Press 1974; 106–111
- 28 Smith DJ, Norris SR, Hogg JM. Performance evaluation of swimmers: scientific tools. *Sports Med* 2002; 32: 539–554
- 29 Snutz Y, Herren R. Assessment of speed of human locomotion using a differential satellite global positioning system. *Med Sci Sports Exerc* 2000; 32: 642–646
- 30 Snyder AC, Woulfe T, Welsh R, Foster C. A simplified approach to estimating the maximal lactate steady state. *Int J Sports Med* 1994; 5: 255–261
- 31 Taylor CR. Force development during sustained locomotion: a determinant of gait speed and metabolic power. *J Exp Biol* 1985; 115: 253–262
- 32 Townshend AD, Worringham CJ, Stewart IB. Assessment of speed and position during human locomotion using non-differential GPS. *Med Sci Sports Exerc* 2008; 40: 124–132
- 33 Tucker R, Lambert MI, Noakes TD. An analysis of pacing strategies during men's world-record performances in track athletics. *Int J Sports Physiol Perf* 2006; 1: 233–245

Distribution of Power Output during the Cycling Stage of a Triathlon World Cup

THIERRY BERNARD¹, CHRISTOPHE HAUSSWIRTH², YANN LE MEUR^{1,2}, FRANK BIGNET³, SYLVAIN DOREL², and JEANICK BRISSWALTER¹

¹*Handibio Laboratory, University of Sud Toulon-Var, La Garde, Cedex, FRANCE*; ²*Research Mission, Laboratory of Biomechanics and Physiology, French National Institute of Sport and Physical Education (INSEP), Paris, FRANCE*; and ³*French Federation of Triathlon, Saint-Denis-La-Plaine, FRANCE*

ABSTRACT

BERNARD, T., C. HAUSSWIRTH, Y. LE MEUR, F. BIGNET, S. DOREL and J. BRISSWALTER. Distribution of Power Output during the Cycling Stage of a Triathlon World Cup. *Med. Sci. Sports Exerc.*, Vol. 41, No. 6, pp. 1296–1302, 2009. **Purpose:** The aim of this study was to evaluate the power output (PO) during the cycle phase of the Beijing World Cup test event of the Olympic triathlon in China 2008. **Methods:** Ten elite triathletes (5 females, 5 males) performed two laboratory tests: an incremental cycling test during which PO, HR at ventilatory thresholds (V_{T1} and V_{T2}), and maximal aerobic power (MAP) were assessed, and a brief all-out test to determine maximal anaerobic power output (MAnP). During the cycle part of competition, PO and HR were measured directly with portable device. The amount of time spent below PO at V_{T1} (zone 1), between PO at V_{T1} and V_{T2} (zone 2), between PO at V_{T2} and MAP (zone 3) and above MAP (zone 4) was analyzed. **Results:** A significant decrease in PO, speed, and HR values was observed during the race. The distribution of time was $51 \pm 9\%$ for zone 1, $17 \pm 6\%$ for zone 2, $15 \pm 3\%$ for zone 3, and $17 \pm 6\%$ was performed at workloads higher than MAP (zone 4). From HR values, the triathletes spent $27 \pm 12\%$ in zone 1, $26 \pm 8\%$ in zone 2, and $48 \pm 14\%$ above V_{T2} . **Conclusions:** This study indicates a progressive reduction in speed, PO, and HR, coupled with an increase in variability during the event. The Olympic distance triathlon requires a higher aerobic and anaerobic involvement than constant-workload cycling exercises classically analyzed in laboratory settings (i.e., time trial) or Ironman triathlons. Furthermore, monitoring direct PO could be more suitable to quantify the intensity of a race with pacing strategies than classic HR measurements. **Key Words:** SRM POWER METER, PACING STRATEGIES, MAXIMAL MEAN POWER, COMPETITION ANALYZIS, ELITE TRIATHLETES

During the last decade, studies focusing on factors affecting performance during an Olympic distance triathlon have identified the role of drafting position, power output (PO) production, cycling cadence selection, or previous locomotion mode on subsequent exercise as the main factors explaining changes in performance (8,14,15,22–25). However, these studies have been mainly conducted using an experimental design and recent studies analyzing cycling performance have highlighted a possible discrepancy between factors affecting performance during competition and those classically identified in experimental settings (e.g., (20,26–28)). One of the main differences is related to the constant PO used in experimental studies when compared with variable intensity observed in competition events where pacing strategies

generate specific physiological or biomechanical constraints. Within this framework, pacing strategy has been defined as the within-race distribution of PO, speed, and cadence induced by voluntary adjustments to cope with the course of the competition (2,4,5,9). Thus, pacing strategy is described as a nonlinear dynamic system leading to particular metabolic and/or neuromuscular fatigue when compared with constant intensity exercise (for review, [1]). In elite Olympic distance triathlon, the athletes are allowed to draft during the cycle stage. This tactic probably affects pacing strategy. With the exception of a case report documenting PO during an Ironman triathlon (2), the only competition data available in Olympic distance triathlon are from the 1997 World Cup race of Sydney (Australia) in three triathletes (19). From a performance-optimization standing point, providing a comprehensive description of the physiological profile for this specific event could improve the knowledge of the Olympic distance triathlon and thus training strategies in elite athletes.

Recently, numerous studies have described the PO profile during professional cycling events (12,26–28) or mountain bike races (20) using lightweight portable power meters. In addition to PO and cadence, power meters also record speed and HR, providing important competition data for identifying the demands associated with successful performances. Results indicate that competition could be characterized by

Address for correspondence: Thierry Bernard, Ph.D., Handibio, EA 3162, University of Sud Toulon-Var, Bât K, BP 20132, 83957 La Garde Cedex, France; E-mail: thierry.bernard@univ-tln.fr.

Submitted for publication June 2008.

Accepted for publication November 2008.

0195-9131/09/4106-1296/0

MEDICINE & SCIENCE IN SPORTS & EXERCISE®

Copyright © 2009 by the American College of Sports Medicine

DOI: 10.1249/MSS.0b013e318195a233

a specific power output profile corresponding to different physiological intensities expressed relative to the laboratory testing results. Furthermore, these authors indicate a difference between PO and HR measurement to determine competition intensity. Thus, using direct power output could be useful to determine training programs corresponding to the demands of international competitions.

During the 2 yr preceding the Olympic Games, an attractive competition, so-called "test event," is organized by the International Triathlon Union (ITU) on the same circuit as the future race, allowing athletes and coaches to collect relevant information related to topographic and environmental conditions on technical bike courses. The Beijing ITU World Cup test event of the Olympic triathlon in China 2008 constituted an opportunity to characterize the cycling workload of world ranked elite triathletes. Therefore, the main aim of this study was to determine the variation of PO, cadence, and HR during the cycle phase of this specific World Cup triathlon. To our knowledge, this study is the first to quantify the distribution in power delivered in cycling within the individual discipline of elite, ITU World Cup, triathlon.

METHODS

Subjects. Ten elite triathletes (5 females, 5 males) of the French National Triathlon team were studied. All were competing on the ITU circuit and had an average World ranking of 30 (range, 7–52). They gave their informed written consent to participate in the study, which was conducted according to the Declaration of Helsinki. A local ethics committee for the protection of individuals gave approval concerning the project before its initiation. Their mean (\pm SD) age, height, and body mass were 26.9 ± 4.7 yr, 173.7 ± 6.9 cm, and 61.5 ± 6.0 kg, respectively.

Laboratory testing. Each subject performed two laboratory sessions. Three weeks before the competition, subjects undertook an incremental cycle test to exhaustion, to determine maximal oxygen uptake ($\dot{V}O_{2\max}$), maximal aerobic power (MAP), and ventilatory thresholds (V_T). This laboratory session was conducted on a stationary electromagnetically braked cycle ergometer (SRM ergometer; Schoberer Rad Messtechnik, Jülich, Germany). The system is a crank-based device that measures the mechanical PO

using strain gauges attached to components inside the crank. The measured torque and cadence values were digitalized inside the crank and converted to a high-frequency, pulse-width-modulated electrical signal. The data were transmitted to a microcomputer on the handlebar, where the torque was averaged over each complete pedal revolution and multiplied by the cadence to calculate the PO reading using the following equation

$$\text{power output} = ([\text{measured frequency} - \text{zero offset frequency}] \times \text{cadence} \times 2\pi) / (\text{slope} \times 60) \quad [1]$$

The slope for each SRM crank dynamometer is calculated dynamically at the SRM factory. Positions of the handlebars, seat height, and crank length were adjusted to the measures used by the athletes on their own racing bike. After a 6-min warm-up at 100 W, further increments of 25 and 30 W were added every 2 min until exhaustion for women and men, respectively. During this test, oxygen uptake ($\dot{V}O_2$) and expiratory flow (\dot{V}_E) were collected, and RER was calculated from the ratio between oxygen uptake and carbon dioxide output ($\dot{V}CO_2/\dot{V}O_2$), using a telemetric system (Cosmed K4b², Rome, Italy). HR values were monitored using a Polar unit (S710i; Polar Electro, Kempele, Finland). Expired gases and HR values were averaged every 10 s. $\dot{V}O_{2\max}$ and MAP were defined as the average of the highest consecutive $\dot{V}O_2$ and PO values recorded during a 1-min period. Moreover, the first and the second ventilatory thresholds (V_{T1} and V_{T2} , respectively) were determined according to the criteria previously described (6). V_{T1} was determined using the criteria of an increase in the ventilatory equivalent for oxygen ($\dot{V}_E/\dot{V}O_2$) with no concomitant increase in the ventilatory equivalent for carbon dioxide ($\dot{V}_E/\dot{V}CO_2$) and the departure from linearity of E. V_{T2} was established using the criteria of an increase in both $\dot{V}_E/\dot{V}O_2$ and $\dot{V}_E/\dot{V}CO_2$. V_{T1} and V_{T2} were recorded by two independent observers. If there was disagreement, the opinion of a third investigator was sought. The physiological characteristics of our subjects are presented in Table 1.

The second laboratory session was a short and maximal all-out cycling test performed on the same ergometer to determine the maximal anaerobic power output (MAnP) for each subject. After a 15-min warm-up, subjects were asked to perform two maximal cycling sprints of 6 s in duration,

TABLE 1. Physiological characteristics of the subjects (females, $n = 3$; males, $n = 5$) recorded during laboratory testing.

Parameters	Females (mean \pm SD)	Min Females	Max Females	Males (mean \pm SD)	Min Males	Max Males
PV_{T1} (W)	186.7 ± 12.6	175	200	266.0 ± 18.5	235	280
PV_{T2} (W)	241.7 ± 14.4	225	250	336.0 ± 23.0	310	370
MAP (W)	296.3 ± 29.7	265	324	418.0 ± 26.8	400	460
Rel. MAP (W·kg ⁻¹)	5.4 ± 0.3	5.0	5.6	6.3 ± 0.6	5.8	7.4
MAnP (W)	676.7 ± 124.6	542	788	942.8 ± 119.2	830	1120
Rel. MAnP (W·kg ⁻¹)	12.3 ± 1.8	10.2	13.6	14.2 ± 2.0	12.0	16.5
$\dot{V}O_{2\max}$ (mL·min ⁻¹ ·kg ⁻¹)	67.3 ± 0.7	66.9	68.1	69.8 ± 5.3	65.9	78.9
HR _{max} (bpm)	185.7 ± 13.1	172	198	180.8 ± 5.4	175	187
Body mass (kg)	55.0 ± 2.6	53	58	66.4 ± 3.2	62	69

HR_{max}, maximal HR; MAnP, maximal anaerobic power; MAP, maximal aerobic power; PV_{T1} , power at first ventilatory threshold; PV_{T2} , power at second ventilatory threshold; Rel. MAnP, maximal anaerobic power relative to body weight; Rel. MAP, maximal aerobic power relative to body weight; $\dot{V}O_{2\max}$, maximal oxygen uptake.

each one separated by at least a 4-min rest. Subjects were told to remain in the seated position and were vigorously encouraged to produce the highest acceleration possible. Total effective force (i.e., the propulsive force applied perpendicularly to the crank arm) was determined by the ratio between torque and the constant length of the crank arm. Effective force, crank angular velocity recalculated as pedaling rate, and power were averaged for the period of each pedal down-stroke. After computation, the data from both sprints were used to draw the power–velocity relationship, respectively, using a second-order polynomial regression. MAnP was identified as the apex of the power–velocity relationship.

Test event. Race data were collected during the Beijing ITU World Cup (China, September 24, 2006) organized 3 wk after the World Triathlon Championship. The course of the competition was exactly the same as that of the Olympic event scheduled in 2008 in Beijing. The cycle phase of the test event consisted of six partly hilly (elevation change of 100 m per lap) 6.9-km laps, allowing comparisons of data observed among the different consecutive laps (Fig. 1).

Before the event, each subject's own bicycle was equipped with a mobile power measurement device (Professional SRM road version; SRM Training System, Schoberer Rad Messtechnik, Jülich, Germany). The SRM system records continuously and reliably power output (PO), cadence, HR, speed, and distance (13,17). The system weight of 300 g is comparable to a conventional bicycle crank and, therefore, does not influence performance. Because of a possible drift of the zero offset frequency, the device was calibrated systematically before the race. Data were collected at 1 Hz, and a compatible Polar unit (Team System, Kempele, Finland) allowed the recording of HR throughout the swim, cycle, and run phases of the triathlon. After the race, the data were transmitted from the registration unit to a personal computer for further processing.

Race data analysis. Similarly to previous studies on competitive cycling events (12,20,26), the total cycling

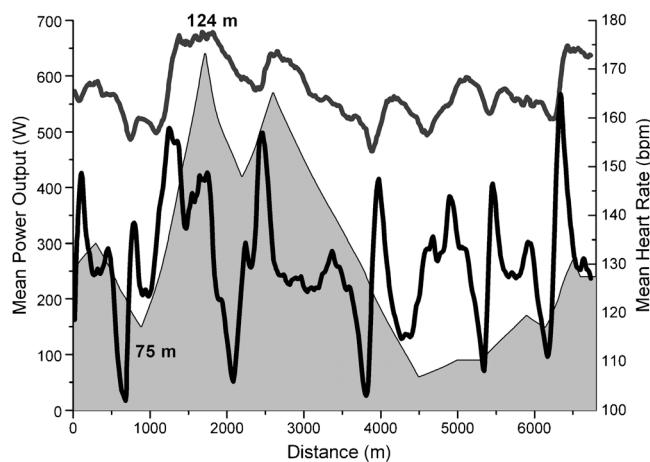


FIGURE 1—Example of the race profile (filled area) and smoothed plot of power output (bold lower line) and HR (upper line) of one male triathlete during a single lap (length, 6900 m; max difference in elevation, 100 m).

phase time was divided into four zones of intensity on the basis of results from the graded exercise test in the laboratory, and the percentage of time spent in each zone was calculated as follows: below PO at V_{T1} (zone 1), between PO at V_{T1} and V_{T2} (zone 2), between PO at V_{T2} and MAP (zone 3), and above MAP (zone 4). In addition, zone 4 was divided in two parts (part 1, between MAP and 60% MAnP; part 2, above 60% MAnP). A similar analysis using HR values was also conducted: below HR at V_{T1} , between HR at V_{T1} and V_{T2} , and above HR at V_{T2} . The six laps (L1, L2, L3, L4, L5, ad L6) were combined in three sections (L1–L2, the initial phase; L3–L4, the middle phase; and L5–L6, the late phase). To reflect the freely chosen cadence of athletes, the nonpedaling time was excluded when calculating the mean cadence during each lap. In addition, the gear (meters per crank revolution) was calculated from speed and cadence values using the following equation:

$$\text{gear} = \text{speed} \times \text{time}^{-1} \times (\text{cadence} \times 60)^{-1} \quad [2]$$

Statistical analysis. Descriptive statistics [mean, SD, coefficient of variation (CV), and range (min–max)] for PO, speed, cadence, HR, and gear were calculated for the six laps of the cycle phase. The effect of period (L1–L2, L3–L4, and L5–L6) were analyzed using a one-way repeated-measures ANOVA using PO, speed, cadence, and HR as dependent variables. A Newman–Keuls *post hoc* test was used to determine any differences between the sections. For all analyses, significance was accepted at $P < 0.05$.

RESULTS

Power output, speed, cadence, and HR during competition. Only eight athletes finished the race (Table 1). The triathletes completed the cycle phase of the triathlon in 66 ± 4 min at a mean PO of 230 ± 53 W (3.6 ± 0.5 W·kg $^{-1}$, $60 \pm 8\%$ MAP), a speed of 38 ± 3 km·h $^{-1}$, a cadence of 91 ± 5 rpm, an HR of 165 ± 5 bpm ($91 \pm 4\%$ HR $_{\text{max}}$), and a gear of 6.4 ± 0.4 m per crank revolution. A significant decrease in PO, speed, gear, and HR values was observed during the race ($P < 0.05$; Table 2). Between the first (L1–L2) and last sections (L5–L6), PO, speed, HR, and gear decreased by 20.0%, 3.6%, 7.3%, and 6.5%, respectively. Conversely, the variability in PO and HR significantly increased across periods. No significant variation of cadence or changes in variability of speed, cadence, and gear was observed (NS).

Power output and HR demands during competition referring to the maximal tests performed in laboratory. The average distribution of time spent at different intensities (in % of MAP zones 1–4) was $51 \pm 9\%$ for zone 1, $17 \pm 6\%$ for zone 2, $15 \pm 3\%$ for zone 3, and $17 \pm 6\%$ for zone 4. In zone 1, a portion of the time spent was below 10%MAP and, therefore, represented times when the athletes were coasting downhill or freewheeling within the peloton. From HR values, the triathletes spent

TABLE 2. Percentage of maximal aerobic power (%MAP) and maximal HR (%HR_{max}), speed (S), cadence (Cad), gear (m per crank revolution), and the respective coefficients of variation (CV) during each section (L1–L2, L3–L4, L5–L6).

Sections	%MAP (%)	CV %MAP (%)	S (km·h ⁻¹)	CV S (%)	Cad (rpm)	CV Cad (%)	Gear		%HR _{max} (%)	CV HR (%)
							(m per crank revolution)	CV Gear (%)		
L1–L2	66.0 ± 7.1	59 ± 7	38.2 ± 2.6	28 ± 2	91.1 ± 5.0	17 ± 7	6.6 ± 0.4	19 ± 2	94.0 ± 2.6	4 ± 1
L3–L4	60.7 ± 9.1*	66 ± 10*	38.0 ± 2.6	27 ± 1	91.3 ± 4.6	16 ± 5	6.4 ± 0.4*	19 ± 2	90.6 ± 4.1*	7 ± 2*
L5–L6	52.7 ± 7.5*†	77 ± 15*†	36.9 ± 2.5*	28 ± 2	90.9 ± 4.8	15 ± 3	6.2 ± 0.5*†	20 ± 1	87.2 ± 5.7*†	9 ± 2*†

Mean ± SD. N = 8.

* Significantly different from L1–L2.

† Significantly different from L3–L4.

27 ± 12% in zone 1, 26 ± 8% in zone 2, and 48 ± 14% above V_{T2} (zones 3–4). The main differences between periods were as follows (Fig. 2): 1) during L5–L6, an increase of time spent at low intensities ($P < 0.05$; below power at V_{T1}) and a decrease of time spent ($P < 0.05$) at moderate (below power at V_{T2}), high (below MAP), and very high intensities (above MAP); 2) when expressed as percent of maximal anaerobic power (MAnP), the time between 100% MAP and 60% of MAnP declined from 14.1 ± 5.9% (L1–L2) to 9.4 ± 2.8% (L5–L6) and the percentage of time spent above 60% of MAnP decreased from 5.5 ± 4.3% (L1–L2) to 3.8 ± 2.5% (L5–L6; $P < 0.05$).

DISCUSSION

This investigation is the first to analyze pacing strategies used by elite triathletes during the attractive test event of Beijing ITU World Cup preceding the Olympic triathlon in China 2008. Olympic events particularly increase the role of the cycle portion of a triathlon when compared with the swimming or the running part. Therefore, the present data should be considered as descriptive indicators for the workload sustained during Olympic events with this

specific course design. Similarly to the Athens Olympic triathlon (2004), the Beijing Olympic triathlon (2008) will involve a predominantly hilly cycle section to better accommodate the needs of the viewing public. The main results observed were as follows: (a) a great variability in power output during and among the different laps of the cycle phase, (b) an increase in the variability of power output and HR values as the number of laps progressed, and (c) a decrease in power concomitant with HR, speed, and gear during the race without any cadence alteration.

It has been well documented that the direct measurement of power output describes precisely performance in cycling (11,20,26,27). To date, only one study has analyzed the power output in cycling during the 180-km time trial of an Ironman triathlon (2). This previous study was the first to show the oscillatory patterns of power output that occur during a prolonged cycling part of a triathlon and their relationship with pacing strategy. However, contrarily to an Ironman, pacing strategies used in contemporary elite Olympic distance triathlon are influenced by several factors, especially the use of drafting (7). Furthermore, the profile of the race with many hilly sections or more technical bike courses may change the physiological demands during draft-legal competitions and induce tactical strategies that could increase variability in power output. The mean power output measured during the race was 173 ± 14 W (3.1 ± 0.1 W·kg⁻¹) for the female triathletes and 265 ± 19 W (3.9 ± 0.4 W·kg⁻¹) for the male athletes, for respective mean race durations of 72 and 63 min. These results could be compared with previous results recorded during cycle competition. The mean power output of women's World Cup cycle racing over flat and hilly profiles were 192 ± 21 W (3.3 ± 0.3 W·kg⁻¹) and 169 ± 17 W (3.0 ± 0.4 W·kg⁻¹), respectively (12). In men's professional road cycling (26), during multistages including an uphill time trial, the average power output measured was 245 ± 33 W (3.4 ± 0.3 W·kg⁻¹), and during the Tour de France, the average power outputs during flat, semimountainous, and mountainous stages were 218 ± 21 W (3.1 ± 0.3 W·kg⁻¹), 228 ± 22 W (3.3 ± 0.3 W·kg⁻¹), and 234 ± 13 W (3.3 ± 0.2 W·kg⁻¹), respectively (27). The slight differences with our data could be mainly explained by the fact that the cycling phase during an Olympic distance triathlon is shorter than the other mentioned races, approximately 1 h versus more than 3 h, respectively. Furthermore, the Olympic distance triathlon race is composed of several identical laps, thus repeated climbs, descents, and turns lead to a particular

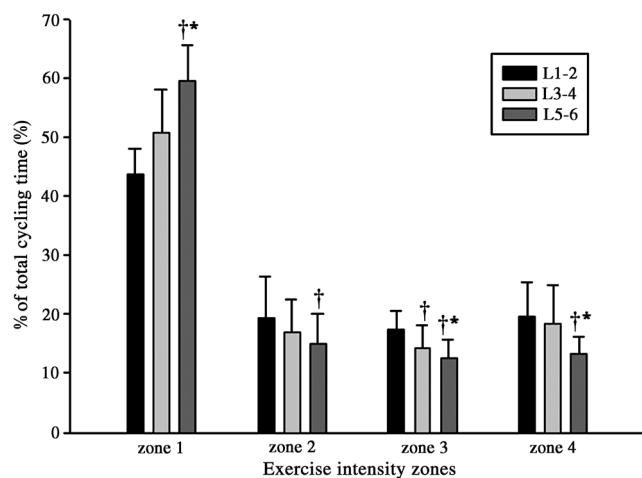


FIGURE 2—Percentage of total cycling time during each section (L1–L2, L3–L4, L5–L6) in exercise intensity zones: 1) below power output at first ventilatory threshold (zone 1; power output <64% MAP), 2) power output at second ventilatory threshold (zone 2; power output = 64%–81% MAP), 3) 100% of maximal aerobic power (zone 3; power output = 82%–100% MAP), and (4) above 100% of maximal aerobic power (zone 4). Mean ± SD. †Significantly different from L1–L2. *Significantly different from L3–L4. $P < 0.05$.

profile more similar to cycle criterion races with rapid accelerations at supramaximal power outputs and periods at submaximal intensities.

