



HAL
open science

Variabilités des profils de puissance en cyclisme et leur influence en course à pied chez des triathlètes en préparation olympique

Christophe Hausswirth

► **To cite this version:**

Christophe Hausswirth. Variabilités des profils de puissance en cyclisme et leur influence en course à pied chez des triathlètes en préparation olympique. [Rapport de recherche] Rapport de recherche n° 08-013, Institut National du Sport, de l'Expertise et de la Performance (INSEP). 2011. hal-01988900

HAL Id: hal-01988900

<https://insep.hal.science//hal-01988900>

Submitted on 22 Jan 2019

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

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

VARIABILITÉS DES PROFILS DE PUISSANCE EN CYCLISME ET LEUR INFLUENCE EN COURSE À PIED CHEZ DES TRIATHLÈTES EN PRÉPARATION OLYMPIQUE

Christophe HAUSSWIRTH¹

(a fait l'objet des travaux de thèse de Yann Le Meur)



COLLABORATEURS SCIENTIFIQUES

Y. LE MEUR¹
S. DOREL^{1,2}
T. BERNARD³
C.R. ABBISS⁴
J. BRISSWALTER³

COLLABORATEURS FEDERAUX

F. BIGNET⁵
G. HONNORAT⁵
P. FATTORI⁵

TRAVAIL EFFECTUE PAR

1. Service Recherche, INSEP, France

EN COLLABORATION AVEC

2. Laboratoire « Motricité, Intéractions Performance », Université de Nantes, France
3. Laboratoire « Motricité Humaine, Education Sport Santé », Université de Nice Sophia Antipolis, France
4. School of Exercise, Biomedical and Health Sciences, University Edith Cowan, Joondalup, Australie
5. Fédération Française de Triathlon, La Plaine Saint Denis, France

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

Publications dans des revues scientifiques internationales à comité de lecture

Hauswirth 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, Hauswirth 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, Hauswirth 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.

Hauswirth 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 & Hauswirth C. Relationships between triathlon performance and pacing strategy during the run of an international competition. *International Journal of Sports Physiology and Performance*. 2011; 6:183-194.

Le Meur Y, Dorel S, Rabita G, Bernard T, Brisswalter J & Hauswirth C. Spring masse behavior and electromyographic activity evolution during a cycle-run test to exhaustion in triathletes. *Journal of Electromyography and Kinesiology*. En révision majeure.

Présentations dans des congrès internationaux avec actes

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

TABLE DES MATIERES

INTRODUCTION GENERALE	1
CADRE THEORIQUE	5
1. La modélisation des stratégies d'allure.....	6
1.1. Les stratégies d'allure décroissante.....	6
1.1.1. Les stratégies d'allure décroissante avec départ à intensité sous-maximale	6
1.1.2. Les stratégies d'allure décroissante avec départ à intensité maximale	9
1.2. Les stratégies d'allure croissante.....	10
1.3. Les stratégies d'allure constante	12
1.4. Les stratégies d'allure parabolique.....	13
1.5. Les stratégies d'allure variable	14
1.6. Les stratégies d'allure en triathlon distance Olympique	16
2. Les facteurs d'influence des stratégies d'allure	19
2.1. Les caractéristiques intrinsèques de l'activité sportive pratiquée	19
2.1.1. La durée de l'épreuve	19
2.1.2. L'influence des résistances à l'avancement.....	20
2.2. Les facteurs physiologiques.....	21
2.2.1. Les paramètres métaboliques	21
2.2.2. Les paramètres thermorégulateurs.....	25
2.2.3. Les paramètres musculaires	30
2.3. Les facteurs neurophysiologiques et perceptuels	32
2.3.1. L'état affectif et le niveau de motivation	33
2.3.2. Les feedbacks.....	38
2.3.3. Le niveau d'expérience	40
2.4. Les facteurs environnementaux	42
2.4.1. Le vent et les courants marins.....	42
2.4.2. Le profil du parcours.....	43
2.5. Les autres facteurs d'influence.....	45
2.5.1. Le sexe	45
2.5.2. Les facteurs anthropométriques	45
2.5.3. Les facteurs socio-culturels	47
3. Vers un modèle explicatif des stratégies d'allure	49
3.1. La difficulté d'effort perçue : le paramètre clé ?	49

3.1.1. La difficulté d'effort perçue, variable régulatrice de la performance lors des exercices à intensité constante	49
3.1.2. La difficulté d'effort perçue, variable régulatrice de la performance et des systèmes physiologiques lors des exercices librement gérés	51
3.2. Le modèle « Anticipation – Difficulté d'Effort Perçue – Feedbacks » (Tucker, 2009)	53
3.2.1. Application aux exercices à intensité fixe	53
3.2.2. Application aux exercices librement gérés	55
3.2.3. Application aux protocoles imposant une difficulté perçue constante	59
3.2.4. Application au paradoxe de l'accélération finale	61
3.2.5. Application aux effets des drogues psycho-actives sur la performance	62
3.2.6. Application aux protocoles manipulant les informations fournies aux sujets	63
3.3. Stratégie d'allure et compréhension de la fatigue aiguë engendrée par l'exercice : intérêts et limites du modèle du Gouverneur Central (Noakes et al. 2004)	65
3.3.1. Le modèle du Gouverneur Central	65
3.3.2. Critiques du modèle du Gouverneur Central	68
HYPOTHESES DE TRAVAIL & OBJECTIFS DE LA RECHERCHE	76
MATERIELS ET OUTILS UTILISES LORS DES TRAVAUX EXPERIMENTAUX	79
1. Recueil des variables cinématiques et biomécaniques	80
1.1. Mesure de la vitesse en natation (étude 2)	80
1.2. Mesures de la vitesse, de la cadence et de la puissance de pédalage en cyclisme (études 1,2 et 5) .	80
1.2.1. En laboratoire	80
1.2.2. En compétition	81
1.3. Mesure de la vitesse en course a pied (études 2, 3, 4 et 5) et validation du système Polar RS800sd®	81
1.3.1. En laboratoire	81
1.3.2. En compétition	81
1.4. Mesure des temps de contact et de