One interesting result of this study is the variability of power output observed in all subjects. This result is in agreement with the observations reported by Smith et al. (19) during the World Cup race of Sydney in 1997 (Australia) in three triathletes. Our data support this clinical report with variability in power output fluctuating from 0 W to maximal power. During the cycling phase, it is possible to reduce energy expenditure by drafting behind other riders. Little is known about drafting in cycling and its influences on the overall performance during a triathlon (10). The first interesting report was provided by Hausswirth et al. (14), indicating that drafting during the bike course of a triathlon lowered energy expenditure, HR, and pulmonary ventilation values for a drafting distance of 0.2–0.5 m behind a lead cyclist. A global reduction of oxygen uptake (-14%), HR (-7.5%), and pulmonary ventilation (-30.8%) was reported for an average cycling speed of $39.5 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$. Thus, the stochastic nature of power output and HR observed in the present study is certainly related in part to drafting and group dynamics. The high-power output oscillations measured in each subject (coefficient of variation, 55%–77%) indicate that cycling phases in Olympic distance triathlons are high-intensity activities characterized by intermittent effort. This observation is comparable with a previous report in mountain bike races (coefficient of variation, 69%) (20). In addition, the fluctuations in power output were significantly higher than the oscillations in HR observed during the same period ($P < 0.05$; Table 2). This observation is in agreement with results of previous studies comparing direct power output and HR (e.g., (20,26,27)). One reason could be the fact that regulation of HR is slower than abrupt power changes in a competition context. Indeed, when athletes choose to coast briefly, although power dropped to zero, HR cannot drop to resting values instantaneously. Thus, HR remains a useful measure of aerobic demand, and power output provides a superior indicator of immediate changes in energy demands and, especially, the demands on anaerobic metabolism.

In this study, a significant effect of period was observed for all dependant variables, except for cadence. The highest power output and HR values were observed immediately in the initial phase. Similar results have been observed in mountain biking (16,20). In these competitions, this is not surprising as the initial phase, unlike than for road stage race, is crucial for overall performance (16,20,24,25). During an Olympic distance triathlon, the weaker swimmers cycle significantly faster during the first part of cycling than the faster swimmers to catch up to the leading athlete(s) and thus draft behind them, and in the same way, the better swimmers attempt to break away to avoid being drafted (25). Our data support these observations with higher power output during the first two laps in comparison to the mean power output of the race ($+11\%$, $P < 0.05$) and an average

value of 94% of HR_{max} during the postswim phase (L1–L2). After this initial intense phase, power output and HR decrease during the race. The decline of 3.6% in bike speed observed between the postswim phase (L1–L2) and the late phase (L5–L6) is comparable with previous video reports in elite female triathletes (24). In our study, using direct output measurement, this pacing strategy is observed in all subjects and reflects a concomitant decline of 20% in PO. The difference between speed and power decline could be explained by the exponential relationship between these dependent variables but also evidence a better skill to be sheltered behind riders inside the bike packs (i.e., pelotons). Within this framework, the potential benefits of drafting is evident. For example, in a previous study without drafting, it has been observed that, for the same speed ($38 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$), the mean power output was 312 W when compared with the mean power of 230 W recorded in this study (9). In Olympic distance triathlon, pacing strategies during cycling are related to the multievent characteristics of this sport. At the end of the swim, the athletes are spaced apart, and this probably influences the number of athletes who are able to form a peloton, and the work required by each athlete to reach the leading pack(s) is different than for isolated subjects. It has been reported that the number of athletes included in the group will increase the average speed of the pack and allow individual athletes to spare more energy (3). On the opposite before the cycle to run transition, the number of packs is stabilized (24). Thus, the athletes' organization within the pack allows them to decrease the workload sustained for a given speed. From a performance-optimization standpoint, anecdotal reports from triathletes highlight the transition from cycling to running as the tougher of the two transitions in a triathlon event. The first experimental studies using constant power output exercise have suggested that performance could be improved when athletes are able to run as well as possible immediately after the cycling leg (15). To the best of our knowledge, only two studies have examined the physiological effects of an exercise protocol involving stochastic power output on subsequent running performance (9,21). Suriano et al. (21) have observed during a variable cycling protocol that decreasing power during the last 5 min of the ride leads to an increase in running performance. Furthermore, when athletes try to increase power output at the end of the cycle part to come into the transition area in the best position, a significant decrease in running time was observed (9). Therefore, in the present study, possibly triathletes have diminished power output voluntarily either to prepare for the subsequent running part or to reduce fatigue.

During the race, no cadence variation was observed with a mean value ($91 \pm 5 \text{ rpm}$) slightly higher than those previously reported in professional road cyclists (27) during flat ($87 \pm 14 \text{ rpm}$), semimountainous ($86 \pm 14 \text{ rpm}$), or mountainous rides ($81 \pm 15 \text{ rpm}$) and in long-distance triathletes ($85 \pm 7 \text{ rpm}$) (2). In our study, the stability of the cadence is related to a progressive decrease in distance per

pedaling cycle and power output within the laps (Table 2). This indicates that the reduction in power is primarily due to a reduction in force or torque and that athletes simply choose appropriate gearing to maintain their preferred cadence. These results confirm that triathletes prefer to adopt a high pedaling cadence with an appropriate gearing to get out quickly on the run. Despite the lack of data concerning the starting run velocity, these observations are in agreement with previous results (8) in which a significant increase in running speed was observed, during the first 500 m of a 3000-m run, after the 80- and 100-rpm run sessions versus 60-rpm run session. Therefore, we could suggest that, in Olympic distance triathlon, subjects choose a strategy to reduce torque to maintain their preferred cadence at the end of the cycle part to maximize the subsequent running performance.

To our knowledge, this study is the first to describe exercise intensity during an Olympic distance triathlon. During laboratory testing, the ventilatory thresholds, maximal aerobic power, and maximal anaerobic power output have been assessed and used as reference values to identify individual workload during the race. We have reported that $51 \pm 9\%$ of the cycling time was spent in zone 1, $17 \pm 6\%$ in zone 2, $15 \pm 3\%$ in zone 3, and $17 \pm 6\%$ in zone 4, indicating that 32% of the race time was spent above intensities corresponding to V_{T2} . Our results could be compared with previous studies during cycling competitions (12,20,26). For example, in women's World Cup road cycle racing, the riders spent 51%, 17%, 12%, and 20% during flat and 52%, 22%, 13%, and 13% of total race time during hilly races in the four intensity zones assessed during laboratory testing, respectively (12). Similarly, Vogt et al. (26) have reported that, in professional road cycling, the time spent in the different intensities was 58% for zone 1, 14% for zone 2, and 28% at intensities higher than an increase of 1 mmol L^{-1} above the lactate threshold (zone 3). Furthermore, in this previous study, a difference was observed between exercise intensity determined through classic HR measurement and direct measurement of power output. These authors indicate that the use of HR underestimated time spent in zones 1 and 3 and overestimated time spent in zone 2. Our results are similar for zones 1 and 2 with an underestimation of time spent in zone 1 (-47%) and an overestimation of time spent in zone 2 ($+52\%$). On the opposite from HR measurement, we have observed an overestimation of time spent in zone 3 ($+50\%$), but in agreement with Vogt et al. (26), the differences between intensities determined using HR and direct power output indicate that describing exercise intensity with HR measurement does not reflect precisely pacing strategies, and thus, monitoring direct power output could be more suitable to quantify the absolute intensity of a race or to control training for these particular events. However, recording HR remains of interest in quantifying the relative intensity of exercise, as with fatigue, a similar power output could correspond to a higher energy demand.

This study indicates that anaerobic power and capacity may be important for meeting the physiological demands of Olympic distance triathlon racing because a significant part of the race corresponds to intensities above MAP. Classically, triathlon racing has been mainly described as an endurance event, and to date, very few data using blood lactate measurements concerning the anaerobic demand of this event in elite triathletes are available (9,14). Our data, mixing female and male athletes, determined a relative maximal anaerobic power of 12.9 W kg^{-1} . In this study, direct measures of power output show high variations of power output, with values above 60% of MAnP ($489 \pm 103 \text{ W}$) during hill or "technical" bike sections. In an attempt to break up groups of drafting athletes, the triathletes complete rapid accelerations in supramaximal power output interspersed with periods of submaximal exercise. In this study, 57 cycling periods of seven consecutive seconds and 13 periods of 15 s were registered at an intensity above 100% of maximal aerobic power. Furthermore, 13 periods of seven consecutive seconds (included in the 57 periods) were observed for intensities higher than 60% of MAnP. A higher power output ($>100\%$ MAP) was required during the initial cycle phase (L1–L2, $20 \pm 6\%$ of total cycling time), and the average time spent above MAP during this race ($17 \pm 5\%$) suggests a significant contribution of anaerobic metabolism to the energy requirements of the cycling phase in a triathlon. Therefore, in contrast to individual time trials as in an Ironman, the energetic demand of an Olympic distance triathlon is similar to previous reports during professional cycling events with repeated bouts of exercise approaching or exceeding $\dot{V}\text{O}_{2\text{max}}$ (18).

In conclusion, this study indicates that subjects progressively reduced speed, power output, and HR during the event. This decrease in intensity was coupled with an increase in the variability of these measurements. Also important is that Olympic distance triathlon requires a higher aerobic and anaerobic involvement than constant-workload cycling exercise classically analyzed in laboratory settings or Ironman triathlons. The performance profile of the race is characterized by high-power output bursts during short periods because the cycling phase in Olympic distance triathlon requires the ability to sprint or to push for a better position in the peloton to cope with the race strategy. Furthermore, the decrease in power output at the end of the cycle portion of the triathlon part could be related to a strategy to prepare for the subsequent running part. Further investigations should analyze the importance of anaerobic power improvement for overall performance and the effect of specific cycle strategies on running performance.

This study was supported by technical supports to the French National Institute of Sport and Physical Education, the French Triathlon Federation and the University of Sud Toulon-Var. The authors are especially grateful to the athletes and coaches for their help and cooperation of this work. The results of the present study do not constitute endorsement by ACSM.

No funds have been received for this work from the NIH, Wellcome trust, HHMI, or others.

REFERENCES

1. Abbiss CR, Laursen PB. Describing and understanding pacing strategies during athletic competition. *Sports Med.* 2008;38:239–52.
2. Abbiss CR, Quod MJ, Martin DT, et al. Dynamic pacing strategies during the cycle phase of an Ironman triathlon. *Med Sci Sports Exerc.* 2006;38(4):726–34.
3. Ackland J. Pack formation in cycling and orienteering. *Nature.* 2001;413:127.
4. Atkinson G, Brunskill A. Pacing strategies during a cycling TT with simulated headwinds and tailwinds. *Ergonomics.* 2000;43:1449–60.
5. 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;25:1001–9.
6. Beaver WL, Wasserman K, Whipp BJ. A new method for detecting anaerobic threshold by gas exchange. *J Appl Physiol.* 1986;60:2020–7.
7. Bentley DJ, Millet GP, Vleck VE, McNaughton LR. Specific aspects of contemporary triathlon: implications for physiological analysis and performance. *Sports Med.* 2002;32:345–59.
8. Bernard T, Vercruyssen F, Grego F, et al. Effect of cycling cadence on subsequent 3 km running performance in well trained triathletes. *Br J Sports Med.* 2003;37:154–8.
9. Bernard T, Vercruyssen F, Mazure C, Gorce P, Hausswirth C, Brisswalter J. Constant versus variable-intensity during cycling: effects on subsequent running performance. *Eur J Appl Physiol.* 2007;99:103–111.
10. Brisswalter J, Hausswirth C. Consequences of drafting on human locomotion: benefits on sports performance. *Int J Sport Physiol Perf.* 2008;3:3–15.
11. 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.
12. Ebert TR, Martin DT, McDonald W, Victor J, Plummer J, Withers RT. Power output during women's World Cup road cycle racing. *Eur J Appl Physiol.* 2005;95:529–36.
13. Gardner AS, Stephens S, Martin DT, Lawton E, Lee H, Jenkins D. Accuracy of SRM and power tap power monitoring systems for bicycling. *Med Sci Sports Exerc.* 2004;36(7):1252–8.
14. Hausswirth C, Lehenaff D, Dréano P, Savonen K. Effects of cycling alone or in a sheltered position on subsequent running performance during a triathlon. *Med Sci Sports Exerc.* 1999;31(4):599–604.
15. Hausswirth C, Vallier JM, Lehenaff D, et al. Effect of two drafting modalities in cycling on running performance. *Med Sci Sports Exerc.* 2001;33(3):485–92.
16. Impellizzeri F, Sassi A, Rodriguez-Alonso M, Mognoni P, Marcora S. Exercise intensity during off-road cycling competitions. *Med Sci Sports Exerc.* 2002;34(11):1808–13.
17. Jones SM, Passfield L. The dynamic calibration of bicycle power measuring cranks. In: Haake SJ, editor. *The Engineering of Sport.* Oxford (England): Blackwell Science; 1998. p. 265–74.
18. Lucia A, Joyos H, Chicharro JL. Physiological response to professional road cycling: climbers vs. time trialists. *Int J Sports Med.* 2000;21:505–12.
19. Smith D, Lee H, Pickard R, Sutton B, Hunter E. Power demands of the cycle leg during elite triathlon competition. In: 2nd INSEP International Triathlon Congress European Symposium; 1999 Mar 30: Paris (France). 217 p.
20. Stapelfeldt B, Schwirtz A, Schumacher YO, Hillebrecht M. Workload demands in mountain bike racing. *Int J Sports Med.* 2004;25:294–300.
21. Suriano R, Vercruyssen F, Bishop D, Brisswalter J. Variable power output during cycling improves subsequent treadmill run time to exhaustion. *J Sci Med Sport.* 2007;10:244–51.
22. Vercruyssen F, Brisswalter J, Hausswirth C, Bernard T, Bernard O, Vallier JM. Influence of cycling cadence on subsequent running performance in triathletes. *Med Sci Sports Exerc.* 2002;34(3):530–6.
23. Vercruyssen F, Suriano R, Bishop D, Hausswirth C, Brisswalter J. Cadence selection affects metabolic responses during cycling and subsequent running time to fatigue. *Br J Sports Med.* 2005;39:267–2.
24. Vleck VE, Bentley DJ, Millet GP, Bürgi A. Pacing during an elite Olympic distance triathlon: comparison between male and female competitors. *J Sci Med Sport.* 2008;11(4):424–32.
25. Vleck VE, Bürgi A, Bentley DJ. The consequences of swim, cycle, and run performance on overall result in elite Olympic distance triathlon. *Int J Sports Med.* 2006;27:43–8.
26. Vogt S, Heinrich L, Schumacher YO, et al. Power output during stage racing in professional road cycling. *Med Sci Sports Exerc.* 2006;38(1):147–51.
27. Vogt S, Schumacher YO, Roecker K, et al. Power output during the Tour de France. *Int J Sports Med.* 2007;28:756–61.
28. Vogt S, Roecker K, Schumacher YO, et al. Cadence-power-relationship during decisive mountain ascents at the Tour de France. *Int J Sports Med.* 2008;29:244–50.

Influence of gender on pacing adopted by elite triathletes during a competition

Yann Le Meur · Christophe Hausswirth ·
Sylvain Dorel · Frank Bignet · Jeanick Brisswalter ·
Thierry Bernard

Accepted: 16 March 2009 / Published online: 2 April 2009
© Springer-Verlag 2009

Abstract The aim of this study was to compare the pacing strategies adopted by women and men during a World Cup ITU triathlon. Twelve elite triathletes (6 females, 6 males) competed in a World Cup Olympic distance competition where speed and heart rate (HR) were measured in the three events. The power output (PO) was recorded in cycling to determine the time spent in five intensity zones ([0–10% VT1]; [10% VT1–VT1]; [VT1–VT2]; [VT2–MAP] and \geq MAP) [ventilatory threshold (VT); maximal aerobic power (MAP)]. Swimming and running speeds decreased similarly for both genders ($P < 0.05$) and HR values were similar through the whole race (92 ± 2 and $92 \pm 3\%$ of maximal HR for women and men, respectively). The distribution of time spent in the five zones during the cycling leg was the same for both genders. The men's speed and PO decreased after the first bike lap ($P < 0.05$) and the women spent relatively more time above MAP in the hilly sections (45 ± 4 vs. $32 \pm 4\%$). The men's running speed decreased significantly over the whole circuit, whereas the women slowed only over the uphill and downhill sections ($P < 0.05$). This study indicates that both female and male elite triathletes adopted similar positive pacing strategies during swimming and running legs. Men pushed the pace harder during the swim-to-cycle transition contrary to the women and female triathletes were more

affected by changes in slope during the cycling and running phases.

Keywords Triathlon · Performance · Race design · Power output

Introduction

In an attempt to enhance our understanding of athletic performance, sports scientists have examined how workload or energy expenditure is distributed during an exercise task (Foster et al. 2004; Tucker et al. 2006). This distribution of workload, or variability in energy expenditure, has been termed “pacing” or “pacing strategy” (Atkinson and Edwards 1998; Foster et al. 2004). In a review on pacing strategy and athletic performance, Foster et al. (1994) recall that, since the initial study by Robinson et al. (1958) during a 1.2 km run, there have been few systematic studies to determine how various pacing strategies might influence the outcome of competition performance. These research studies have mainly focused on cycling and running (for review, see Abbiss and Laursen 2008). Nevertheless, all these studies described the variability in energy expenditure in one gender, generally males. The way the conclusion could be extended to the other gender still remains unclear. To the best of our knowledge, only three studies focusing on swimming, rowing and triathlon investigated whether gender differences exist in pacing (Thompson et al. 2000; Garland 2005; Vleck et al. 2008). Vleck et al. (2008) have notably demonstrated that during a short distance triathlon under “draft-legal” conditions (i.e. 1.5 km swim, 40 km cycle and 10 km run), women adopted the same strategies as men over swimming and running sections but did not tend to “bridge gaps” during

Y. Le Meur · C. Hausswirth (✉) · S. Dorel
Research Department, National Institute of Sport and Physical
Education (INSEP), Paris, France
e-mail: christophe.hausswirth@insep.fr

Y. Le Meur · J. Brisswalter · T. Bernard
Handibio, EA 4322, University of South Toulon-Var, La Garde
Cedex, France

F. Bignet
French Federation of Triathlon, La Plaine Saint Denis, France

the bike phase. This particular strategy of female triathletes increased the impact of cycling on their overall performance. Differentiating pacing between women and men could be useful to better design training programs according to the demands of competition.

During the last decade, studies focusing on factors affecting performance during a short distance triathlon have identified the role of drafting position (Hausswirth et al. 1999, 2001), power output production (Bernard et al. 2007), cycling cadence selection (Vercruyssen et al. 2005) or previous locomotion mode on subsequent exercise (Hausswirth et al. 1996, 1997) as the main factors explaining changes in performance during triathlon. Nevertheless, these studies were not carried out under competition conditions and did not consider gender effects on the responses observed. Recently, Vleck et al. (2006) were the first to describe the pacing strategies spontaneously adopted by elite triathletes during a World Cup Event. They demonstrated that the top 50% of triathletes in the race differ from those who place in the bottom 50% of the field in so far as they swim significantly faster in the early stages of the event. This tactic involved greater work in the initial stages of the cycle stage for the weaker swimmers and might influence subsequent running performance. For all that the authors did not discuss the way these findings could be generalized to women. In this context, the study by Vleck et al. (2006) remains the only one that has differentiated pacing strategies between female and male elite triathletes using a field-based analysis. Nevertheless, this study was limited in its ability to describe the variability in workload demands during an International Triathlon Union World Cup (ITU WC) race because of its lack of details concerning “performance power” [via heart rate (HR) and power output data].

One year before the Olympic Games in Beijing 2008, we were allowed to collect data during a World Cup event, which took place on the same circuit as the Olympic race. The aim of this study was to describe the pacing strategies adopted by female and male elite triathletes during a World Cup triathlon and to discuss possible factors influencing the self-selection of such strategies. The Beijing ITU WC triathlon China 2007 was an opportunity to characterize the effects of gender on the swimming, cycling and running workloads during an elite short distance triathlon.

Materials and methods

Subjects

Twelve triathletes (6 women, 6 men) from the French and Swiss national triathlon teams participated in this study. They were familiar with all testing procedures and gave their informed written consent to take part to this study that was conducted according to the Declaration of Helsinki.

A local committee (Saint Germain en Laye, France) for the protection of individuals gave approval concerning the project before its initiation. Mean (\pm SD) characteristics of the subjects are presented in Table 1.

Pre-race maximal testing

Two weeks before the competition, each subject performed a maximal test in swimming, cycling and running in a randomized order. These tests were separated by a 48-h rest period.

Swimming maximal test

Triathletes performed an all-out 400-m front crawl test in a 25-m swimming pool in order to determine their swimming maximal heart rate (HR_{max}) (Lavoie and Montpetit 1986). HR values were monitored using a Polar unit at a sampling rate of 0.2 Hz (Team System, Polar Electro Kempele, Finland).

Cycling maximal test

Each subject performed an incremental cycling test until volitional exhaustion, to estimate maximal oxygen uptake ($\dot{V}O_{2max}$), maximal aerobic power (MAP) and ventilatory thresholds. This laboratory session was conducted on a stationary electromagnetically braked cycle ergometer (SRM ergometer, Schoberer Rad Messtechnik, Jülich, Germany). The system is a crank-based device that measures the mechanical power output using strain gauges attached to components inside the crank. The measured torque and cadence values were digitalized inside the crank, and converted into a high frequency, pulse-width modulated electrical signal. The data were transmitted to a

Table 1 Anthropometrical and physiological characteristics of the triathletes (females $n = 6$, males $n = 6$)

Parameters	Women	Men
Age (years)	27 ± 4	30 ± 6
Weight (kg)	57 ± 5	67 ± 5
Height (cm)	168 ± 5	180 ± 3
$\dot{V}O_{2max}$ ($mlO_2 \text{ min}^{-1} \text{ kg}^{-1}$)	60.9 ± 7.0	71.7 ± 5.4
MAP (W)	293 ± 19	418 ± 22
MAP/weight (W kg $^{-1}$)	5.2 ± 0.2	6.2 ± 0.2
P_{VT1} (W)	201 ± 21	264 ± 20
P_{VT1} (%MAP)	68.6 ± 7.1	63.2 ± 4.8
P_{VT2} (W)	232 ± 24	349 ± 22
P_{VT2} (%MAP)	79.2 ± 8.2	83.5 ± 5.3

$\dot{V}O_{2max}$ maximal oxygen uptake, MAP maximal aerobic power, P_{VT1} power output at the first ventilatory threshold, P_{VT2} power output at the second ventilatory threshold

microcomputer on the handlebar where the torque was averaged over each complete pedal revolution and multiplied by the cadence to calculate the power output reading using the following equation:

$$\begin{aligned} \text{Power output} = & \\ & ([\text{measured frequency} - \text{zero offset frequency}] \\ & \times \text{cadence} \times 2\pi) / (\text{slope} \times 60). \end{aligned}$$

The slope for each SRM crank dynamometer is calculated dynamically at the SRM factory. Seat height and crank length were adjusted to the measures used by the athletes on their own racing bikes. After a 6-min warm-up at 100 W, further increments of 25 and 30 W were added every 2 min until volitional exhaustion for women and men, respectively. Oxygen uptake ($\dot{V}\text{O}_2$), expiratory flow (\dot{V}_E), were collected and respiratory exchange ratio (RER) was calculated, using a telemetric system (Cosmed K4b², Rome, Italy). HR values were monitored using a Polar unit (RS800sd, Polar Electro Kempele, Finland). Expired gases and HR values were averaged every 10 s from the breath-by-breath raw values. $\dot{V}\text{O}_{2\text{max}}$ and MAP were defined as the average of the highest consecutive $\dot{V}\text{O}_2$ and power output values recorded during a 30-s period. $\dot{V}\text{O}_{2\text{max}}$ was determined according to criteria described by Howley et al. (1995)—that is, a plateau in $\dot{V}\text{O}_2$ despite an increase in power output, a RER value of 1.15, or a HR over 90% of the predicted maximal HR. Moreover, the first and the second ventilatory thresholds (VT1 and VT2, respectively) were determined according to criteria previously described by Beaver et al. (1986). The physiological characteristics of the subjects are presented in Table 1.

Maximal running test

The subjects completed an incremental continuous maximal test on a 400-m track to determinate their maximal running HR. The test began at 12 km h^{-1} and the speed was increased by 1 km h^{-1} every 3 min until volitional exhaustion. The test was considered maximal when the criteria previously described by Howley et al. (1995) were reached. HR values were monitored using a Polar unit at a sampling rate of 0.2 Hz (Team System, Polar Electro Kempele, Finland).

Triathlon race field testing

Race data were collected during the Beijing ITU World Cup (China, September 15 and 16, 2007). The circuit of the competition was exactly the same as that of the Olympic event in 2008 in Beijing (<http://www.triathlon.org/images/event/maps/beijingcoursemap.pdf>). The swimming phase of the test-event consisted of a single 1,500 m. Wetsuits

were not allowed due to the temperature of the water (23°C). The cycle phase consisted of six laps of 6.5-km laps (39.2 km), which included a hill (difference in altitude of 100 m per lap after 1.4 km with a 820 m hill at a 6% gradient). The running leg consisted of an out and back lap, comprising three times of 2.4 km hilly laps plus a final lap of 2.90 km (10.1 km, a change in altitude of 60 m per lap condensed in a 300 m hill at a 12% gradient).

Speed measurements

Swimming phase A video analysis system at 25 Hz (Sony HDR-CX12 AVHD) was synchronized with the official timing system (Omega, Swatch Group, Swiss). Three digital cameras were situated at the swim start, at 350 m, at 750 m and at the swim exit (1,507 m). The distances between these points were measured using a global positioning system, whose accuracy performance was of 2–3 m (GPS, Garmin GPSRAP 60CSx, Garmin Europe, UK). Thus, swimming speed (m s^{-1}) was recalculated via a subsequent video analysis (3D vision®, Biometrics, Orsay, France).

Cycling phase Before the event, each subject's own bicycle was equipped with a mobile power measurement device (Gardner et al. 2004). Cycling speed (km h^{-1}) was calculated for each lap with a SRM system (Professional SRM road version, SRM Training System, Schoberer Rad Messtechnik, Jülich, Germany). The system weight of 300 g is comparable to a conventional bicycle crank, and thereby does not influence performance. Because of a possible drift of the zero offset frequency, the device was systematically calibrated prior to the race. Data were collected at a sampling rate of 1 Hz.

Running phase Running velocity was continuously recorded using a s3 accelerometer (Polar RS800sd, Kempele, Finland). This is a very small commercial device (3.5 × 0.7 cm), light in weight (20 g) with a time-sampling mechanism that allows it to provide chronological measures of running speed. Its accuracy and reliability have recently been validated (Hausswirth et al. 2009). Three days before the race, the s3 sensor was calibrated, as recommended by the manufacturer, to integrate each runner's stride characteristics. Subjects had to follow a pace close to the speed they adopt in competition (i.e. 16 and 20 km h^{-1} for women and men, respectively) throughout 1 km. This speed was paced by a cyclist on a bike equipped with the SRM system previously described. Run data were subsequently pooled for flat, uphill and downhill sections (whose lengths were 1,760, 300 and 300 m, respectively, for lap1-3 and 2,290, 300 and 300 m for lap4). These data were recorded at the sampling rate of 1 Hz.

Ranking associated with isolated and overall performances

Position was determined at 350, 750 and 1,500 m for each triathlete of the race ($n = 157$; 70 women, 87 men) during the swim thanks to their personal race number written on their swim cap and using the video system previously described for a further analysis. For both cycling and running, isolated position linked with the performance achieved in each event (i.e. isolated swimming, cycling or running position) was recalculated using the official timing system. It provided split-times for swim-to-cycle and cycle-to-run transitions, cycling and running phases. To ensure the accuracy of these isolated rankings, we recalculated them using cameras located at the beginning and at the end of cycling and running sections. Triathletes who did not finish the race were not included during further analyses ($n = 30$; 11 women and 19 men). Thus, a total of 127 triathletes were taken into account.

Power output and cadence recording

The SRM system records power output, cadence and distance continuously and reliably. These values were collected at a sampling rate of 1 Hz.

To analyze the time spent at different power outputs during competition, the amounts of competition time (in percentage of cycling time) was distributed in five intensity zones: below 10% of MAP, above 10% of MAP and below power output at first ventilatory threshold, above P_{VT1} and below power output at second ventilatory threshold, above P_{VT2} and below 100% of MAP (<100% MAP) and above 100% of MAP (>100% MAP).

Heart rate recording

Subjects were equipped with a Polar unit (Team system, Kempele, Finland) to record HR throughout the swim, cycle and run phases of the triathlon. These data were recorded at a sampling rate of 0.2 Hz. After the race, they were transmitted from the registration unit to a personal computer for further processing. For further analyses, all data were expressed as a percentage of the HR_{max} values reached during laboratory testing.

Statistical analysis

Descriptive statistics [mean, standard deviation (SD)] for speed and % HR_{max} were calculated for swimming, cycling and running legs. The same method was employed for power output and cadence during the cycle phase. Those data were pooled considering the sections previously described. The effect of gender and change in altitude were analyzed using a two way repeated measures ANOVA

(gender \times time) using power output, speed, cadence and HR as dependent variables. A Tukey post hoc test was used to determine any differences between both populations or between the sections. Pearson's product moment correlation was used to determine the relationship between overall race position and isolated positions associated with the performance achieved during swimming, cycling and running phases. The same method was used to determine the relationship between the percentage of time spent above MAP in the hilly section of the cycling phase and the MAP/weight ratio. For all analyses, the level of significance was accepted at $P < 0.05$.

Results

Overall performance and position

The mean finish times of the triathletes studied were $125\text{ min }43 \pm 2\text{ min }07$ and $111\text{ min }05 \pm 1\text{ min }08$ for women and men, respectively ($P < 0.01$). The mean final rankings were 26 ± 16 and 30 ± 16 for women and men, respectively ($P > 0.05$). Compared to the whole population of the race (i.e. 75 women and 85 men), women finished in the top $35.7 \pm 18.0\%$ and men in the top $35.1 \pm 20.8\%$ ($P = 0.96$).

Swimming phase

A significant difference was observed between women and men for swimming speed and time (1.24 ± 0.03 vs. $1.38 \pm 0.05\text{ m s}^{-1}$ and $20\text{ min }09\text{ s} \pm 24\text{ s}$ vs. $18\text{ min }07\text{ s} \pm 40\text{ s}$, respectively, $P < 0.01$). Speeds over the first 350 m of the swim were faster than any other swim sections ($P < 0.05$). In addition, the position after 350 m strongly determined the position reached at the end of the swim both for females and males, when considering all competitors ($r = 0.97$ and 0.99 , $P < 0.01$, respectively). A weak correlation between the rank after the swimming section and the final position were observed for the whole population ($r = 0.47$ and 0.36 , $P < 0.01$, for women and men, respectively; Table 2).

Table 2 Correlation matrix between the ranking for each event considered individually and the final race position for overall triathletes of the race ($n = 59$ and $n = 68$ for women and men, respectively)

Gender	r_{Swim}	r_{Bike}	r_{Run}
Female	0.47*	0.68*	0.77*
Male	0.36*	0.52*	0.98*

* $P < 0.01$

No significant effect of gender was observed on HR values (92 ± 2 and $91 \pm 3\% \text{HR}_{\text{max}}$, $P > 0.05$, for women and men, respectively; Fig. 1).

Cycling phase

The 12 triathletes on whom we focused on, completed the cycle phase of the triathlon in $66 \text{ min } 31 \text{ s} \pm 1 \text{ min } 07 \text{ s}$ and in $59 \text{ min } 12 \text{ s} \pm 3 \text{ min } 09 \text{ s}$, at 35.4 ± 0.6 and $39.6 \pm 0.1 \text{ km h}^{-1}$ for women and men, respectively ($P < 0.01$). Women's mean power output was $181 \pm 22 \text{ W}$ ($3.16 \pm 0.39 \text{ W kg}^{-1}$) and men's was $265 \pm 27 \text{ W}$ ($3.96 \pm 0.22 \text{ W kg}^{-1}$) ($P < 0.01$). The speed (km h^{-1}) and mean power output at each point of the cycle stage are presented in Fig. 2.

No significant difference was observed between females and males concerning the % of MAP sustained during the bike section. Mean relative intensities were $61.4 \pm 7.5\%$ MAP and $63.4 \pm 6.5\%$ MAP for women and men, respectively ($P > 0.05$). No effect due to gender was observed when those data were expressed in time spent in the five zones of intensity determined from the laboratory incremental test (Fig. 3). The average distribution of time spent at different intensities is presented in Fig. 3.

A significant effect of gender appeared concerning the geographic distribution of time spent above MAP. Indeed, whereas women spent $44.8 \pm 4.1\%$ of total cycling time above MAP during hills, males only spent $31.9 \pm 4.4\%$ ($P < 0.05$). A significant inverse correlation was observed between the percentage of time spent above MAP in the

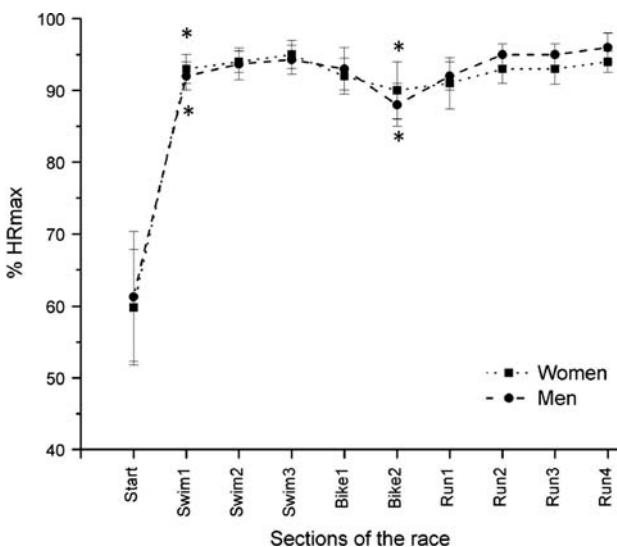


Fig. 1 Evolution of mean ($\pm \text{SD}$) HR (% HR_{max}) throughout the race for women and men. *Swim1* 0–350 m, *Swim2* 350–750 m, *Swim3* 750–1,500 m, *Bike1* 0–20 km, *Bike2* 20–40 km, *Run1* 0–2.4 km, *Run2* 2.4–4.8 km, *Run3* 4.8–7.2 km, *Run4* 7.2–10.1 km. No significant differences were observed between female and male triathletes ($P < 0.05$). *Significantly different from the previous value ($P < 0.05$)

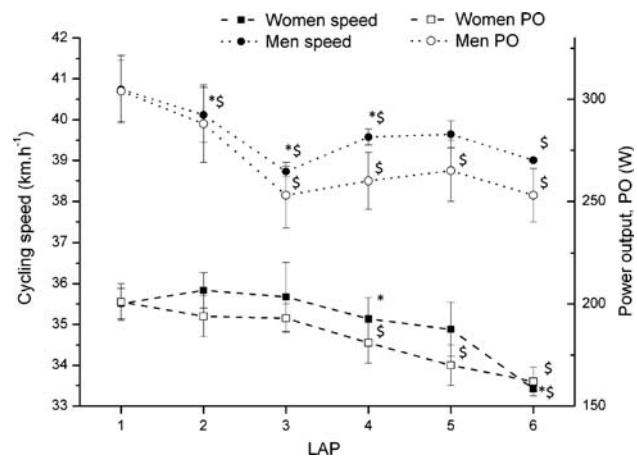


Fig. 2 Cycling speed (average $\pm \text{SD}$, km h^{-1}) and power output (average $\pm \text{SD}$, W) over each bike lap for females ($n = 6$), males ($n = 6$). *Significantly different from the previous lap ($P < 0.05$). \$Significantly different from LAP1 ($P < 0.05$)

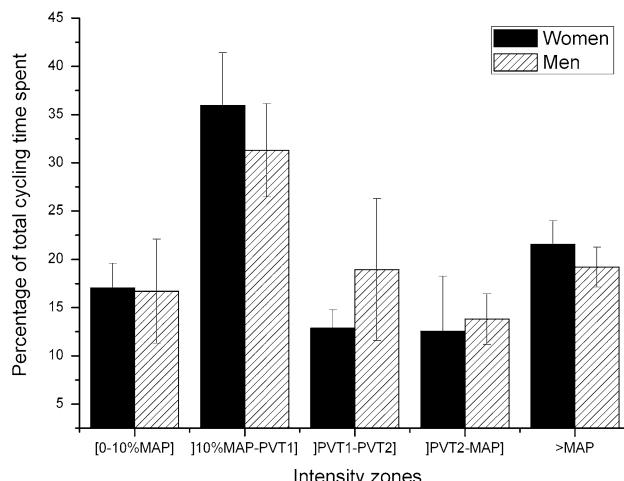


Fig. 3 Distribution of exercise time spent in intensity zones: below 10% of maximal aerobic power (zone 1), above 10% of maximal aerobic power and below power output at first ventilatory threshold ($<\text{P}_{\text{VT}1} = 64.9 \pm 3.9\% \text{MAP}$; zone 2), above $\text{P}_{\text{VT}1}$ and below power output at second ventilatory threshold ($<\text{P}_{\text{VT}2} = 82.3 \pm 3.3\% \text{MAP}$; zone 3), above $\text{P}_{\text{VT}2}$ and below 100% of maximal aerobic power ($<100\% \text{MAP}$; zone 4) and above 100% of maximal aerobic power ($>100\% \text{MAP}$; zone 5). No significant differences were observed ($P < 0.05$)

hills and the MAP/weight ratio ($r = -0.73$, $P < 0.05$, $n = 12$). This ratio was significantly better for men ($P < 0.05$).

Regarding pedaling cadence, significant lower mean values were observed in women ($88 \pm 4 \text{ rpm}$) compared to men ($95 \pm 4 \text{ rpm}$, $P < 0.05$). No significant time effect was observed in either gender ($P > 0.05$). On the contrary, we recorded a significant decrease in distance per pedaling cycle for both genders (-3.1 and -2.0% , $P < 0.05$ between lap1 and lap6 for women and men, respectively).

Besides, a significant correlation was observed between the final position and the isolated cycling position for both women and men ($r = 0.68$ and 0.52 , $P < 0.01$, respectively; Table 2). Moreover, a significant correlation between isolated swimming position and isolated cycling position both was observed for women ($r = 0.35$, $P < 0.01$) but not for men ($r = -0.22$, $P > 0.05$).

No significant difference between women and men was observed on HR values (91 ± 3 and $90 \pm 3\%$ HR_{max} , $P > 0.05$, for women and men; Fig. 1). On the contrary, HR values significantly decreased for both genders ($P < 0.05$).

Running phase

A significant difference between women and men for mean running speed and time (15.6 ± 0.5 vs. 18.4 ± 0.5 $km h^{-1}$ and $38 \text{ min } 35 \text{ s} \pm 1 \text{ min } 09 \text{ s}$ vs. $33 \text{ min } \pm 1 \text{ min } 09 \text{ s}$, $P < 0.01$) and during each lap was observed ($P < 0.01$). The speed ($km h^{-1}$) at each point of the running leg is presented in Fig. 4.

During the running phase during flat, downhill and uphill sections for men, the speed decreased significantly ($P < 0.05$; Fig. 4b).

Finally, a positive correlation between the final position and the isolated running ranking was found both for women and men ($r = 0.77$, $P < 0.05$ and $r = 0.98$, $P < 0.01$ for women and men, respectively; Table 2). The isolated running ranking was not correlated with swimming and bike isolated position both for women and men ($P > 0.05$).

No significant effect of time and gender was observed on HR values (93 ± 2 and $94 \pm 2\%$ HR_{max} , $P > 0.05$, for women and men; Fig. 1).

Discussion

The purpose of this study was to compare the pacing strategies adopted by women and men during a World Cup ITU triathlon. In this context, the distribution of workload in the three events has been quantified for both genders. This study illustrated how gender affects overall performance, evolution of speed, power in cycling and metabolic responses associated with performance during an elite short distance triathlon. The main findings of this study were (1) that both female and male elite triathletes adopted similar pacing strategies by starting fast before decreasing their pace whatever the different phases; (2) the decrease in pace during the cycling phase was more pronounced in men than in women; (3) during both cycling and running phases, women were more affected than men by changes in slope;

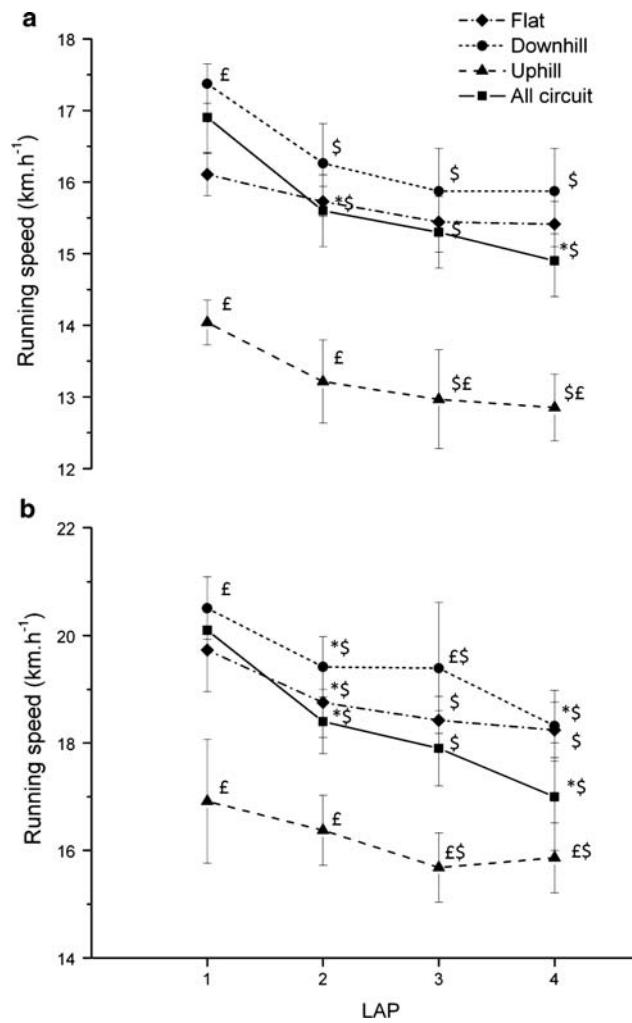


Fig. 4 Mean (\pm SD) running speed ($km h^{-1}$) during the triathlon for women ($n = 6$; **a**) and men ($n = 6$; **b**) on flat, downhill, uphill sections and the all circuit. *Significantly different from the previous lap ($P < 0.05$). \$Significantly different from LAP1 ($P < 0.05$). £Significantly different from flat speed ($P < 0.05$)

(4) no effect of gender was observed on the relative intensities reached during the overall phases.

Similarities between elite female and male triathletes

The first similarity of the population studied concerned the race ranking/whole triathletes ratio. Then, the global level of the relative performance of the triathletes studied was quite similar for both women and men and all data collected were therefore comparable.

The present swim data revealed that both women and men adopted a similar “positive pacing strategy”, whereby after peak swimming speed was reached, triathletes progressively slowed (Abbiss and Laursen 2008). The velocity was significantly higher for both genders between the start pontoon and the first timing point localized at 350 m than

during the last 1,150 m of the swimming phase ($P < 0.01$). The performance of triathletes during the initial part of the swimming phase appeared to be decisive for the ranking observed at the exit of water for women and men ($r = 0.97$ and 0.99 , respectively; $P < 0.01$). These results extended to previous observations about elite female triathletes (Vleck et al. 2008), which showed that the first 400–500 m of the swim stage appeared to be critical for the development of the swimming section as a whole during a men's ITU WC race. Though, research findings published on pacing strategies showed that “positive pacing” might be detrimental for performance during events lasting more than 2 min (Abbiss and Laursen 2008; Foster et al. 1994). By reaching the first places of the pack, triathletes avoided congestion at the first turn-around buoy where weaker swimmers in the rear part of the group were disadvantaged. Thus, even if female and male triathletes swim 1,500 m during ITU WC triathlons, they would take advantage to improve their ability to swim fast on shorter distances. As demonstrated by Thompson et al. (2003), adopting a positive pacing elicits a high anaerobic demand, a capacity to increase the fast component of $\dot{V}O_2$ and an ability to reach higher stroke rates.

Heart rate values revealed also a similarity between both genders, as female and male triathletes performed at 92 ± 2 and $91 \pm 3\%$ HR_{\max} , respectively ($P > 0.05$; Fig. 1). It confirmed the highly intense character of elite short distance triathlon races (i.e. Olympic distance), already described for recreational triathletes by Delextrat et al. (2003). To reduce this metabolic workload, both genders should principally optimize their sheltered position to reduce passive drag (Chatard and Wilson 2003). According to Chatard and Wilson (2003), elite triathletes should strategically adopt a position inside the peloton instead of on the side of it.

This study revealed the minor impact of swimming performance on overall race position both for women and men (Table 2). A weak but significant correlation was found between the positions at the water exit and at the arrival for both genders ($r = 0.47$ and 0.36 , $P < 0.05$, for women and men, respectively; Table 2). These findings confirmed previous results (Vleck et al. 2008) which reported similar correlations during the 2002 Lausanne ITU WC ($r = 0.47$ and 0.39 , $P < 0.01$, for women and men, respectively). Vleck et al. (2006) hypothesized that the weaker swimmers, who constituted the cycling chasing packs, have to ride harder over the first 20-km to “catch up with” the leading triathletes, which led to weaker overall performance. In this perspective, the more the swimming phase creates cycling packs, the more its own ranking would influence the final ranking.

The similarity between women and men elite triathletes pacing strategy during the cycling phase only concerned

the global positive split strategy adopted during this section (Fig. 2). Both genders decreased significantly cycling speeds between the initial part and the final part of the cycling phase (-5.6 and -4.6% between lap1 and lap6, $P < 0.05$, for women and men, respectively). The power output decreased significantly during the same period by 19.4 and 16.8% , for women and men, respectively ($P < 0.05$). Similarly to Vleck et al. study (2008) focusing on the Lausanne 2002 ITU WC, we hypothesized that this could be explained by the fact that the number of packs was stabilized before the cycle-to-run transition, contrary to the post-swim phase (i.e. no change in packs composition was observed for both genders after lap-3). Thus, athletes' organization within the pack allowed them to strongly reduce the workload delivered associated with a slight decrease in cycling speed. The first experimental studies using constant cycling power output exercise have suggested that performance could be improved when athletes are able to run as fast as possible immediately after the cycling leg (Hausswirth et al. 2001). During a variable cycling protocol, Suriano et al. (2007) have observed that decreasing power during the last 5 min of the ride leads to an increase in running performance. Furthermore, when athletes try to increase power output at the end of the cycling part to come into the transition area in the best position, a significant decrease in running time was observed (Bernard et al. 2007). During the race, no cadence variation was observed for either gender with a mean value (88 ± 4 and 95 ± 4 rpm for women and men, respectively) higher than those previously reported in professional road cyclists during flat and hilly rides (75 ± 4 and 75 ± 4 rpm, respectively) in females (Ebert et al. 2005) and (87 ± 14 and 81 ± 15 rpm, respectively) in males (Vogt et al. 2007). In this context, the steady-state of pedaling cadence was related to a progressive decrease in distance per pedaling cycle (-3.1 and -2.0% , $P < 0.05$ between lap1 and lap6 for women and men, respectively) and power output (-19.4 and -16.8% , $P < 0.05$; Table 2) within laps. This indicates that the reduction in power was primarily due to a reduction in force or torque and that the athletes simply chose appropriate gearing to maintain their preferred cadence whatever the gender. In addition HR values decreased for both gender between the first and the second half part of the cycling phase (-3.0 and -6.0% , $P < 0.05$, for women and men, respectively; Fig. 1); this result suggests that this strategy reduced also the metabolic workload. Therefore, we could suggest that in this competition context of Olympic distance triathlon both female and male choose a strategy to reduce fatigue at the end of the cycling part in order to maximize the subsequent running performance.

A strong likeness between women and men in the global distribution of the time spent in the five zones of intensity

was observed. This resemblance suggested that women do not try more than men to save energy during the cycle leg for the subsequent run. This finding questions the results of Vleck et al. (2008) who suggested that females did not particularly tend to “bridge gaps” in the cycling section during the Lausanne 2002 ITU WC. The authors described a decrease in cycling speeds for all female bike packs. In contrast males at the rear packs tended to push the pace in order to “catch up to” the leading athletes. According to these authors (Vleck et al. 2008), anecdotal evidence (personal communications) suggested that this pacing is characteristic of elite females but they could not know whether it is deliberate or reflects fatigue. In addition, we observed no significant difference between women and men for the time spent in zone 1 (above 10% MAP). This result reveals that both genders tended to optimize similarly the periods of time when they could coast down in freewheel within the peloton. The global distribution of the time spent in the five zones of intensity was also comparable with previous studies focusing on professional cycling competitions of 3–4-h duration for both genders. Ebert et al. (2005) demonstrated that female elite cyclists spent 52% (zone 1 + zone 2), 22% (zone 3), 13% (zone 4) and 13% (zone 5) of 3-h hilly world cup cycling races into the intensity zones assessed previously during laboratory testing. Similarly, the present data are comparable with a study of Vogt et al. (2006) concerning a 6-stage race of 215-min mean time performed by male professional cyclists. The distribution of time in the different intensities was 58% for zone 1, 14% for zone 2 and 28% at intensities higher than an increase in 1 mM above the lactate threshold (zone 3). Thus, the variability of the power output during a world cup event triathlon seems to be comparable to professional cycling events, even if the duration of the cycling leg was shorter in the present study (i.e. 66 min 31 s \pm 1 min 07 and 59 min 12 \pm 3 min 09, for women and men, respectively) than in the studies previously mentioned. This similarity was confirmed by HR values, as female and male triathletes performed at 91 ± 3 and $90 \pm 3\%$ HR_{max}, respectively ($P > 0.05$; Fig. 1). Strategically, in order to reduce the high metabolic workload, triathletes would have to take benefit in drafting during cycling by maintaining a continuous sheltered position (Hausswirth et al. 2001).

Concerning the running phase, the pacing strategy adopted was the same, regardless of gender (Fig. 4). With no exception ($n = 127$), the first lap (and more precisely the first 1,500 m) was run significantly faster for all triathletes of both genders. Nevertheless, no concomitant decrease in HR values for both women and men throughout the running leg was observed ($P > 0.05$; Fig. 1), whereas running speed decreased significantly for both genders during the same period ($P < 0.05$; Fig. 4). These opposite

evolutions revealed a decrease of running efficiency for both genders. The benefit of this positive pacing strategy (i.e. positive split) systematically adopted by elite triathletes still remains unclear (Hausswirth and Brisswalter 2008; Vleck et al. 2006, 2008). It appears to be highly questionable to push the pace at the start of the post-cycling phase when blood flow is still not well redistributed according to running particular demands (Hausswirth et al. 2004; Kreider et al. 1988). Hausswirth et al. (2004) demonstrated that in well-trained triathletes the best running strategy following cycling was to perform the first kilometer 5% slower than the average speed of an isolated 10-km run (212.9 vs. 202.8 s, respectively) to achieve the best performance (2,000 vs. 2,028 s). The increase in running speed over the first kilometer was linked significantly to a poorer performance in the 10-km run (2,178 s). As each triathlete of the present study adopted the same positive strategy (i.e. their speed decreases throughout the running phase), pacing might be the main factor to improve running performance in ITU WC events whatever the gender, and is not yet optimized by triathletes.

Running performances were significantly correlated with the overall finishing position for both female and male triathletes ($r = 0.77$ and 0.98 , $P < 0.01$, respectively; Table 2). This result is even more relevant for men whose mean running speeds nearly determined their finishing position. Similarly, Vleck et al. (2008) have reported that the running speed was highly correlated with overall race results during the Lausanne 2002 ITU WC ($r = -0.71$, $P < 0.001$ and $r = -0.94$, $P < 0.01$ for women and men, respectively). This gender effect seemed to be due to the running start in pack observed during the race by the men in the present study. As swimming and cycling phases did not discriminate between male triathletes, their final ranking was determined by their running performance. For women, even if running speed determined strongly their final ranking, the latter mostly influenced the final ranking within each cycling pack.

Differences between elite female and male triathletes

Contrary to swimming and running phases, cycling results revealed that women and men adopted different pacing strategies during the initial part of the cycling phase. Men pushed the pace (i.e. cycling speed) over the first lap before decreasing it over the subsequent laps ($P < 0.05$; Fig. 2). On the contrary, women had no significant variation in cycling speed until the last lap which was ridden more slowly ($P < 0.05$). These results were confirmed by mechanical workload values with a decreased of 16.8% in power output for men between lap1 to lap3 ($P < 0.05$), whereas no significant decrease was recorded during the same period for women ($P = 0.60$; Fig. 2).

The distribution of time in the different intensities during the two-first laps (results not presented) revealed that men spent significantly more time than women in zone 3 (+7%, $P < 0.05$) and less time in zone 2 (−8%, $P < 0.05$). No significant effect of gender was found for the distribution of time spent in zones 1, 4 and 5 ($P > 0.05$). Therefore, men cycled at a higher relative intensity than women over the initial part of the cycling section by reducing the time of light intensity.

An effect of gender on cycle workload concerning the distribution of high power output bursts (zone 5; refer to cycling phase results part) was observed. Although no effect of gender on the relative time spent in zone 5 was noticed (>MAP; Fig. 3), a significant effect of circuit design on the distribution of power output above MAP was observed. Men reached zone 5 during technical bike sections (i.e. changes in direction) to stay in their pack, while women spent more time above their MAP in the hilly sections. The present results confirmed the previous report (Vleck et al. 2008) that noticed that the critical point at which the fragmentation of the bike field occurred was over a 10–15% gradient hill during the female Lausanne 2002 ITU WC. The significant reverse correlation between the relative time spent above MAP in hills and the MAP/weight ratio ($r = -0.73$, $P < 0.05$) corroborates the previous suggestion. Given the significant difference between females and males about this ratio ($P < 0.05$), this conclusion has clear training implications. Women should focus more on their aptitude for “climbing” in improving their cycling skills or their MAP/weight ratio (Davison et al. 2000). Men would take advantage to improve their aptitude for accelerating in bettering their Maximal Anaerobic Power/weight ratio and their ability to reproduce short sprints with incomplete recovery. Then, athletes could reduce the specific fatigue effects generated by hills and changes in direction or, on the contrary, push the pace in those sections. Nevertheless, these conclusions remain limited to hilly circuits presenting technical sections like the present one and previous Olympic circuits (i.e. 2000 Sydney and 2004 Athens Olympic races).

Men adopted a higher mean cycling cadence than women during the race (95 ± 4 vs. 88 ± 4 rpm, respectively, $P < 0.05$). To the best of our knowledge, this study is the first to compare the effect of gender on the freely chosen cycling cadence during an international competition. Only Vandewalle et al. (1987) previously described higher cycling cadence for men during force–velocity tests performed on cycle ergometer compared with women (difference ranging from 4.7 to 8.0% according to the population studied). We speculate that this effect of gender could be partly due to difference in cycling skills and maximal aerobic capacity. Indeed, Marsh and Martin (1997) showed that less-trained

cyclists may select lower pedalling cadence to reduce aerobic demand. In the present study, we observed that women had weaker maximal aerobic capacity than men (60.9 ± 7.0 vs. 71.7 ± 5.4 $\text{mlO}_2 \text{ min}^{-1} \text{ kg}^{-1}$, $P < 0.01$) and that their mean cycling training volume was smaller than men (215 ± 32 vs. 298 ± 45 km week^{-1} , for women and men, respectively, $P < 0.01$). In addition, we observed that women spent relatively more time over the hilly sections compared with men ($20.8 \pm 1.5\%$ of total cycling time vs. $15.3 \pm 4.9\%$ of total cycling time, for women and men, respectively, $P < 0.05$). As lower cadences were spontaneously adopted over the hills, we think that the weaker MAP/weight ratio of women can also explain why they adopted lower mean cycling cadence compared to men.

The present findings revealed a greater prevalence of isolated cycling performance on overall ranking for women ($r = 0.68$ and 0.52 , $p < 0.01$ for women and men, respectively; Table 2). In our view, the gender effect was mainly due to the number of cycle packs, which ended the bike leg. Whereas the 50 first triathletes of both genders were grouped into three packs at swim exit, only male packs number 2 and 3 managed to join quickly the first bike pack. On the one hand, men’s cycling results were very homogeneous and a massive pack reached the running start at the same time (55 of the 67 finishers). In addition, as packs 2 and 3 joined the leading pack only after two laps during the male race, no residual effects of pushing the pace over the initial part of the cycling phase seemed to be prevalent during the running phase. On the other hand, a 2 min 20 s gap spaced the 27 first women from the chasing groups (including 30 women). Thus, women’s final rankings were strongly determined by cycling speed, as the advance gained by the leading group was high enough to prevent the return of the following triathletes. These findings are in accordance with Vleck et al. (2008) who supposed that the smaller field size and the lower field density of women favor the preservation of the packs during the cycling phase of ITU WC races. Therefore, elite females with better swimming and cycling abilities than the rest of the field may incur a relatively greater competitive edge at the run start than elite males.

Running results indicated the effect of gender concerning the effect of different slopes on the decrease in running speed (Fig. 4). Women decreased their speed throughout the run only over decline and incline sections, whereas men did the same in all parts of the circuit. Moreover, all triathletes tended to have less and less benefit of the downhill sections during the running leg (−12% grade, Fig. 4). Except for the first lap, the speed downhill was not significantly different from the speed adopted over the flat sections for both women and men. Like cross-country runners, both female and male triathletes’ training should

include changes in topography to improve their ability for adjusting their stride rate and length despite fatigue.

In conclusion, the present study demonstrated that elite female and male triathletes adopted similar positive pacing strategies during swimming, cycling and running phases. However, men pushed the pace on the bike during the post-swim phase and reached high power output bursts (>MAP) over “technical bike sections”. The decrease in speed was less pronounced during the cycling phase and they seemed to suffer more from changes in slope during both cycling and running sections. Further investigations are needed to determine whether these conclusions were influenced by race dynamics and if they can be extended to other race conditions (i.e. circuit design, start list size and density, meteorological conditions).

Acknowledgments This study was supported by technical supports to the French National Institute of Sport and Physical Education, the French Federation of Triathlon and the University of South Toulon-Var. The authors are especially grateful to the athletes and coaches for their help and cooperation. They also gratefully acknowledge the Swiss National Team of Triathlon for their help in the collection of data, and Patricia Vandewalle and Jessica Harrison for their help in the correction of this manuscript.

References

- Abbiss CR, Laursen PB (2008) Describing and understanding pacing strategies during athletic competition. *Sports Med* 38:239–252
- Atkinson G, Edwards B (1998) Pacing strategy and cycling performance: field data from the 1997 British 16 km time-trial championship (abstract). In: Sargeant AJ, Siddons H (eds) Proceedings of the third annual congress of the European college of sports science. Centre for Health Care Development, Liverpool, p 211
- Beaver WL, Wasserman K, Whipp BJ (1986) A new method for detecting anaerobic threshold by gas exchange. *J Appl Physiol* 60:2020–2027
- Bernard T, Vercruyssen F, Mazure C, Gorce P, Hausswirth C, Brisswalter J (2007) Constant versus variable-intensity during cycling: effects on subsequent running performance. *Eur J Appl Physiol* 99:103–111
- Chatard JC, Wilson B (2003) Drafting distance in swimming. *Med Sci Sports Exerc* 35:1176–1181
- Davison RC, Swain D, Coleman D, Bird S (2000) Correlates of simulated hill climb cycling performance. *J Sports Sci* 18:105–110
- Delestrat A, Tricot V, Bernard T, Vercruyssen F, Hausswirth C, Brisswalter J (2003) Drafting during swimming improves efficiency during subsequent cycling. *Med Sci Sports Exerc* 35:1612–1619
- Ebert TR, Martin DT, McDonald W, Victor J, Plummer J, Withers RT (2005) Power output during women's World Cup road cycle racing. *Eur J Appl Physiol* 95:529–536
- Foster C, Schrager M, Snyder AC, Thompson NN (1994) Pacing strategy and athletic performance. *Sports Med* 17:77–85
- Foster C, deKoning JJ, Hettinga F, Lampen J, Dodge C, Bobbitt M, Porcari JP (2004) Effect of competitive distance on energy expenditure during simulated competition. *Int J Sports Med* 25:198–204
- Gardner AS, Stephens S, Martin DT, Lawton E, Lee H, Jenkins D (2004) Accuracy of SRM and power tap power monitoring systems for bicycling. *Med Sci Sports Exerc* 36:1252–1258
- Garland SW (2005) An analysis of the pacing strategy adopted by elite competitors in 2000 m rowing. *Br J Sports Med* 39:39–42
- Hausswirth C, Bigard AX, Berthelot M, Thomaïdis M, Guezennec CY (1996) Variability in energy cost of running at the end of a triathlon and a marathon. *Int J Sports Med* 17:572–579
- Hausswirth C, Bigard AX, Guezennec CY (1997) Relationships between running mechanics and energy cost of running at the end of a triathlon and a marathon. *Int J Sports Med* 18:330–339
- Hausswirth C, Lehénaff D, Dréano P, Savonen K (1999) Effects of cycling alone or in a sheltered position on subsequent running performance during a triathlon. *Med Sci Sports Exerc* 31:599–604
- Hausswirth C, Vallier JM, Lehenaff D, Brisswalter J, Smith D, Millet G, Dreano P (2001) Effect of two drafting modalities in cycling on running performance. *Med Sci Sports Exerc* 33:485–492
- Hausswirth C, Bernard T, Vallier JM, Vercruyssen F, Brisswalter J (2004) Effect of different running strategies on running performance in Olympic distance triathlon. In: Proceedings of the 7th annual congress of the ECSS, Athens, 24–28 July 2002, p 183
- Hausswirth C, Le Meur Y, Couturier A, Bernard T, Brisswalter J (2009) Accuracy and repeatability of the Polar® RS800sd to evaluate stride rate and running speed. *Int J Sports Med.* doi: 10.1055/s-0028-1105936
- Howley ET, Bassett DR Jr, Welch HG (1995) Criteria for maximal oxygen uptake: review and commentary. *Med Sci Sports Exerc* 27:1291–1301
- Kreider RB, Boone T, Thompson WR, Burkes S, Cortes CW (1988) Cardiovascular and thermal responses of triathlon performance. *Med Sci Sports Exerc* 20:385–390
- Lavoie JM, Montpetit RR (1986) Applied physiology in swimming. *Sports Med* 3:165–189
- Marsh AP, Martin PE (1997) Effect of cycling experience, aerobic power, and power output on preferred and most economical cycling cadences. *Med Sci Sports Exerc* 29:1225–1232
- Robinson S, Robinson DL, Mountjoy RJ, Bullard RW (1958) Influence of fatigue on the efficiency of men during exhausting runs. *J Appl Physiol* 12:197–201
- Suriano R, Vercruyssen F, Bishop D, Brisswalter J (2007) Variable power output during cycling improves subsequent treadmill run time to exhaustion. *J Sci Med Sport* 10:244–251
- Thompson KG, Haljand R, MacLaren DP (2000) An analysis of selected kinematic variables in national and elite male and female 100-m and 200-m. *J Sports Sci* 18:421–431
- Thompson KG, MacLaren DP, Lees A, Atkinson G (2003) The effect of even, positive and negative pacing on metabolic, kinematic and temporal variables during breaststroke swimming. *Eur J Appl Physiol* 88:438–443
- Tucker R, Marle T, Lambert EV, Noakes TD (2006) The rate of heat storage mediates the anticipatory reduction in exercise work rate during cycling in the heat at a fixed perceived exertion. *J Physiol* 574:905–915
- Vandewalle H, Peres G, Heller J, Panel J, Monod H (1987) Force-velocity relationship and maximal power on a cycle ergometer. Correlation with the height of a vertical jump. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol* 56:650–656
- Vercruyssen F, Suriano R, Bishop D, Hausswirth C, Brisswalter J (2005) Cadence selection affects metabolic responses during cycling and subsequent running time to fatigue. *Br J Sports Med* 39:267–272
- Vleck VE, Bürgi A, Bentley DJ (2006) The consequences of swim, cycle, and run performance on overall result in elite Olympic distance triathlon. *Int J Sports Med* 27:43–48

- Vleck VE, Bentley DJ, Millet GP, Bürgi A (2008) Pacing during an elite Olympic distance triathlon: comparison between male and female competitors. *J Sci Med Sport* 11:424–432
- Vogt S, Heinrich L, Schumacher YO, Blum A, Roecker K, Dickhuth HH, Schmid A (2006) Power output during stage racing in professional road cycling. *Med Sci Sports Exerc* 38:147–151
- Vogt S, Schumacher YO, Roecker K, Dickhuth HH, Schoberer U, Schmid A, Heinrich L (2007) Power output during the Tour de France. *Int J Sports Med* 28:756–761

Pacing strategy during the initial phase of the run in triathlon: influence on overall performance

Christophe Hausswirth · Yann Le Meur ·
Francois Bieuzen · Jeanick Brisswalter ·
Thierry Bernard

Accepted: 3 December 2009 / Published online: 19 December 2009
© Springer-Verlag 2009

Abstract The aim of the present study was to determine the best pacing strategy to adopt during the initial phase of a short distance triathlon run for highly trained triathletes. Ten highly trained male triathletes completed an incremental running test to determine maximal oxygen uptake, a 10-km control run at free pace and three individual time-trial triathlons (1.5-km swimming, 40-km cycling, 10-km running) in a randomised order. Swimming and cycling speeds were imposed as identical to the first triathlon performed and the first run kilometre was done alternatively 5% faster (Tri-Run_{+5%}), 5% slower (Tri-Run_{-5%}) and 10% slower (Tri-Run_{-10%}) than the control run (C-Run). The subjects were instructed to finish the 9 remaining kilometres as quickly as possible at a free self-pace. Tri-Run_{-5%} resulted in a significantly faster overall 10-km performance than Tri-Run_{+5%} and Tri-Run_{-10%} ($p < 0.05$) but no significant difference was observed with C-Run ($p > 0.05$)

($2,028 \pm 78$ s vs. $2,000 \pm 72$ s, $2,178 \pm 121$ s and $2,087 \pm 88$ s, for Tri-Run_{-5%}, C-Run, Tri-Run_{+5%} and Tri-Run_{-10%}, respectively). Tri-Run_{+5%} strategy elicited higher values for oxygen uptake, ventilation, heart rate and blood lactate at the end of the first kilometre than the three other conditions. After 5 and 9.5 km, these values were higher for Tri-Run_{-5%} ($p < 0.05$). The present results showed that the running speed achieved during the cycle-to-run transition is crucial for the improvement of the running phase as a whole. Triathletes would benefit to automate a pace 5% slower than their 10-km control running speed as both 5% faster and 10% slower running speeds over the first kilometre involved weaker overall performances.

Keywords Triathletes · Pace · Running speed · Long duration exercise · Fatigue · Central governor model · Previous experience

Communicated by Klaas Westerterp.

C. Hausswirth (✉) · Y. Le Meur · F. Bieuzen
Laboratory of Biomechanics and Physiology,
Research Department, National Institute of Sport,
Expertise and Performance (INSEP),
11 Avenue du Tremblay, 75012 Paris, France
e-mail: christophe.hausswirth@insep.fr;
christophe.hausswirth@wanadoo.fr

Y. Le Meur · J. Brisswalter
Laboratory of Physiological Adaptations, Motor Performance
and Health (EA 3837), Faculty of Sport Sciences,
University of Nice-Sophia Antipolis, BP 32 59,
06205 Nice Cedex 03, France

T. Bernard
Sport Ergonomics and Performance Laboratory,
HANDIBIO EA 3162, University of Sud Toulon-Var,
BP 132, 83957 La Garde Cedex, France

Introduction

The Olympic distance triathlon (i.e. short distance triathlon) is a unique effort, which involves successively 1,500-m swimming, 40-km cycling and 10-km running. The ability to link the three triathlon disciplines in an optimal manner has been described as an important determinant of success (Bentley et al. 2002; Hausswirth and Brisswalter 2008). This observation is even more relevant for the cycle-to-run transition as all the recent studies conducted during ITU World Cup triathlon competitions (i.e. short distance triathlon) have reported high correlation between finish position and running performance for both genders (coefficients of correlation ranging from 0.71 to 0.99, $p < 0.01$) (Vleck et al. 2006, 2008; Le Meur et al. 2009). These coefficients of correlation were significantly lower

considering overall ranking and both swimming performance (from 0.36 to 0.52, $p < 0.01$) and cycling performance (from “no significant correlation” to 0.74, $p < 0.05$) (Vleck et al. 2006, 2008; Le Meur et al. 2009).

In this context, several studies have focused on strategies for improving the performance during the triathlon run. These studies have identified drafting position (Hausswirth et al. 1999), variability in cycling power output production (Bernard et al. 2007), cycling cadence selection (Gotschall and Palmer 2002; Vercruyssen et al. 2005) and previous locomotion mode (Hausswirth et al. 1996, 1997) as the main determining factors of performance. On the other hand, less attention has been given to identify the best pacing strategy to adopt over the running leg. Only Kreider et al. (1988) showed that a progressive increase in running pace during the onset of the triathlon run allows the attainment of a ventilatory, cardiovascular, and neuromuscular steady-state. Recent studies have reported that triathletes tended to adopt a positive pacing during the run phase of ITU World Cup races, whereby after that a peak speed was reached, triathletes progressively slowed down (Vleck et al. 2006, 2008; Le Meur et al. 2009). During 2001 and 2002 Lausanne World Cup, most athletes ran faster over the first kilometre than most other run sections (Vleck et al. 2006, 2008), while residual effects of prior cycling are the highest and despite the recommendations of the current literature to adopt an even pacing strategy (i.e. constant pace) for physical events of such duration (for a review, see Abbiss and Laursen 2008). Similarly, Le Meur et al. (2009) showed that all of the 136 triathletes competing in the 2007 Beijing ITU WC event adopted a “positive pacing strategy” (whereby speed gradually declined, Abbiss and Laursen 2008) through the running phase. During this race, the first of the four laps was run 10.0% faster than the three remaining laps.

Accordingly, we hypothesised that a positive pacing during the running phase of a short distance triathlon is the best strategy to achieve the best overall performance for highly trained triathletes. The aim of the present investigation was to compare the effectiveness of three different pacing strategies during the initial phase of a 10-km triathlon run, while respecting normal triathlon conditions. As the transition from cycling to running represents the most critical and strategic phase affecting finish position, we investigated the effects of the pace adopted over the first run kilometre on the overall triathlon performance.

Materials and methods

Participants

Ten well-motivated male triathletes currently competing at a national level and selected on the basis of their

performance time over the short distance triathlon (2h 2 min \pm 7 min) volunteered to take part in this experiment. They had trained regularly and competed in triathlons for at least 4 years. Their characteristics are presented in Table 1. The triathletes were fully informed of the content of the experiment, and written consent was obtained before any testing, according to local ethical committee guidelines (Saint Germain en Laye, France). To familiarise the triathletes with the cycling and running circuits used in the experiment, a training camp was programmed 10 days before with a light training programme. During the entire experimental procedure, the subjects did not perform any exhausting exercise in the 48 h preceding each test.

Maximal running test

Prior to the experiment, each subject underwent a running test to determine maximal oxygen uptake ($\dot{V}O_{2\max}$) and ventilatory thresholds (VT1, VT2) on a track where the increment of speed was fixed at 1 km h⁻¹ each 3 min. Oxygen uptake ($\dot{V}O_2$) and expiratory flow (\dot{V}_E) were recorded breath by breath with a telemetric gas exchange measurement system (Cosmed K4b², Rome, Italy). Heart rate values (HR) were monitored every second using a Polar unit (RS800sd, Polar Electro, Kempele, Finland). Expired gases and HR values were subsequently averaged every 5 s. $\dot{V}O_{2\max}$ was determined according to criteria described by Howley et al. (1995)—that is, a plateau in $\dot{V}O_2$ despite an increase in running speed, a respiratory exchange ratio value of 1.15, or a Heart rate (HR) over 90% of the predicted maximal HR. $\dot{V}O_{2\max}$ was then determined as the highest value of $\dot{V}O_2$ achieved during a period of 30 s. The first and the second ventilatory thresholds (VT1 and VT2, respectively) were determined according to criteria previously described by Beaver et al. (1986). VT1 was determined as the first breakpoint where

Table 1 Characteristics of the subjects participating in the present study ($n = 10$)

Age (years)	24 \pm 3
Height (cm)	178 \pm 5
Weight (kg)	68.2 \pm 6.7
Swimming training (km week ⁻¹)	12.5 \pm 1.9
Cycling training (km week ⁻¹)	220 \pm 42
Running training (km week ⁻¹)	65 \pm 12
Running $\dot{V}O_{2\max}$ (mL min ⁻¹ kg ⁻¹)	69.1 \pm 7.1
Running $\dot{V}_{E\max}$ (L min ⁻¹)	184 \pm 21
Running HR _{max} (beats min ⁻¹)	194 \pm 7

Values are expressed as mean \pm SD

$\dot{V}O_{2\max}$ maximal oxygen uptake; $\dot{V}_{E\max}$ maximal minute ventilation; HR_{max} maximal heart rate

we detected a systematic increase in $\dot{V}_E/\dot{V}O_2$ without a concomitant increase in $\dot{V}_E/\dot{V}CO_2$. VT2 was associated with the first breakpoint detected where $\dot{V}_E/\dot{V}CO_2$ started to increase concomitantly with $\dot{V}_E/\dot{V}CO_2$.

Control run

The first test was a 10-km run performed on a 340-m indoor running track (control run, C-Run). Pacing strategy was left free and the only instruction given to the triathletes was to run as fast as possible over the 10-km. No feedback was given about running speeds or split times. Subjects were informed of each kilometre completed. They had the possibility to drink 250 mL of water at the end of the 3rd, the 6th and the 9th kilometre.

The three triathlon sessions

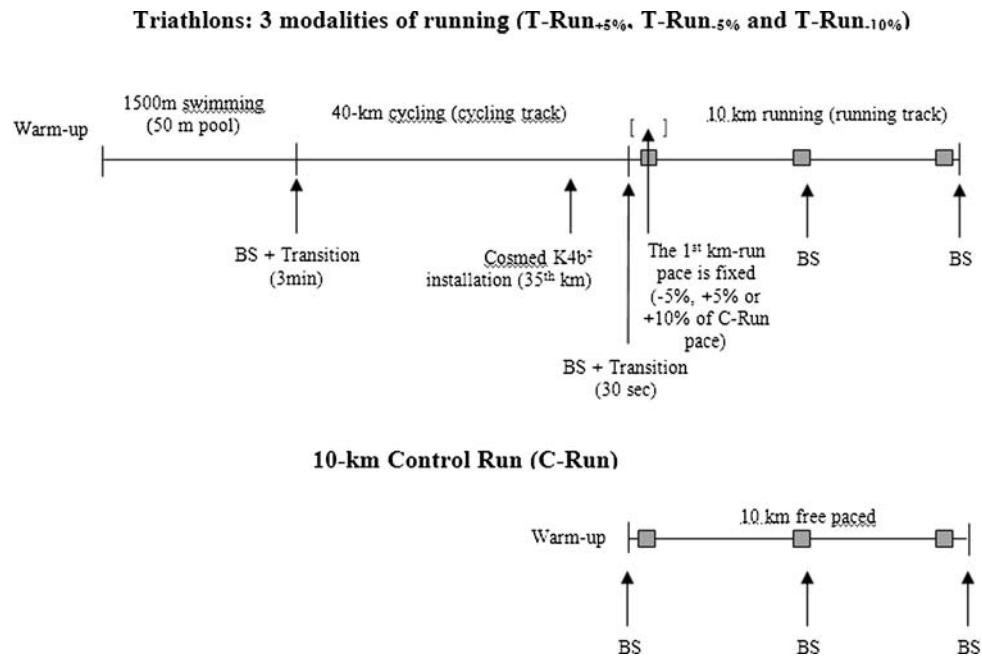
All experiments (Fig. 1) were carried out in Paris, specifically at the French National Institute of Sport, Expertise and Performance (INSEP) from January to March. The study was conducted on indoor cycling and running tracks. Inside air temperatures ranged from 18 to 20°C. The three experimental triathlons were performed alone (i.e. time-trial triathlons) in a randomised order over the short distance (1.5-km swim, 40-km bike, 10-km run) with a 10-day recovery between them, where training load was minutely controlled. Heart rate at ventilatory thresholds (VT1, VT2) identified during the maximal running test were used to demarcate three intensity zones (Esteve-Lanao et al. 2007). These included zone 1, low-intensity exercise performed below VT1; zone 2, moderately high-intensity exercise in

an intensity range between VT1 and VT2; and zone 3, high-intensity aerobic exercise performed above VT2. In the month prior to the first experimental trial, training durations and distributions of time spent in the three intensity zones were continuously monitored (15 ± 3 h week $^{-1}$ and 79, 10, 12%, respectively). The mean training load was similar to previous data reported in the literature for trained triathletes (Hausswirth et al. 1997), high-level runners (Esteve-Lanao 2007), elite rowers (Fiskestrand and Seiler 2004) and cross-country skiers (Seiler and Kjerland 2006). Throughout the entire experiment, all subjects were coached by the same person. Training load was controlled to be similar in the duration between each test and similar to the participants usual training pattern. Triathletes were restricted to train in zone 1 during each couple of days following or preceding each test. To avoid injuries or overreaching, daily feedback was also obtained from triathletes and taken into account.

Swimming–cycling phase

The swim was staged in an indoor 50-m pool (24–25°C) wearing a singlet. The 40-km bike segment was conducted on a cycling track (166 m) next to the pool. The swim-cycle combination was performed in the three experiments at the same speed as the first triathlon, which was completed as fast as possible. The swimming velocity was controlled using a pacer placed in the swimming cap (Tempo Trainer, Finis®, Helsinki, Finland), which provided a ring signal each period of time needed for the completion of 12.5 m. During the first triathlon, they were asked to swim with an even paced strategy. During the first 3 km of the bike,

Fig. 1 Graphic representation of the three triathlon conditions and the control run. BS blood samples. Dark portions represent $\dot{V}O_2$ and \dot{V}_E interval measurements. Tri-Run $_{+5\%}$, Tri-Run $_{-5\%}$, Tri-Run $_{-10\%}$ represent triathlon, whose first run kilometre was done 5% faster, 5% slower and 10% slower than the control run (C-Run). The 9 remaining kilometres were left free



triathletes had to reach the speed to be maintained during the last 37 km. A ring signal at each half-lap (83 m) indicated precisely the speed they had to keep. The speed of the last 37 km was the one reached from the second to the third kilometre, considering therefore that the two first kilometres was the distance necessary to reach a constant speed (Hausswirth et al. 2001). During the cycling sections, triathletes could drink ad libitum thanks to 750 mL water bottles disposed on their bikes. The transition time between swimming–cycling was slightly different from those obtained in competition (i.e. 3 min). It included 1 min for the change of clothes, 1 min for the cardiofrequency meter installation on the subject and 1 min for the run with the bike to reach the cycling track (200 m).

Running phase

The 10-km run was staged next to the cycling track, on the same indoor synthetic running track as the C-Run (340 m). During the first kilometre, subjects had to maintain alternatively a running speed 5% faster (Tri-Run_{+5%}), 5% slower (Tri-Run_{-5%}) and 10% slower (Tri-Run_{-10%}) than the mean speed of the C-Run. The subjects were then instructed to finish the nine remaining kilometres as quickly as possible, as in a competitive event. Tri-Run_{+5%} condition was representative of the strategy adopted by highly trained triathletes in competition during the cycle-to-run transition (Le Meur et al. 2009). Tri-Run_{-5%} and Tri-Run_{-10%} were closer to the mean velocity they used to maintain during short distance triathlon. A ring signal each 25 m indicated precisely the speed the subject had to keep over the first kilometre. Then, the only instruction given was to run as fast as possible until the finish line. They were given distance feedback each kilometre completed. During the three triathlon tests, athletes were encouraged to drink 250 mL after 3, 6 and 9 km.

Measurement of kinematic variables

Running speed was continuously recorded thanks to a s3 accelerometer (Polar RS800sd, Kempele, Finland) (Hausswirth et al. 2009). Three days before the first test, it was calibrated to integrate each runner's stride characteristics, as recommended by the manufacturer. Subjects had to follow a pace close to the speed they would adopt over the control run (i.e. 18 km h⁻¹) for 2 km. They received audio cues via a beeper; the cue rhythm determined the speed needed to cover 20 m.

Measurement of metabolic variables

After 35-km of cycling, the subjects were stopped to be equipped with the same portable gas analyser employed

during the running pre-test. Thus, the cycle-to-run transition was reduced in time in order to reproduce competition conditions (i.e. 30 s) (Millet and Vleck 2000). The physiological data ($\dot{V}O_2$, \dot{V}_E) were averaged every 5 s from the breath-by-breath values. They were analysed at the beginning (0.5–1 km), in the middle (4.5–5 km) and at the end of each run (9–9.5 km).

Blood sampling

Blood samples were taken from ear lobes at the end of the cycling phase, after 5 km of running and at the end of the 10-km run for the analysis of blood lactate concentration ($[La^-]_b$) (Lactate Pro, Akray Inc, Kyoto, Japan).

Statistical analyses

All data were expressed as mean \pm standard deviation. A two-way analysis of variance (pacing strategy \times time period) for repeated measures was performed to analyse the effects of the time period and the pace adopted during the first run kilometre using running speed, HR, $\dot{V}O_2$, \dot{V}_E and $[La^-]_b$ values as dependent variables. A Newmann-Keuls post hoc test was used to determine differences among all paces and periods during exercise. The level of significance was set at $p < 0.05$ for all statistical procedures.

Results

All subjects completed the protocol without problem and remarked that both C-Run and triathlon trials were perceptually similar to competition races.

Training load

No significant difference in training volume and training session distribution in zone 1, zone 2 and zone 3 were found between each 10-day period elapsing two tests ($p = 0.97$).

Performances

No significant difference was observed between the swimming–cycling phases of the three triathlon sessions ($p > 0.05$, Table 2). There was a systematic significant difference in time required to complete the first 1 km in relation to the starting strategy (200 ± 15 , 190 ± 14 , 210 ± 17 and 220 ± 18 s for C-Run, Tri-Run_{+5%}, Tri-Run_{-5%} and Tri-Run_{-10%}, respectively, p ranging from 0.001 to 0.014). Tri-Run_{-5%} resulted in a significantly faster overall 10-km run performance than Tri-Run_{+5%} and Tri-Run_{-10%} ($p = 0.005$ and $p = 0.02$, with Tri-Run_{+5%} and Tri-Run_{-10%},

Table 2 Overall and isolated performances achieved during the three triathlons

Perf. conditions	Swimming time (s)	Cycling time (s)	Running time (s)	Overall time (s)
C-Run			2,000 ± 72 ^{μμ,εε}	
Tri-Run _{+5%}	1,278 ± 54	4,260 ± 52	2,178 ± 121 ^{**, \$\$, μμ}	7,716 ± 196 ^{\$\$, μμ}
Tri-Run _{-5%}	1,275 ± 51	4,255 ± 50	2,028 ± 78 ^{ε, ε, μ}	7,558 ± 188 ^{ε, ε, μ}
Tri-Run _{-10%}	1,281 ± 52	4,263 ± 57	2,087 ± 88 ^{ε, *, ε}	7,631 ± 191 ^{ε, ε}

Values are expressed as mean ± SD

Significantly different from C-Run group, * $p < 0.05$, ** $p < 0.01$

Significantly different from Tri-Run_{+5%}, ^ε $p < 0.05$, ^{εε} $p < 0.01$

Significantly different from Tri-Run_{-5%}, ^ε $p < 0.05$, ^{\$\$} $p < 0.01$

Significantly different from Tri-Run_{-10%}, ^ε $p < 0.05$, ^{εε} $p < 0.01$

respectively) but no significant difference with C-Run ($p = 0.58$) ($2,028 \pm 78$ s and 17.8 ± 0.4 km h^{-1} vs. $2,000 \pm 72$ s and 18.0 ± 0.6 km h^{-1} , $2,178 \pm 121$ s and 16.5 ± 0.9 km h^{-1} , $2,087 \pm 88$ s and 17.2 ± 0.6 km h^{-1} , for Tri-Run_{-5%}, C-Run, Tri-Run_{+5%} and Tri-Run_{-10%}, respectively, Table 2).

Physiological parameters

Table 3 indicates mean values for HR, $\dot{V}O_2$, \dot{V}_E and blood lactate for the running bouts.

Time period effect $\dot{V}O_2$, \dot{V}_E and HR at the middle and at the end of the run tended to be lower than their corresponding initial value during Tri-Run_{+5%} ($p = 0.081$ and $p = 0.085$ for $\dot{V}O_2$, $p = 0.071$ and $p = 0.080$ for \dot{V}_E , $p = 0.080$ and $p = 0.057$ for HR, when considering km-5 and km-10 with km-1, respectively). On the contrary, \dot{V}_E and HR were significantly higher after 5 and 9.5-km than at the beginning of the run for C-Run, Tri-Run_{-5%} and Tri-Run_{-10%} ($p = 0.041$ and $p = 0.008$ and $p = 0.011$ for \dot{V}_E , $p = 0.035$ and $p = 0.003$ and $p = 0.006$ for HR, when considering km-5 and km-10 with km-1, for C-Run, Tri-Run_{-5%} and Tri-Run_{-10%}, respectively). No significant difference was observed between 5-km $[La^-]_b$ and corresponding initial values except for Tri-Run_{+5%}, whose $[La^-]_b$ value increased from 2.9 ± 0.2 to 4.9 ± 0.5 mmol L^{-1} during this period ($p = 0.035$). All final $[La^-]_b$ values for all the runs were significantly higher than their corresponding initial values ($p = 0.014$, $p = 0.021$, and $p = 0.029$, for C-Run, Tri-Run_{-5%} and Tri-Run_{-10%}, respectively).

Pacing strategy effect

The statistical analysis indicated a significant effect of pacing strategy on $\dot{V}O_2$, \dot{V}_E and HR during the first kilometre of the running phase ($p < 0.05$). $\dot{V}O_2$, \dot{V}_E and HR recorded during Tri-Run_{+5%} after km-1 were indeed significantly higher than C-Run, Tri-Run_{-5%} and Tri-Run_{-10%} ($p < 0.05$, Table 3). On the contrary, $\dot{V}O_2$, \dot{V}_E , HR and $[La^-]_b$ during Tri-Run_{-5%} were higher than during the

three other conditions after 5 and 9.5-km ($p < 0.05$), except $[La^-]_b$ at km-5 ($p = 0.12$). Tri-Run_{+5%} demonstrated greater $[La^-]_b$ at km-5 than C-Run and the two other triathlon runs ($p = 0.031$, $p = 0.033$, and $p = 0.038$, when considering C-Run, Tri-Run_{-5%} and Tri-Run_{-10%} with Tri-Run_{+5%}, respectively).

Discussion

The main finding of this study was that the best initial pacing strategy during the running leg of a triathlon is to perform the first kilometre 5% slower than the average pace of a 10-km control run. A 20 s-variation in running time over the first kilometre led to a significant difference of 150 ± 21 s on the 10-km triathlon run performance. This result is even more relevant considering that the differential time at the finish line between the top 10 triathletes during World Cup triathlons is usually shorter than 1 min (Millet and Vleck 2000; Vleck et al. 2006, 2008; Le Meur et al. 2009). To our knowledge, this study is the first to highlight performance improvements by forcing highly trained athletes to change their usual pattern of energy expenditure.

In the present study, triathletes significantly increased their 10-km C-Run time by 1.4, 4.4 and 8.9% during Tri-Run_{-5%}, Tri-Run_{-10%} and Tri-Run_{+5%}, respectively ($p < 0.05$, Fig. 2). The adoption of a fast pace during the first run kilometre induced a significant subsequent slowdown until the third kilometre (the 9 remaining kilometres were performed 2.7 ± 0.4 km h^{-1} slower than the first one during Tri-Run_{+5%}, $p < 0.01$; Fig. 2). Conversely, triathletes succeeded in increasing their speed by 1.0 ± 0.3 km h^{-1} over the same section during Tri-Run_{-5%} (Fig. 2).

The main explanation to elucidate the weaker performance observed during the Tri-Run_{+5%} time-trial is that the pace was centrally down-regulated in a feed-forward manner to avert premature fatigue during exercise, as already proposed by Ulmer (1996). Tucker (2009) has recently proposed that alterations in pacing strategy occur

Table 3 Group mean (\pm SD) values for oxygen uptake, expiratory flow, heart rate and blood lactate obtained during the run sessions

Param. Runs	Oxygen uptake ($\dot{V}\text{O}_2$) $\text{mL min}^{-1} \text{kg}^{-1}$			Expiratory flow (\dot{V}_E) L min^{-1}			Heart rate (HR) (beats min^{-1})			Blood lactate ($[\text{La}^-]_b$) (mmol L^{-1})		
	Distance (km)	0.5-1	4.5-5	9.9-5	Distance (km)	0.5-1	4.5-5	9.9-5	Distance (km)	0.5-1	4.5-5	9.9-5
C-Run	61.5 \pm 5.1 [§]	60.7 \pm 5.8 ^{§EE}	64.4 \pm 5.7 ^{§SS}	173.2 \pm 12.3 [§]	179.8 \pm 14.3 ^{§EE}	182.1 \pm 9.5 ^{§SS}	176.2 \pm 17.3 [£]	186.2 \pm 17.9 [§]	189.3 \pm 18.0 [§]	0.8 \pm 0.3 ^{§SS}	3.2 \pm 0.4 [§]	3.4 \pm 0.3 [£]
Tri-Run _{+5%}	66.1 \pm 7.0 ^{§E}	54.9 \pm 6.8 ^{§EE}	55.1 \pm 6.7 ^{§SS}	182.1 \pm 9.2 [*]	160.5 \pm 12.3 ^{§EE}	162.1 \pm 13.4	186.0 \pm 16.5 ^{§EE}	176.1 \pm 14.8 ^{E*}	171.6 \pm 12.8	2.9 \pm 0.2 [*]	4.9 \pm 0.5 [£]	4.1 \pm 0.3 ^E
Tri-Run _{-5%}	60.9 \pm 5.9 [§]	65.3 \pm 5.8 ^{§SS}	68.1 \pm 6.8 ^{§SS}	167.8 \pm 8.2	187.9 \pm 11.2 ^{§SS}	191.5 \pm 10.0 ^{§S}	168.0 \pm 11.2	190.1 \pm 14.2 [§]	192.8 \pm 12.8	3.2 \pm 0.3 [*]	3.8 \pm 0.2 [§]	5.4 \pm 0.4 ^{§S}
Tri-Run _{-10%}	55.1 \pm 4.9 ^{§SS}	57.9 \pm 4.4 ^{§EE}	60.6 \pm 5.7 ^{§SS}	158.5 \pm 10.8 ^{§EE}	170.4 \pm 11.2 ^{§SS}	164.2 \pm 12.1	159.0 \pm 11.3	181.1 \pm 17.8 [£]	180.1 \pm 17.2 ^{§SS}	3.1 \pm 0.2 [*]	3.6 \pm 0.4 [§]	4.0 \pm 0.4 [£]

All $\dot{V}\text{O}_2$, \dot{V}_E and HR values for both Tri-Run_{-5%} and Tri-Run_{-10%} were significantly different from the corresponding initial value, $p < 0.05$

All \dot{V}_E and HR values for both C-Run and Tri-Run_{-10%} were significantly different from the corresponding initial value, $p < 0.05$

All final $[\text{La}^-]_b$ values for all Runs were significantly different from the corresponding initial value, $p < 0.05$

The 5-km $[\text{La}^-]_b$ values for Tri-Run_{-5%} were significantly different from the corresponding initial value, $p < 0.05$

Significantly different from C-Run group, * $p < 0.05$, ** $p < 0.01$

Significantly different from Tri-Run_{+5%} group, [§] $p < 0.05$, ^{§S} $p < 0.01$

Significantly different from Tri-Run_{-5%} group, [£] $p < 0.05$, ^{££} $p < 0.01$

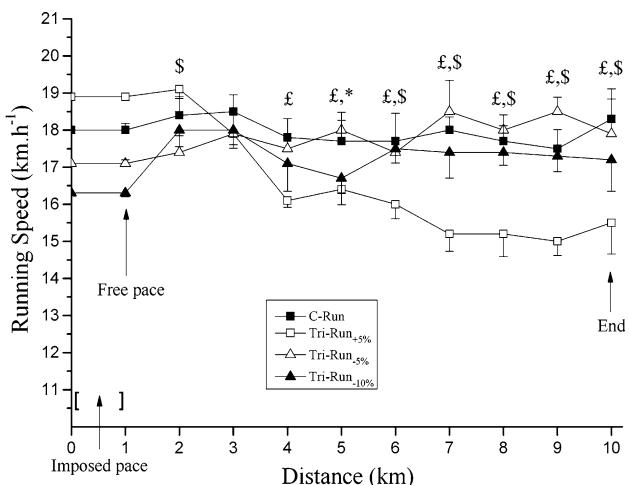


Fig. 2 Group mean (\pm SD) values for average running speeds (km h^{-1}) recorded every kilometer during the 10-km run for the Triathlon Runs where the first km was done alternatively 5% faster (Tri-Run $_{+5\%}$), 5% slower (Tri-Run $_{-5\%}$) and 10% slower (Tri-Run $_{-10\%}$) than the Control Run (C-Run); the 9 remaining kilometers were then free in all situations. All values for the Tri-Run $_{+5\%}$ were significantly different from the corresponding imposed initial pace (excepted for km-2 value), $p < 0.01$. All values for the Tri-Run $_{-10\%}$ were significantly different from the corresponding imposed initial pace (excepted for km-5 value), $p < 0.01$. $^{\$}$ Significantly different within both Tri-Run $_{+5\%}$ and Tri-Run $_{-10\%}$, and within Tri-Run $_{+5\%}$ and Tri-Run $_{-5\%}$, $p < 0.05$ * Significantly different within both Tri-Run $_{-5\%}$ and Tri-Run $_{-10\%}$, and within Tri-Run $_{-5\%}$ and Tri-Run $_{+5\%}$, $p < 0.05$. $^{\text{£}}$ Significantly different within Tri-Run $_{+5\%}$ and C-Run, $p < 0.05$

to prevent harmful or catastrophic changes from occurring before the end of exercise, while still optimising performance. Two major limiting physiological changes may be identified here; of metabolic and ventilatory origins respectively.

The present results revealed a significantly higher metabolic demand during the first kilometre of Tri-Run $_{+5\%}$ than during Tri-Run $_{-5\%}$ and Tri-Run $_{-10\%}$ (-8.9 and -16.7% concerning $\dot{V}\text{O}_2$; -9.7 and -14.5% concerning \dot{V}_E , for Tri-Run $_{-5\%}$ and Tri-Run $_{-10\%}$, respectively; $p < 0.05$, Table 3). After 5-km, we still observed a greater anaerobic contribution for Tri-Run $_{+5\%}$ than the two other strategies in spite of a significantly lower speed ($4.9 \pm 0.5 \text{ mmol L}^{-1}$ and $16.4 \pm 0.4 \text{ km h}^{-1}$, $3.8 \pm 0.2 \text{ mmol L}^{-1}$ and $18.0 \pm 0.3 \text{ km h}^{-1}$, $3.6 \pm 0.4 \text{ mmol L}^{-1}$ and $16.7 \pm 0.4 \text{ km h}^{-1}$ for Tri-Run $_{+5\%}$, Tri-Run $_{-5\%}$ and Tri-Run $_{-10\%}$, respectively; $p < 0.05$; Table 3). These results are in accordance with previous studies about pacing strategies in swimming (Thompson et al. 2003), cycling (Foster et al. 1993; Hettinga et al. 2006) and running (Billat et al. 2001), which demonstrated that a fast start induces a higher supply of anaerobic pathways to achieve a fixed distance. Moreover, Kreider et al. (1988) explained that the cycle-to-run transition causes a redistribution of blood flow between the different muscular groups involved during running. The delay in the shunting of

blood to the upper extremities may then increase the rate of glycolysis in both trunk and arms' muscles. Tri-Run $_{+5\%}$ may then have induced higher metabolic disturbances through the overall run than Tri-Run $_{-5\%}$ and Tri-Run $_{-10\%}$.

Another explanation was that a “negative pacing strategy” (i.e. whereby speed gradually would have increased) would have generated premature respiratory disturbances during the cycle-run transition. At the end of the first kilometre of Tri-Run $_{+5\%}$, triathletes reached $93.9 \pm 6.1\%$ of \dot{V}_{Emax} determined from the laboratory incremental test. These values were significantly higher for Tri-Run $_{+5\%}$ than Tri-Run $_{-5\%}$ and Tri-Run $_{-10\%}$ ($86.5 \pm 7.8\%$ of \dot{V}_{Emax} and $81.7 \pm 6.9\%$ of \dot{V}_{Emax} , for Tri-Run $_{-5\%}$ and Tri-Run $_{-10\%}$, respectively; $p < 0.05$). Hill et al. (1991) demonstrated that the crouched position adopted by triathletes during cycling increases abdominal impedance and diaphragmatic work. Moreover, Boussana et al. (2001) reported that a moderate intensity cycle-to-run combination, not performed to exhaustion induced a decrease in respiratory muscle performance. Another study showed that the respiratory muscle fatigue induced by prior cycling was maintained and not reversed by the subsequent run (Galy et al. 2003). As triathletes reached here higher running intensity than during these studies ($87\% \dot{V}\text{O}_{2\text{max}}$ vs. $75\% \dot{V}\text{O}_{2\text{max}}$), Tri-Run $_{+5\%}$ may have led to greater respiratory disturbances than Tri-Run $_{-5\%}$ and Tri-Run $_{-10\%}$.

Nevertheless, two major observations led us to hypothesise that the weaker performances observed during Tri-Run $_{+5\%}$ were mainly due to a reduction of the cognitive drive and not to a peripheral fatigue. First, triathletes succeeded to perform an “end-spurt” in the last kilometre, whereas they showed the typical symptoms of fatigue as indicated by the fall of running speed until the third kilometre (Fig. 2). Tucker (2009) has proposed that the occurrence of an end-spurt indicated that the distribution of pace selected during self-paced exercise is centrally regulated in accordance to an “anticipatory—feedback RPE model”. This final increase in running speed during Tri-Run $_{+5\%}$ supported the notion that the pacing strategy selected was continuously altered throughout the event, possibly in response to changing afferent signals. It suggested that exercise demands were somewhat uncertain at commencement of the trial and gradually resolved as the endpoint approached. As a result, running pace was subconsciously attenuated until the last kilometre was reached. As the role of the regulatory processes was to ensure that severe derangements to homeostasis did not occur, this uncertainty may have resulted in the maintenance of a motor unit and metabolic reserve throughout Tri-Run $_{+5\%}$. From this perspective, the weaker performance achieved during Tri-Run $_{+5\%}$ would have been primarily due to a decrease in motor unit recruitment and not to an effective drastic failure of the ventilatory function or of the

homeostasis in the exercising limbs. Moreover, peripheral fatigue results in a progressive decline in force production (Gandevia 2001). In the present experiment, we did not observe such a progressive fall in running speed but a sudden slowdown after km 2. Speed decreased by 1.5 km h^{-1} per kilometre between kilometre 2–4 and only by 0.2 km h^{-1} per kilometre during the five subsequent ones (Fig. 2). Thus, we speculated that the adoption of a fast running start may have generated a greater rate of received exertion (RPE) than the one the central controller considered optimal. We hypothesised that triathletes might have been suddenly restrained to slowdown until their RPE returned to a “tolerable” level.

Another interesting finding of our study was that the differential time between Tri-Run_{-10%} and Tri-Run_{-5%} reached 59 ± 11 s at the end of the race, even if the differential time was reached at 10 s at the end of the first kilometre. $\dot{V}\text{O}_2$, $\dot{V}\text{E}$ and $[\text{La}^-]_{\text{b}}$ were significantly lower after 5 and 9.5 km for Tri-Run_{-10%} than Tri-Run_{-5%}, suggesting that triathletes did not succeed in reaching the maximal workrate they might have been able to sustain. The reason of this finding remains unclear. Several field-based researches reported that triathletes adopted a high initial pace during the cycle-to-run transition during both competitions (Vleck et al. 2006, 2008; Le Meur et al. 2009) and multi-transition training sessions (Millet and Vleck 2000). For instance, Le Meur et al. (2009) showed that all of the 136 triathletes competing in the 2007 Beijing ITU WC event adopted a “positive pacing strategy” (whereby speed gradually declines, Abbiss and Laursen 2008) through the running phase. During this race, the first of the four laps was run 10.0% faster than the three remaining laps. Then, we can consider that Tri-Run_{+5%} represented the usual strategy experienced by triathletes and that Tri-Run_{-10%} was more distant than Tri-Run_{-5%} from triathletes’ usual starting strategy. Over the first kilometre of Tri-Run_{-5%} triathletes were forced to start 20 s slower than they used to (i.e. Tri-Run_{+5%}), whereas this differential starting time reached 30 s during Tri-Run_{-10%} (Fig. 2). This finding could be linked with several studies, which have demonstrated that the pacing strategy is influenced by prior experience (Ansley et al. 2004; Mauger et al. 2009; Micklewright et al. 2009; Foster et al. 2009). A recent research conducted by Foster et al. (2009) demonstrated that the pattern of energy expenditure during time trial exercise appears to follow a predetermined template associated with prior experience, which is modified by a variety of sensory feedbacks mechanisms. From this perspective, Tri-Run_{-10%} may have been more disturbing for triathletes than Tri-Run_{-5%} by providing more atypical internal feedbacks than those they usually perceived during the cycle-to-run transition (see physiological responses in Table 3). The present results suggested that the higher the

sensory feedbacks were modified comparing to prior experience, the more triathletes had difficulties to adjust their pace. We speculated that triathletes would have taken benefits particularly from further experimentations of Tri-Run_{-10%} strategy to improve their ability to adjust quickly and to maintain an optimal pace after a slow first kilometre. Indeed Mauger et al. (2009) have demonstrated recently that cyclists completed a time-trial closed to their personal best—without any external feedbacks—only if previous experience (i.e. at least 4 time trials) has been gained to develop the appropriate optimal strategy. Similarly, Foster et al. (2009) showed that the “anticipatory-feedback RPE model” is not a non-constant feature and may require some time to fully develop. Further studies are required to confirm this hypothesis.

In conclusion, this study demonstrated that elite triathletes should slightly reduce their freely chosen pace over the first run kilometre of short distance triathlons. The present results showed that pacing during the cycle-to-run transition is crucial for the development of the running phase as a whole. In this context, the best running strategy following cycling is to perform the first kilometre 5% slower than the average speed of a 10-km control run. Highly trained triathletes would benefit to automate this particular pace during back to back cycle-run training as both slower and higher initial running speed led to weaker performance. Considering the high correlation systematically reported between finish position and running performance during ITU World Cup races for both sexes (Vleck et al. 2006, 2008; Le Meur et al. 2009), pacing might be the main factor in improving the running performance achieved in competition by world-class triathletes.

Acknowledgments This study was made possible by technical support from the French National Institute of Sport and Physical Education, the French Federation of Triathlon and the Universities of South Toulon-Var and Nice-Sophia Antipolis. The authors are especially grateful to the athletes and coaches for their help and cooperation. They also gratefully acknowledge Jessica Harrison for her help in the correction of this manuscript.

Conflict of interest statement The authors declare that they have no conflict of interest.

References

- Abbiss CR, Laursen PB (2008) Describing and understanding pacing strategies during athletic competition. *Sports Med* 38:239–252
- Ansley L, Robson PJ, St Clair Gibson A, Noakes TD (2004) Anticipatory pacing strategies during supramaximal exercise longer than 30 s. *Med Sci Sports Exerc* 36:309–314
- Beaver WL, Wasserman K, Whipp BJ (1986) A new method for detecting anaerobic threshold by gas exchange. *J Appl Physiol* 60:2020–2027
- Bentley DJ, Millet GP, Vleck VE, McNaughton LR (2002) Specific aspects of contemporary triathlon. *Sports Med* 32:345–359

- Bernard T, Vercruyssen F, Mazure C, Gorce P, Hausswirth C, Brisswalter J (2007) Constant versus variable-intensity during cycling: effects on subsequent running performance. *Eur J Appl Physiol* 99:103–111
- Billat VL, Slawinski J, Danel M, Koralsztein JP (2001) Effect of free versus constant pace on performance and oxygen kinetics in running. *Med Sci Sports Exerc* 33:2082–2088
- Boussana A, Matecki S, Galy O, Hue O, Ramonatxo M, Le Gallais D (2001) The effect of exercise modality on respiratory muscle performance in triathletes. *Med Sci Sports Exerc* 33:2036–2043
- Esteve-Lanao J, Foster C, Seiler S, Lucia A (2007) Impact of training intensity distribution on performance in endurance athletes. *J Strength Cond Res* 21:943–949
- Fiskestrand A, Seiler KS (2004) Training and performance characteristics among Norwegian international elite rowers 1970–2001. *Scand J Med Sci Sports* 14:303–310
- Foster C, Snyder AC, Thompson NN, Green MA, Foley M, Schrager M (1993) Effect of pacing strategy on cycle time trial performance. *Med Sci Sports Exerc* 25:383–388
- Foster C, Hendrickson KJ, Peyer K, Reiner B, de Koning JJ, Lucia A, Battista RA, Hettinga FJ, Porcari JP, Wright G (2009) Pattern of developing the performance template. *Br J Sports Med* 43:765–769
- Galy O, Hue O, Boussana A, Peyreigne C, Courret I, Le Gallais D, Mercier J, Préfaut C (2003) Effects of the order of running and cycling of similar intensity and duration on pulmonary diffusing capacity in triathletes. *Eur J Appl Physiol* 90:489–495
- Gandevia SC (2001) Spinal and supraspinal factors in human muscle fatigue. *Physiol Rev* 81:1725–1789
- Gottshall JS, Palmer BM (2002) The acute effects of prior cycling cadence on running performance and kinematics. *Med Sci Sports Exerc* 34:1518–1522
- Hausswirth C, Brisswalter J (2008) Strategies for improving performance in long duration events: Olympic distance triathlon. *Sports Med* 38:881–891
- Hausswirth C, Bigard AX, Berthelot M, Thomaïdis M, Guezennec CY (1996) Variability in energy cost of running at the end of a triathlon and a marathon. *Int J Sports Med* 17:572–579
- Hausswirth C, Bigard AX, Guezennec CY (1997) Relationships between running mechanics and energy cost of running at the end of a triathlon and a marathon. *Int J Sports Med* 18:330–339
- Hausswirth C, Lehénaff D, Dréano P, Savonen K (1999) Effects of cycling alone or in a sheltered position on subsequent running performance during a triathlon. *Med Sci Sports Exerc* 31:599–604
- Hausswirth C, Vallier JM, Lehénaff D, Brisswalter J, Smith D, Millet G, Dreano P (2001) Effect of two drafting modalities in cycling on running performance. *Med Sci Sports Exerc* 33:485–492
- Hausswirth C, Le Meur Y, Couturier A, Bernard T, Brisswalter J (2009) Accuracy and repeatability of the Polar® RS800sd to evaluate stride rate and running speed. *Int J Sports Med* 30:354–359
- Hettinga FJ, de Koning JJ, Broersen FT, Van Geffen P, Foster C (2006) Pacing strategy and the occurrence of fatigue in 4000-m cycling time trials. *Med Sci Sports Exerc* 38:1484–1491
- Hill NS, Jacoby C, Farber W (1991) Effect of an endurance triathlon on pulmonary function. *Med Sci Sports Exerc* 23:1260–1264
- Howley ET, Bassett DR Jr, Welch HG (1995) Criteria for maximal oxygen uptake: review and commentary. *Med Sci Sports Exerc* 27:1292–1301
- Kreider RB, Cundiff DE, Hammett JB, Cortes CW, William KW (1988) Effect of cycling on running performance in triathletes. *Ann Sports Med* 3:220–225
- Le Meur Y, Hausswirth C, Dorel S, Bignet F, Brisswalter J, Bernard T (2009) Influence of gender on pacing adopted by elite triathletes during a competition. *Eur J Appl Physiol* 106:535–545
- Mauger AR, Jones AM, Williams CA (2009) Influence of feedback and prior experience on pacing during a 4-km cycle time trial. *Med Sci Sports Exerc* 41:451–458
- Micklewright D, Papadopoulou E, Swart J Dr, Noakes TD (2009) Previous experience influences pacing during 20-km time trial cycling. *Br J Sports Med*. doi:10.1136/bjsm.2009.057315
- Millet GP, Vleck VE (2000) Physiological and biomechanical adaptations to the cycle to run transition in Olympic triathlon: review and practical recommendations for training. *Br J Sports Med* 34:384–390
- Seiler KS, Kjerland GO (2006) Quantifying training intensity distribution in elite endurance athletes: is the evidence for an 'optimal' distribution? *Scand J Med Sci Sports* 16:49–56
- Thompson KG, MacLaren DP, Lees A, Atkinson G (2003) The effect of even, positive and negative pacing on metabolic, kinematic and temporal variables during breaststroke swimming. *Eur J Appl Physiol* 88:438–443
- 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* 43:392–400
- Ulmer HV (1996) Concept of an extracellular regulation of muscular metabolic rate during heavy exercise in humans by psychophysiological feedback. *Experientia* 52:416–420
- Vercruyssen F, Suriano R, Bishop D, Hausswirth C, Brisswalter J (2005) Cadence selection affects metabolic responses during cycling and subsequent running time to fatigue. *Br J Sports Med* 39:267–272
- Vleck VE, Bürgi A, Bentley DJ (2006) The consequences of swim, cycle, and run performance on overall result in elite Olympic distance triathlon. *Int J Sports Med* 27:43–48
- Vleck VE, Bentley DJ, Millet GP, Bürgi A (2008) Pacing during an elite Olympic distance triathlon: comparison between male and female competitors. *J Sci Med Sport* 11:424–432



RELATIONSHIPS BETWEEN TRIATHLON PERFORMANCE AND PACING STRATEGY DURING THE RUN IN AN INTERNATIONAL COMPETITION

Journal:	<i>International Journal of Sports Physiology and Performance</i>
Manuscript ID:	IJSPP_2010_0028.R2
Manuscript Type:	Original Investigation
Keywords:	race analysis, running speed variability, gender comparison, performance level

 SCHOLARONE™
Manuscripts

1 **TITLE: RELATIONSHIPS BETWEEN TRIATHLON PERFORMANCE AND
2 PACING STRATEGY DURING THE RUN IN AN INTERNATIONAL
3 COMPETITION**

4
5 **SUBMISSION TYPE:** Original investigation

6
7 **AUTHORS:** Yann Le Meur^{1,2}, Thierry Bernard,^{2,3} Sylvain Dorel¹, Chris R Abbiss^{4,5,6},
8 Gérard Honnorat⁷, Jeanick Brisswalter² & Christophe Hausswirth^{1*}

9
10 ¹ Research Department, Laboratory of Biomechanics and Physiology, National Institute of
11 Sport, Expertise and Performance, 75012 Paris, France.

12 ² Laboratory of Physiological Adaptations, Motor Performance and Health (EA 3837),
13 University of Nice-Sophia Antipolis, Faculty of Sport Sciences, BP 32 59, 06205 Nice Cedex
14 03, France.

15 ³ HANIBIO EA 4322, University of South Toulon-Var, BP 20132, 83957 La Garde Cedex,
16 France.

17 ⁴ School of Exercise, Biomedical and Health Sciences, Edith Cowan University, Joondalup,
18 Australia

19 ⁵ Department of Physiology, Australian Institute of Sport, Belconnen, ACT, Australia

20 ⁶ Division of Materials Science and Engineering, Commonwealth Scientific and Industrial
21 Research Organisation, Belmont, Victoria, Australia

22 ⁷ French Federation of Triathlon, Saint Denis – La Plaine, France

23

24 ***Corresponding Author :**

25 Dr Christophe Hausswirth, PhD

26 Research Department,

27 National Institute of Sport, Expertise and Performance,
28 11 Avenue du Tremblay, 75012 Paris, FRANCE

29 Phone : + 33 1-41-74-43-85

30 Fax : + 33 1-41-74-45-35

31 E-mail : christophe.hausswirth@insep.fr

32

33

34 **RUNNING TITLE :** Pacing during running in triathlon

35

36 **ABSTRACT WORD COUNT:** 248

37

38 **MANUSCRIPT WORD COUNT:** 3643

39

40 This submission includes 1 table and 3 figures.

1 **ABSTRACT**

2

3 **Purpose:** The purpose of the present study was to examine relationships between athlete's
4 pacing strategies and running performance during an international triathlon competition.

5 **Methods:** Running split times for each of the 107 finishers of the 2009 European Triathlon
6 Championships (42 females and 65 males) were determined with the use of a digital
7 synchronized video analysis system. A total of 5 cameras were placed on various positions of
8 the running circuit (4 laps of 2.42 km). Running speed and an index of running speed
9 variability (IRSV_{race}) were subsequently calculated over each section or running split.

10 **Results:** Mean running speed over the first 1272 m of lap1 was 0.76 km.h^{-1} (+4.4%) and 1.00 km.h^{-1} (+5.6%) faster than the mean running speed over the same section during the three last
11 laps, for females and males, respectively ($p < 0.001$). A significant inverse correlation was
12 observed between RS_{race} and IRSV_{race} for all triathletes (females $r = -0.41$, $p = 0.009$; males r
13 = -0.65 , $p = 0.002$; and whole population -0.76 , $p = 0.001$). Females demonstrated higher
14 IRSV_{race} compared with men ($6.1 \pm 0.5 \text{ km.h}^{-1}$ and $4.0 \pm 1.4 \text{ km.h}^{-1}$, for females and males,
15 respectively, $p = 0.001$) due to greater decrease in running speed over uphill sections.

16 **Conclusions:** Pacing during the run appears to play a key role in high-level triathlon
17 performance. Elite triathletes should reduce their initial running speed during international
18 competitions, even if high level of motivation and direct opponents may lead them to adopt an
19 aggressive strategy.

20 **Keywords:** race analysis, speed variability, performance level, gender comparison.

22 **INTRODUCTION**

23 It has been well established that the distribution of work within an exercise event may
24 have a considerable impact on overall performance (for review see Abbiss and Laursen¹).
25 Tucker² proposed that energy expenditure is regulated throughout an exercise task in order to
26 delay the deleterious effects of fatigue and achieve the best possible performance outcomes.
27 In triathlon, understanding and improving the influence of pacing on performance seems
28 particularly relevant for the run portion of the event. Indeed, recent studies conducted during
29 ITU World Cup (i.e. short distance) triathlon competitions have reported high correlation
30 between finish position and running performance in both genders (r -value 0.71 to 0.99, $p <$
31 0.01).^{3,4,5} Such high correlations with overall ranking were not evident in either swimming (r
32 = 0.36 to 0.52) or cycling ($r < 0.74$).^{3,4,5} In this context, recent field-based research has found
33 that triathletes tended to progressively reduce speed (i.e. positive pacing strategy) throughout
34 the run phase of ITU World Cup races.^{3,4,5} For instance, during the 2001 and 2002 Lausanne
35 World Cups most athletes ran faster over the first kilometre than the majority of other run
36 sections, while residual effects of prior cycling were the highest^{3,4}. Similarly, Le Meur et al⁵
37 showed that all of the 136 triathletes competing in the 2007 Beijing ITU World Cup event
38 adopted a positive pacing strategy through the running phase of the event. During this race,
39 the first of the four laps was run 10.0% faster than the three remaining laps⁵. This pattern of
40 energy expenditure contradicts current recommendations to adopt an even pacing strategy (i.e.
41 constant pace) for endurance events (see Abbiss and Laursen¹). From this point of view, some
42 authors have identified pacing strategy during running as a possible factor of progress for elite
43 triathletes.^{4,5}

44

45 Hausswirth et al⁶ showed that, for highly-trained triathletes, performance during a 10-
46 km running leg of a triathlon was improved if athletes performed the first kilometre 5%

47 slower than their average 10-km pace. In this study, a 20 sec-variation in running time over
48 the first kilometre (210 s vs. 190 s, *i.e.* 17 km.h⁻¹ vs. 19 km.h⁻¹) led to an improvement of 150
49 ± 21s over the entire 10-km run. It is likely that the lowered intensity at the start of the run
50 reduced the early development of fatigue and thus improved overall performance when
51 compared with the overly aggressive fast start pacing strategies self-selected by the triathletes.
52 The reason highly-trained triathletes self-selected such aggressive pacing strategies is unclear.
53 However, it has been shown that one's perceived exertion may be a major factor influencing
54 running speed regulation^{2,7}. Further, exertion or effort may be significantly influenced by both
55 external (*i.e.* race dynamics or environmental conditions)^{2,7,8} and internal (*i.e.* motivational)
56 factors^{2,7}. These findings suggested that pacing strategy is partially determined by the specific
57 emotion arousal associated with competition. In this perspective, Baron et al⁷ hypothesized
58 that athletes occasionally follow pacing patterns that seem unreasonably aggressive compared
59 with those of prarace performances, potentially because of the motivation provided by
60 competition. Considering the discrepancy between the results from Hausswirth et al⁶ and the
61 spontaneous fast running start systematically adopted by elite triathletes during world cup
62 races^{3,4,5}, further investigations are required to assess the benefit of a less aggressive strategy
63 in the particular context of major international mass-start competitions. Since pacing
64 strategies are based on robust cultural representations⁹ and taking into consideration the small
65 differences in performance determining a competition outcome (often < 1% between top 10
66 triathletes in World Cup competitions), information concerning the best way to extend the
67 limited energetic sources available to the triathlete is of considerable value.

68

69 The aim of the present study was to determine relationships between running pacing
70 strategy and running performance during an international level **triathlon** competition. As
71 pacing strategy may affect running performance during a triathlon competition, we analysed if

72 the best male and female runners exhibited differences in running speed distribution over the
73 10-km triathlon run.

74

75 MATERIAL AND METHODS

76

77 Participants

78 Sixty-five male and forty-two female elite triathletes were involved in the present
79 study. The experimental methodology was performed in accordance with the Declaration of
80 Helsinki.

81

82 Procedures

83 Performance of each participant was examined during the running section of an
84 international triathlon competition (European Triathlon Championships, Netherlands, Holten,
85 July 5th, 2009). The running leg consisted of four 2.42 km hilly-laps (total of 9.68 km). Each
86 lap contained a change in altitude of 18 m which was condensed in a 335 m hill at a 3%
87 gradient. Since the remainder of the course contained no sections with a grade greater than \pm
88 0.5 %, no downhill sections were identified. Little wind (mean $< 2 \text{ m.s}^{-1}$, data obtained from
89 Royal Netherlands Meteorological Institute) was observed over the circuit during the
90 competition day.

91

92 In order to ascertain performance times over the course, a video analysis system
93 recording at a frequency of 25 Hz (Sony HDR-CX12 AVHD) was synchronized with the
94 official timing system (Omega, Swatch Group, Swiss). The video analysis system included
95 five digital cameras located at the beginning of the run (i.e. exit of bike transition: 0), 283,
96 937, 1272 and 1829 m. Distances between these points were measured using both a measuring

97 wheel (Debrunner, Givisiez, art. 851.236) and a global positioning system, with an accuracy
98 of 2 - 3 m (GPS, Garmin GPSRAP 60CSx, Garmin Europe, United Kingdom).

99

100 **Data processing**

101 The elapsed time (s) for the entire run circuit, each lap and each section (i.e. uphill and
102 flat sections) were determined for each athlete using the race timing system and video data.
103 Running speed of each athlete (RS, km.h⁻¹) was determined via a subsequent video analysis
104 (Pro suite version 5.0, Dartfish[®], Fribourg, Swiss) over the following sections: 0-283 m flat,
105 283-937 m flat, 937-1272 m uphill, 1272-1829 m flat and 1829-2420 m flat. In order to
106 perform comparisons of running speed over laps and sections of the course, data were
107 subsequently pooled over each of the four laps, and for flat (RS_{flat}, 2085 m per lap) and uphill
108 sections (RS_{uphill}, 335 m per lap), independently.

109

110 The difference in running speed between flat and uphill sections ($\Delta_{F/U}$, %) was
111 calculated for each athlete using the following equation:

112

$$113 \Delta_{F/U, \%} = \frac{\text{Mean running speed over flat sections} - \text{Mean running speed over uphill sections}}{\text{Mean running speed over flat sections}}$$

114

115 In order to further examine the pacing strategy selected by athletes, an index of
116 running speed variability over the entire run (IRSV_{race}, km.h⁻¹) was calculated using the
117 following equation:

$$118 \text{IRSV}_{\text{race}} = \frac{\sum_{n=1}^{20} (\text{RS}_{\text{section}}(n) - \text{Mean RS}) * \text{Time over section (n)}}{\text{Total running time}}$$

119

120 Variability in running speed during each lap (IRSV_{lap}, km.h⁻¹), and over flat (IRSV_{flat},
121 km.h⁻¹) and uphill (IRSV_{uphill}, km.h⁻¹) sections were also determined independently, as defined
122 by the equations below:

123

124

$$\text{IRSV}_{\text{lap}} = \frac{\sum_{n=1}^5 (\text{RS}_{\text{section}}(n) - \text{Mean RS (lap)}) * \text{Time over section (n)}}{\text{Lap running time}}$$

125

126

$$\text{IRSV}_{\text{flat}} = \frac{\sum_{n=1}^{16} (\text{RS}_{\text{section}}(n) - \text{Mean RS (flat)}) * \text{Time over flat section (n)}}{\text{Total running time over flat sections}}$$

127

128

$$\text{IRSV}_{\text{uphill}} = \frac{\sum_{n=1}^4 (\text{RS}_{\text{section}}(n) - \text{Mean RS (uphill)}) * \text{Time over uphill section (n)}}{\text{Total running time over uphill sections}}$$

129

130

131 Statistical analysis

132 Three females and nine males did not finish the race and were excluded from the
133 analysis. All statistical analysis was conducted using (Origin 8.0[®], OriginLab, Northampton,
134 MA, USA). Data are expressed as mean \pm standard deviation (SD), unless otherwise stated.
135 The influence of running sections (i.e. uphill and flat) and laps on running velocity, IRSV_{lap}
136 and $\Delta_{F/U}$ were analyzed using a one-way repeated measures ANOVA. A one-way ANOVA
137 was used to determine the effects of gender on $\Delta_{F/U}$, IRSV_{race}, IRSV_{flat} and IRSV_{uphill}. Where
138 a significant effect was observed, a Tukey's post-hoc test was conducted to further delineate
139 differences between running sections (i.e. uphill and flat) and laps. A Pearson's product
140 moment correlation was used to determine the relationship between IRSV_{race} and the average
141 running speed over the entire run circuit. The equation of the linear function representing $f(x)$:
142 $\text{IRVS} = a * \text{RS} + b$ was calculated for the whole population, females and males

143 independently, when considering the whole run and each lap. For analysis, significance was
144 accepted at $p < 0.05$.

145

146

147 **RESULTS**

148

149 **Overall performance.** The mean finish times for the entire event were 121 ± 4 min and $108 \pm$
150 3 min, for females and males, respectively.

151

152 **Running speed.** Mean time and speed over the running section were 37 min 32 ± 3 min (15.6
153 ± 1.0 km.h $^{-1}$) for females and 33 min 30 ± 2 min (17.4 ± 1.1 km.h $^{-1}$) for males respectively.

154 Running speed values are presented in Table 1. Mean running speed over the first 1272 m of
155 lap1 was 0.76 km.h $^{-1}$ (+4.4%) and 1.00 km.h $^{-1}$ (+5.6%) faster than the mean running speed
156 over the same section during the last three laps, for both females and males, respectively ($p <$
157 0.001). A similar result was found when considering the whole circuit (+0.6 km.h $^{-1}$ and +3.7
158 % for females and +0.8 km.h $^{-1}$ and +4.3% for males, respectively, $p < 0.0001$) or flat sections
159 (+0.5 km.h $^{-1}$ and +2.7% for females and +0.7 km.h $^{-1}$ and +4.0% for males, respectively, $p <$
160 0.0001) and uphills independently (+1.2 km.h $^{-1}$ and +8.6% for females and +1.0 km.h $^{-1}$ and
161 +5.9% for males, respectively, $p < 0.0001$) (Table 1). The speed (km.h $^{-1}$) at each point of the
162 running leg is depicted in Fig. 1. Thirty seven of the 95 finishers (12 females and 25 males)
163 demonstrated an increase of at least 5% over the run section prior to the finish line (*i.e.* lap4),
164 compared to the same section during lap3. For 11 of them (3 females and 8 males), this
165 increase reached more than 10%.

166

167 The mean running speed for each section (i.e. uphill and flat) of the course and the average
168 $\Delta_{F/U}$ per lap are presented in Table 1. Females demonstrated higher $\Delta_{F/U}$ than males over each
169 lap ($p < 0.0001$, Table 1). $\Delta_{F/U}$ increased significantly after lap1 in females ($p < 0.0001$),
170 however remained stable until lap3 for males ($p = 0.99$, $p = 0.04$, $p = 0.001$ between lap1, and
171 lap2, lap3, lap4, respectively, Table 1).

172

173 **Running speed variability.** A significant inverse correlation was observed between RS_{race}
174 and $IRSV_{race}$ for all triathletes ($r = -0.41$, $p = 0.009$, $r = -0.65$, $p = 0.002$, -0.76 , $p = 0.001$, for
175 females, males and the whole population, respectively, Fig. 2). Similarly, an inverse
176 correlation was observed when considering each lap independently ($r = -0.61$, -0.75 , -0.57 and
177 -0.57 , for lap1, lap2, lap3 and lap4, respectively, when considering the whole population, $p <$
178 0.001). Females demonstrated higher $IRSV_{race}$ than males ($6.1 \pm 0.5 \text{ km.h}^{-1}$ and 4.0 ± 1.4
179 km.h^{-1} , for females and males, respectively, $p = 0.001$, Fig. 2). $IRSV_{lap}$ increased immediately
180 after lap1 for females (+23.8%, +24.6% and +31.6% for lap2, lap3 and lap4, when compared
181 with lap1, respectively, $p < 0.001$, Fig. 3), while no significant difference was reported until
182 lap4 for males (+6.8% with $p = 0.88$, +21.9% with $p = 0.07$, +46.6% with $p = 0.004$, for lap2,
183 lap3 and lap4, when compared with lap1, respectively, Fig. 3). The linear function
184 representing $IRSV_{race} = a * RS_{race} + b$ demonstrated a greater heterogeneity of running speed
185 variability for males than for females because a greater slope (absolute value) was reported
186 for males than for females [$|a| = 0.22$ [0.05 to 0.38; mean (95% confidence interval)], and $|a| =$
187 0.79 (0.53 to 1.04) for women and men, respectively, Fig. 2].

188

189 The results revealed a significant inverse correlation between $IRSV_{flat}$ and RS_{flat} for both
190 genders and the whole population ($r = -0.41$, $p = 0.01$, $r = -0.60$, $p = 0.0001$, $r = -0.37$ $p =$
191 0.001 , for females, males and the whole population, respectively, Fig. 2). The correlation

192 between $\text{IRSV}_{\text{uphill}}$ and $\text{RS}_{\text{uphill}}$ was significant for males ($a = -0.78$, $r = -0.44$, $p < 0.0001$) but
193 not for females ($p = 0.09$) or the whole population ($p = 0.88$). No significant effect of gender
194 was observed concerning $\text{IRSV}_{\text{flat}}$ ($p = 0.23$) and $\text{IRSV}_{\text{uphill}}$ ($p = 0.15$).

195

196 **DISCUSSION**

197

198 While all triathletes adopted a positive pacing strategy during the run leg of the 2009
199 European Triathlon Championships (*i.e.* positive-split), the present results demonstrated that
200 the best runners tended to adopt a more even paced strategy. This finding extended previous
201 results⁶ collected during individual time-trial triathlons by suggesting that triathletes should
202 avoid an aggressive fast-start pacing strategy during mass-start competitions. Furthermore,
203 results of the present study also indicate that the more successful competitors during this
204 event also slowed to a lesser degree on uphill sections of the course.

205 In the present study, athletes performed the first lap of the run significantly faster than
206 the remaining three laps (Table 1). After the first lap both males and females decreased their
207 average running speed by 0.5 km.h^{-1} (*i.e.* 3.1%) and 0.7 km.h^{-1} (*i.e.* 3.9%), respectively (Table
208 1). Thereafter, the difference in mean running speed did not vary more than 0.2 km.h^{-1} over
209 the remaining laps. These results support previous research conducted during World Cup
210 triathlon events which highlighted similar systematic fast start pacing strategies during short-
211 to middle- distance competitions^{3,4,5}. Nevertheless, the effectiveness of such positive pacing
212 during the running section of a triathlon event remains unclear. Indeed, it has previously been
213 shown that a fast start pacing strategy may improve, hinder or have no effect on athletic
214 performance.¹ Despite this, Hausswirth et al⁶ recently showed that performing the first
215 kilometre of a simulated time-trial triathlon 5% slower than the average pace of a 10-km
216 control run resulted in significant improvements in performance, when compared a relatively

217 fast start (*i.e.* first kilometre 5% faster than the average pace of a 10-km control run). In this
218 study, Hausswirth et al.⁶ hypothesised that the relatively slow start may have prevented
219 development of high physiological stress early in the exercise bout thereby preventing athletes
220 from considerably slowing later in the event. Results of the present study indicate that this
221 strategy is also viable for major mass-start international triathlons, as a significant inverse
222 correlation was found between running speed variability and mean running speed over the 10-
223 km triathlon run ($r = -0.76$, $p < 0.0001$). This correlation was also significant when
224 considering both genders independently ($r = -0.41$, $p < 0.01$ and $r = -0.65$, $p < 0.001$ for
225 females and males, respectively). Considering that all triathletes adopted a fast running speed
226 at commencement of the run (Fig. 1), it appears that the better performers demonstrated a
227 greater ability to limit decrements in running speed throughout the later stages of the race.

228 Since all triathletes in the present study self-selected a relatively fast-starting strategy
229 and better performers were able to maintain a more even pacing strategy over the entire run, it
230 may be suggested that elite triathletes should reduce their spontaneous initial running speed in
231 order to improve overall performance. However, it should also be noted that the high intensity
232 at the beginning of the run phase may be a tactical technique adopted by triathletes in order to
233 stay in the same group/pack as their direct opponents. Conversely, Tucker et al.⁹ analyzed the
234 evolution of pacing during 32 consecutive world records of the 5 km performed over the past
235 century and suggested that pacing strategy might be associated with a cultural learning
236 process. Their results revealed that since 1920, running speed variability in the 5 km world
237 record has progressively decreased. Furthermore, the pacing select by world record holders
238 has shifted from a “reverse J-shaped” strategy¹ towards a more even strategy, suggesting that
239 the pacing strategy of elite athletes’ may be optimized over decades. The systematic fast start
240 adopted by triathletes during the cycle-to-run transition in competitions^{3,4,5} and multi-
241 transition training sessions¹⁰ may therefore be associated with a learnt template of

242 performance, rather than an optimal strategy. Further research is needed in order to gain a
243 greater understanding as to the influence of unconscious/physiological and
244 conscious/emotional (i.e. motivation and tactics) factors influencing pacing strategies during
245 elite athletic competition.

246 In addition to maintaining a more even pacing strategy over the entire event, the
247 results of the present study showed that top performers slowed to a lesser degree on the uphill
248 section of the course, as evidenced by a significant relationship between running speed
249 variability and performance within laps. It has previously been shown, with the use of
250 mathematical models^{11,12} and actual performance trials¹³, that increasing energy expenditure
251 to counter periods of high external resistance (i.e. uphill and into a headwind) and decreasing
252 expenditure when resistance is low (i.e. downhill and with a tailwind) results in meaningful
253 improvements in performance. Since energy expenditure or power output varies, this theory
254 has previously been termed a 'variable pacing strategy'^{1,13} however such variation is
255 performed in an attempt to maintain an even pace/speed. As a result, the better runners in the
256 present study tended to adopt a more even pacing strategy when compared with the less
257 successful athletes. Since such strategy may be dependent of the circuit design (i.e. uphill and
258 downhill lengths and grades), further investigations are necessary to determine the
259 acceptability of running speed variation over hilly course.

260 Interestingly, the relative difference in running speed observed between uphill and flat
261 sections in the present study was 18.9% for females, while males slowed down by only 5.9%
262 ($P<0.001$). This difference is likely to explain the higher running speed variability over the
263 whole run observed by females, compared with males ($r = -0.41, p = 0.009$ and $r = -0.65, p =$
264 0.002, respectively). The greater influence of uphill sections on running speed variability in
265 female triathletes may be linked to a lower power-to-mass ratio and thus a greater influence of
266 changes in gradient on running speed. Le Meur et al⁵ recently reported that female triathletes

267 (with similar level of performance of the ones in the present race) spent relatively more time
268 than males above their maximal aerobic power in the hilly sections of the cycling circuit.
269 These authors proposed that females were disadvantaged by their lower power-to-mass ratio,
270 which was correlated with the time spent above their maximal power output in uphill sections
271 ($r=-0.73$, $P < 0.05$). In this perspective, the present research furthers previous research
272 collected during the cycling leg of world cup triathlon⁵ by demonstrating that female
273 triathletes should focus on their aptitude for running over incline sections by improving their
274 running skills or their power-to-mass ratio.¹⁴

275 Interestingly, the variability in running velocity of both males and females over the
276 entire run increased significantly over the four running laps (Fig. 2). As such it appears that
277 athletes pacing strategy become significantly less even as the trial progressed. The factors
278 responsible for such increases in the variability of pace are currently unclear, however it has
279 been suggested that greater fluctuations in speed later in the event may be related to the
280 development of fatigue and associated alterations in neural drive.¹⁵ Supporting this, it has
281 recently been found that the variability in power output during a 40 km cycling time trial may
282 be significantly greater in hot (32°C) compared with cool (17°C) climates.¹⁵ This study
283 hypothesized that the increase in the variability of power output in conditions of high
284 physiological stress (i.e. exercise in the heat) was related to alterations in afferent feedback,
285 arousal and central drive.¹⁵ Indeed, it has been suggested that brain continuously performs
286 subconscious calculations by comparing the physiological demands of an exercise task with
287 the athlete's physiological capacity, and the level of motivation, in order to insure that the
288 exercise can be maintained for the expected duration without any catastrophic failure in
289 physiological and emotional homeostasis¹⁵. As a result, triathletes in the present study may
290 have experienced difficulties to sustain a constant pace later in the run due to high negative
291 load associated with increases in perceive exertion/fatigue. Further research is warranted in

292 order to better understand the factors influencing the variability speed and energy expenditure
293 during exercise.

294 While previous field-based studies^{3,4,5} have shown that triathletes adopted a systematic
295 positive pacing strategy, the high number of split times measured in the present research (*i.e.*
296 20) allowed a more accurate description of running speed evolution during the triathlon and
297 revealed that 39% of the finishers of the present race demonstrated an “end-spurt”. The video
298 analysis revealed that the majority of these competitors were packed at the penultimate split
299 point (571m previous the finish line), which likely resulted in increasing intensity in the final
300 section to complete the race ahead their direct opponents. This observation confirmed that the
301 presence of other competitors influence pacing strategy by suggesting that the global positive
302 pacing systematically adopted by triathletes may shift towards a “reverse J-shaped” strategy
303 depending on race dynamics. Given the high percentage of triathletes that displayed a final
304 increase in running speed, it appears that elite triathlon performance is associated with a
305 capacity to sprint at the end of the 10-km run.

306

307 **Conclusion**

308 This study demonstrated that the running performance (and overall performance)
309 during an international triathlon is correlated with running speed variability. Top female and
310 male international triathletes demonstrated a trend to adopt a more even pace, whereas less
311 successful athletes chose an unreasonably aggressive pacing pattern over the initial phase of
312 the run resulting in a significant subsequent decrease in running speed.

313

314 **Practical applications**

315 The present research showed that elite triathletes should reduce their initial running
316 speed during international competitions, even if high level of motivation and direct opponents

317 lead them to adopt an aggressive start. In this regard, more research is required to observe the
318 way in which triathletes develop their pre-exercise strategy and which intervention could
319 influence their initial starting effort to optimize their running performance level. This study
320 also highlighted that elite triathlon performance may be associated with the capacity to sprint
321 at the end of the 10-km run and that female triathletes should focus on their aptitude for
322 running over incline sections by improving their running skills or their power-to-mass ratio.

323

324 **Acknowledgments**

325 This study was made possible by technical support from the French National Institute of
326 Sport, Expertise and Performance, the French Federation of Triathlon and the Universities of
327 Nice and South Toulon-Var. The authors are especially grateful to the French coaches for
328 their help and cooperation.

329 **REFERENCES**

- 330
- 331 1. Abbiss CR, Laursen PB. Describing and understanding pacing strategies during athletic
332 competition. *Sports Med.* 2008;38:239-252.
- 333 2. Tucker R. The anticipatory regulation of performance: The physiological basis for pacing
334 strategies and the development of a perception-based model for exercise performance. *Br J
335 Sports Med.* 2009;43:392-400.
- 336 3. Vleck VE, Bürgi A, Bentley DJ. The consequences of swim, cycle, and run performance on
337 overall result in elite Olympic distance triathlon. *Int J Sports Med.* 2006;27:43-48.
- 338 4. Vleck VE, Bentley DJ, Millet GP, Bürgi A. Pacing during an elite Olympic distance
339 triathlon: comparison between male and female competitors. *J Sci Med Sport.* 2008;11:424-
340 432.
- 341 5. Le Meur Y, Hausswirth C, Dorel S, Bignet F, Brisswalter J, Bernard T. Influence of gender
342 on pacing adopted by elite triathletes during a competition. *Eur J Appl Physiol.* 2009;106:535-
343 545.
- 344 6. Hausswirth C, Le Meur Y, Bieuzen F, Brisswalter J, Bernard T. Pacing strategy during the
345 initial phase of the run in triathlon: influence on overall performance. *Eur J Appl Physiol.*
346 2010;108:1115-1123.
- 347 7. Baron B, Moullan F, Deruelle F, Noakes TD. The role of emotions on pacing strategies and
348 performance in middle and long duration sport events. *Br J Sports Med.* In press.
- 349 8. Peveler WW, Green M. The Effect of Extrinsic Factors on Simulated 20-km Time Trial
350 Performance. *J Strength Cond Res.* 2009. In press.
- 351 9. Tucker R, Dugas A, Fitzgerald M. *The Runner's Body: How the Latest Exercise Science
352 Help you Run Stronger, Faster.* New York, Rodale Books (ed.). 2009.

- 353 10. Millet GP, Vleck VE. Physiological and biomechanical adaptations to the cycle to run
354 transition in Olympic triathlon: review and practical recommendations for training. *Br J
355 Sports Med.* 2000;34:384-90
- 356 11. Atkinson G, Peacock O, and Passfield L. Variable versus constant power strategies during
357 cycling time-trials: prediction of time savings using an up-to-date mathematical model. *J
358 Sports Sci.* 2007;25(9):1001-9.
- 359 12. Atkinson, G. and B. Edwards. Pacing strategy and cycling performance: Field data from
360 the 1997 British 16 km time-trial championship. in Proceedings of the Third Annual Congress
361 of the European College of Sports Science. Liverpool: Centre for Health Care
362 Development.1998.
- 363 13. Swain DP. A model for optimizing cycling performance by varying power on hills and in
364 wind. *Med Sci Sports Exerc.* 1997;20:1104-1108.
- 365 14. Davison RC, Swain D, Coleman D, Bird S. Correlates of simulated hill climb cycling
366 performance. *J Sports Sci.* 2000;18:105-110.
- 367 15. Peiffer JJ, Abbiss CR (in review) Influence of environmental temperature on 40 km
368 cycling time trial performance.
- 369
- 370

TABLE 1. Evolution of running speed throughout the running leg over the whole circuit, flat sections and uphill sections for female and male triathletes ($n = 39$ and $n = 56$ for females and males, respectively). * Significantly different from Lap1, $p < 0.0001$. # Significantly different from previous lap, $p < 0.0001$. Females demonstrated significant differences with males over each lap in running speed and relative decrease in running speed between flat and uphill sections.

Gender	Circuit sections	Overall run	Lap1	Lap2	Lap3	Lap4
Female	Whole (km.h ⁻¹)	15.6 ± 1.0	16.1 ± 1.0	15.6 ± 1.0 ^{*#}	15.4 ± 1.0 [*]	15.5 ± 1.1 [*]
	Flat (km.h ⁻¹)	16.1 ± 1.0	16.5 ± 1.0	16.1 ± 1.0 ^{*#}	16.0 ± 1.0 ^{*#}	16.1 ± 1.0 [*]
	Uphill (km.h ⁻¹)	13.1 ± 0.9	14.0 ± 1.2	13.0 ± 0.9 ^{*#}	12.7 ± 0.8 ^{*#}	12.7 ± 0.8 [*]
	Δflat/uphill (%)	18.9 ± 1.2	15.0 ± 0.5	19.2 ± 0.3 ^{*#}	20.2 ± 0.3 [*]	20.7 ± 0.3 [*]
Male	Whole (km.h ⁻¹)	17.4 ± 1.1	18.0 ± 1.4	17.3 ± 1.2 ^{*#}	17.1 ± 1.1 ^{*#}	17.3 ± 1.0 [*]
	Flat (km.h ⁻¹)	17.6 ± 1.1	18.1 ± 1.2	17.4 ± 1.2 ^{*#}	17.3 ± 1.1 ^{*#}	17.5 ± 1.1 [*]
	Uphill (km.h ⁻¹)	16.6 ± 1.1	17.4 ± 1.7	16.6 ± 1.6 ^{*#}	16.3 ± 1.2 ^{*#}	16.2 ± 1.2 [*]
	Δflat/uphill (%)	5.9 ± 2.5	4.4 ± 0.5	4.5 ± 0.8	6.2 ± 0.4	8.0 ± 0.4 ^{*#}

For Peer Review

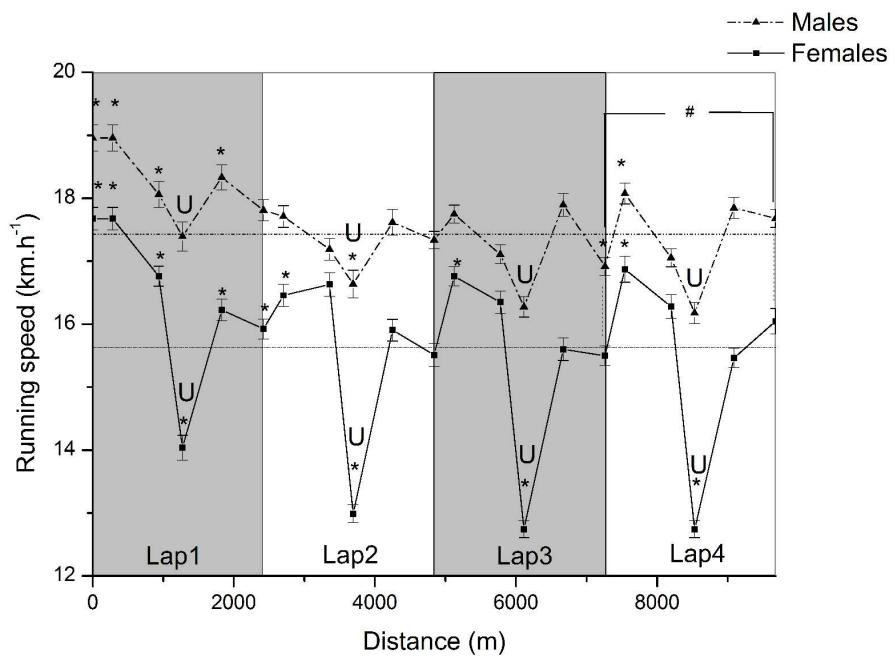


FIGURE 1. Average running speed for each of the running sections for elite female (n=39) and male triathletes (n=55) during the European Triathlon Championships. U: uphill sections (sections without any indication were flat). *Significantly different from the mean running speed over the whole circuit. #Significantly different from the speed over the same section during previous lap.

296x207mm (600 x 600 DPI)

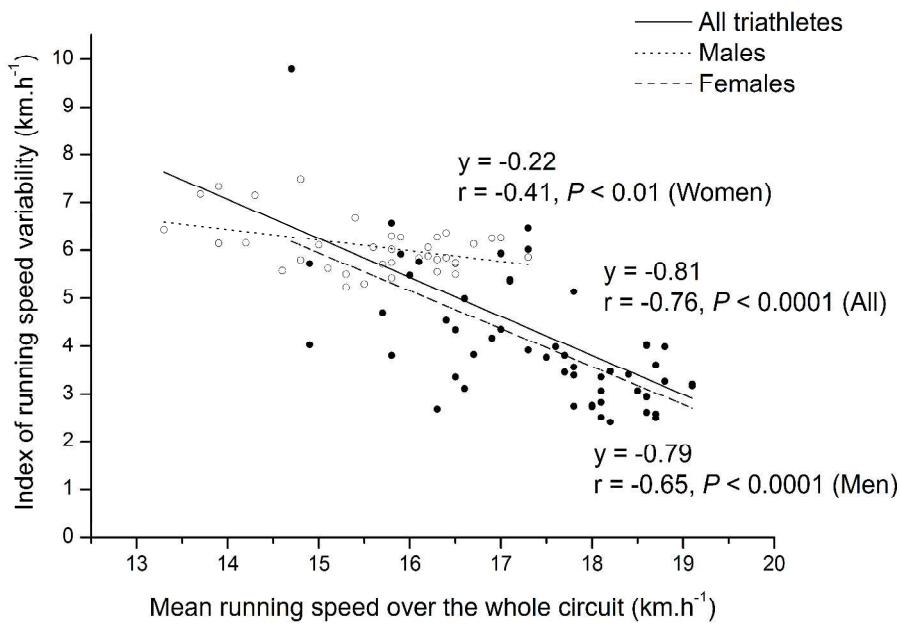


FIGURE 2. Index of running speed variability over the whole running section for senior males (n=55), females (n=39) and all triathletes during the European Triathlon Championships.
296x207mm (600 x 600 DPI)

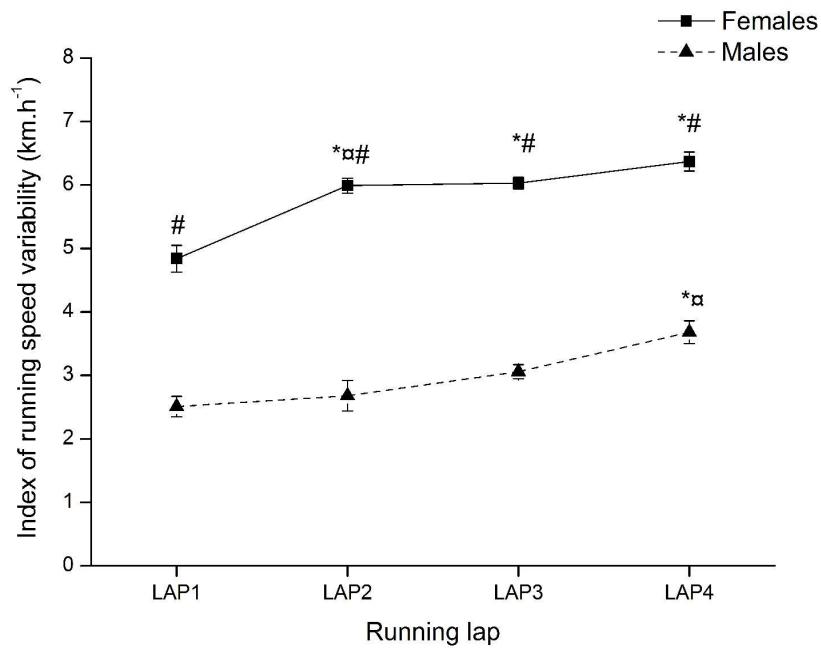


FIGURE 3. Average index of running speed variability for each of the four laps for elite female (n=39) and male triathletes (n=55) during the European Triathlon Championships.

* Significantly different from Lap1,
x Significantly different from previous lap,
Significantly from men.
296x207mm (600 x 600 DPI)

Rapport du Professeur Charles-Yannick Guezennec sur le document écrit pour la soutenance de thèse de Mr Yann Le Meur intitulé « Les stratégies d'allure dans la performance sportive de haut niveau : analyse des variables et exposé des phénomènes explicatifs »

Ce travail de thèse s'attache à une question posée en pratique du triathlon et des sports de longue distance en général qui concerne les effets de la stratégie d'allure sur la performance. Cette question revêt un double aspect, d'une part appliquée sur les choix de conseils à l'entraînement et d'autre part fondamental sur les mécanismes physiologiques impliqués dans la régulation du niveau de l'effort. Cette problématique est remarquablement bien posée par l'introduction et les rappels très complets associés. Cette partie bénéficie d'une mise à jour actualisée, on constate qu'en plus d'une analyse exhaustive de la littérature passée, elle s'appuie sur l'analyse de travaux de 2010. Ce point mérite d'être souligné car il traduit une véritable attitude de chercheur de la part de ce candidat qui poursuit une veille proactive des données les plus récentes. L'impression générale du document et de l'évolution des travaux montre que la préoccupation initiale était plutôt celle d'un entraîneur de haut niveau en charge du conseil d'athlètes et que l'on évolue au fil des publications vers un chercheur posant des questions de physiologie fondamentale. La totalité des facteurs physiologiques et neurophysiologiques connus pour être impliqués sur la performance et la régulation d'allure sont très clairement exposés à tel point que c'est une arme à double tranchant dans la mesure où l'on s'attend à ce qu'il soient tous abordés dans la partie expérimentale. Le chapitre consacré à la difficulté d'effort perçu est celui qui permet une critique sur les choix de présentation des données. La sémantique elle-même reflète cette difficulté car au-delà de la perception de l'effort cette question est celle de la fatigue centrale qui est au centre d'un réel débat physiologique. L'auteur de la thèse élude ce débat en s'appuyant principalement sur les travaux de Tucker qui sont surtout basés sur l'anticipation de l'effort. Il aurait été peut être utile de mentionner le fait que la notion de « central governor » est au centre d'une controverse très actuelle entre les partisans et adversaires de cette théorie, par exemple l'échange entre R.Shephard et F. Marino dans Sports Med.. Que faut il retirer de ce débat qui pourrait éclairer le travail présenté ici. En premier lieu les limites de l'abord EMG pour affirmer la fatigue centrale, ensuite la discussion sur la réelle existence d'un plateau de débit cardiaque à l'effort maximal et la limitation due à la conductance de l'oxygène. Le chapitre sur les effets des drogues psycho actives est lui aussi en partie incomplet car il ne mentionne

pas les études négatives, notamment celles de l'équipe de Romain Meeusen qui laissent planer un doute sur la théorie sérotoninergique de la fatigue Centrale.

Les limites de l'abord expérimental sont cependant bien fixées par l'exposé des hypothèses et objectifs, on voit apparaître les trois parties, l'abord descriptif du phénomène étude 1,2 et 4, une étude d'intervention pour évaluer le poids d'un facteur stratégie d'allure sur la performance et une étude à visée explicative N° 5. Concernant les méthodes il pourrait être intéressant de développer le choix de la validation et de l'usage du système Polar RS800 pour mesurer la vitesse. La validation a été effectuée sur tapis roulant, le principe du RS800 est basé sur la mesure de la fréquence et de la longueur de foulée. On peut se poser la question de la précision de la mesure en terrain variée avec des rapides changements de pente. Par ailleurs il pourrait être intéressant d'expliquer rapidement le choix de cette méthode plutôt que celle d'un système GPS. Cette question se pose plus par curiosité scientifique que par une critique de la validité des choix.

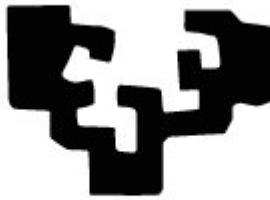
Concernant les résultats, ceux des études 1 et 2 sont particulièrement remarquables et utiles pour la communauté scientifique du fait qu'ils ont été recueillis en compétition. Ils vont pouvoir servir de base indiscutable pour conseiller les triathlètes sur la base des mesures réalisées en laboratoire. L'étude 2 sert de support à la problématique de la 3 ce qui souligne la cohérence de l'ensemble des travaux. L'étude 3 est la plus aboutie sur le plan méthodologique et des résultats. On passe de l'observation à une vérification des hypothèses. L'étude 4 souligne le rôle de la variabilité et soulève la question qui relie les 3 expérimentations de terrain sur les capacités de récupération pour des variations d'allure entre les différents niveaux de métabolisme. L'étude 5 est la plus ambitieuse dans ses objectifs elle s'attaque au problème actuellement non résolu du mécanisme de la fatigue lors des efforts prolongés. La stabilité des paramètres EMG et le fait que les valeurs maximales cardiaques ou ventilatoires ne soient pas atteintes est en faveur d'un mécanisme central. Il faut quand même tenir compte de la limite de l'interprétation de l'EMG déjà évoquée. L'EMG est un moyen imparfait pour déterminer le niveau d'activation du cortex moteur et la totalité de la commande motrice.

Au regard des résultats il est certain que la conductance de l'oxygène à l'étape ventilatoire ou cardiaque n'est pas le facteur limitant ; Par contre rien ne permet d'exclure un facteur musculaire. Par exemple une augmentation de température qui perturbe la fonction mitochondriale, un facteur inflammatoire consécutif à l'enchaînement des épreuves. Il aurait été intéressant de mesurer l'évolution de la force max à l'issue des différentes situations expérimentales. Un test de détente verticale ou un CMJ auraient peut être indiqué une altération des processus contractiles. Malgré ces questions il semble tout à fait réaliste que le

Le système nerveux central joue un rôle sur les processus de fatigue. Un point qui ressort de l'ensemble des études reste un peu dans l'ombre lors de la discussion générale, il semble que la capacité de récupérer des efforts entre SV2 et PMA soit un élément de la performance, même si l'analyse des stratégies d'allure semble pénaliser la stratégie décroissante. Je me pose la question des mécanismes de la récupération, notamment pour les femmes qui sont obligées d'atteindre la PMA lors des ruptures de pente en cyclisme. On peut faire l'hypothèse que cette récupération incomplète passe probablement par les mécanismes de resynthèse des phosphagènes, c'est la que le facteur température est le plus pénalisant. Sur le plan de la signalisation centrale on peut se poser la question de savoir si le rapport ATP/AMP/Pi n'est pas pris en compte par des voies afférentes. Des hypothèses anciennes ont été formulées dans ce sens pour expliquer la prise en compte du métabolisme musculaire à l'étage ventilatoire. Il serait peut être intéressant d'étudier la cinétique VE, VT et fréquence à court terme lors des variations rapides de puissance.

Au total il s'agit d'un travail remarquable en tous points ce qu'atteste le niveau des publications. Ce candidat a largement dépassé le niveau requis pour un Doctorat. La démarche scientifique est très cohérente les questions se succèdent bien et chaque expérimentation vient répondre aux questions posées par la précédente.

Ce candidat peut soutenir la présentation orale de son Doctorat.



Universidad
del País Vasco

Euskal Herriko
Unibertsitatea

**RAPPORT SUR LES TRAVAUX PRÉSENTÉS PAR MONSIEUR YANN LE
MEUR EN VUE DE L'OBTENTION DU GRADE DE DOCTEUR DE
L'UNIVERSITÉ DE NICE – SOPHIA ANTIPOLIS**

Les stratégies d'allure dans la performance sportive de haut niveau : analyse des variabilités et exposé des phénomènes explicatifs

Commentaires généraux

Cette thèse a pour objectif l'étude des stratégies d'allure adoptées dans le cadre d'une discipline Olympique de longue durée : le triathlon. Le candidat a tout d'abord encadré cette thèse en faisant une revue des facteurs de la performance en triathlon de distance Olympique (consommation maximale d'oxygène, seuils métaboliques, coût énergétique de la locomotion, facteurs neuromusculaires), une description approfondie sur les modèles des stratégies d'allure et les facteurs qui ont une influence sur ces stratégies (caractéristiques de l'activité pratiquée, facteurs physiologiques, facteurs neurophysiologiques et perceptuels, facteurs environnementaux, facteurs tels que le sexe, l'ethnie, les aspects socio-culturels), et une description d'un modèle explicatif des stratégies d'allure.

Dans une deuxième partie expérimentale, le candidat a évalué la distribution de la puissance de pédalage lors de la partie cycliste d'une épreuve de coupe du monde de triathlon, l'influence du sexe sur le choix des stratégies d'allure lors d'une épreuve internationale de triathlon, l'influence de la stratégie d'allure adoptée au départ de la course à pied sur la performance globale en triathlon, les relations entre performance et stratégie d'allure en course à pied lors d'un triathlon international, et l'évolution des paramètres métaboliques, neuromusculaires, biomécaniques et perceptuels lors d'une épreuve cyclisme-course à pied menée à l'épuisement volontaire par des triathlètes entraînés.

Enfin, le candidat a fait une discussion générale avec une description des stratégies d'allure dans les trois disciplines du triathlon, une discussion sur l'optimisation des stratégies d'allure en triathlon de haut niveau, une approche multicentrique de la fatigue

pour essayer de comprendre les stratégies d'allure en triathlon, et une conclusion générale avec des perspectives scientifiques.

Le candidat doit être félicitée car cette thèse fait avancer la connaissance sur les stratégies d'allure dans la performance sportive de haut niveau en général, et du triathlon de distance Olympique en particulier. Monsieur Le Meur fait preuve dans son travail d'une excellente maîtrise du sujet principal abordé dans la thèse, ainsi que des techniques nécessaires pour mener à bien les études qui font partie de cet travail. Les objectives des travaux expérimentaux sont bien décrits, et les méthodes utilisées aussi, les résultats bien présentés et discutés sur la base des connaissances apportées dans la littérature scientifique.

Le cadre théorique est écrit de manière claire et concise, et il a un intérêt indubitable pour ceux qui s'intéressent aux aspects physiologiques de la performance en triathlon de distance Olympique. Bien que l'étude soit solide et assez complète, la partie sur le coût énergétique de la locomotion est un peu pauvre par rapport aux autres parties, et le modèle explicatif des stratégies d'allure manque peut-être d'aspect critique, puisqu'il ne reflète pas de façon équilibrée l'état actuel des connaissances dans ce domaine. En effet, quelques références critiques avec le modèle présenté ne sont pas considérées dans ce travail.

Il n'y pas besoin de discuter la qualité de la partie expérimentale, étant donné que cette partie a donné lieu à la publication de plusieurs articles dans des revues scientifiques internationales à comité de lecture, ainsi que des présentations dans des congrès internationaux avec actes. Le candidat a aussi d'autres publications dans des revues internationales et des livres sur des sujets qui ne sont pas en rapport avec ces travaux de thèse, ce qui montre que ses connaissances dans le domaine des sciences du sport ne sont pas limitées aux travaux ici présentés.

Compte tenu de l'ensemble de ces remarques et de la qualité du document présenté, j'émets un avis favorable à la soutenance de la thèse de Monsieur Yann LE MEUR.

Dr. Iñigo Mujika

2 Décembre, 2010



Rapport de Soutenance de thèse

Jeudi 16 décembre 2010

Monsieur Yann Le Meur

Dans un premier temps monsieur Le Meur a présenté ses travaux sur les facteurs d'influence des stratégies d'allure lors d'un exposé de 55 minutes très didactique et bien documenté, ensuite Monsieur le Meur a répondu aux questions du jury au cours d'un entretien d'environ 2H00.

Monsieur Mujika, premier rapporteur après avoir félicité le candidat pour la qualité de son travail écrit et oral a interrogé le candidat sur plusieurs points méthodologiques qui pourraient limiter la généralisation et l'exploitation des résultats présentés, cet échange a permis à Monsieur Le Meur de montrer sa connaissance des intérêts et limites des protocoles mis en place ainsi que des outils utilisés. Puis le Professeur Guezennec second rapporteur après avoir également félicité le candidat sur la qualité du travail, a questionné le candidat sur le système de régulation présenté en demandant à Monsieur Le Meur de préciser la nature des capteurs de ce système, du système d'intégration. Cette partie a permis d'aborder un certains nombres de notions de physiologie intégrée propres aux systèmes de régulation et de faire le lien avec le modèle proposé dans ce travail de thèse. Le Professeur Millet a continué cet échange sur le système de régulation proposé en demandant notamment au candidat de confronter son modèle à celui proposé par Marcora et al. (J Appl Physiol. 2009), cet échange a permis à monsieur Le Meur de préciser les facteurs d'influence de la perception de l'effort et l'influence de ceux ci sur son modèle. Par la suite le Professeur Toussaint a questionné le candidat sur un certains nombre de points relatifs à la possibilité d'amélioration des performances en utilisant notamment le cadre méthodologique des études épidémiologiques.

G. Reillet *J. Bernaud* *C. Hausswirth*
JF. Toussaint *G. Guezennec* *I. Mujika* *T. Millet*

Le directeur de Thèse monsieur Hausswirth et le co directeur Monsieur Bernard ont ensuite rappelé la qualité du travail du candidat, l'importance de sa capacité de travail et de son autonomie et Monsieur Hausswirth a interrogé le candidat sur les perspectives d'étude des stratégies d'allure chez le sujet surentraîné. Enfin pour conclure le Professeur Brisswalter, président du jury a souligné l'excellence du travail scientifique associé à cette thèse et a interrogé le candidat sur l'influence des théories issues de la psychologie du travail sur son modèle et sur les facteurs neurophysiologiques présentés dans le modèle de Nybo et al. (Progress in Neurobiology, 2004) qui pourraient influencer la perception de l'effort.

Dans toute cette partie de questionnement, monsieur Le Meur a fait preuve d'une grande connaissance de la littérature scientifique et a montré sa capacité à prendre du recul par rapport à ses résultat et le modèle choisi dans ce travail.

Le jury a donc décidé, de lui délivrer le titre de docteur en Sciences du Mouvement Humain de l'Université de Nice Sophia Antipolis avec la mention très honorable et a tenu à l'unanimité à féliciter le candidat pour la qualité de son travail.

J. POUSSIN

G. RULLV
GOFFRAUÉC

T. BERNARD
I. MUJIKI

C. HAUSSWIRTH
T. BRISWALTER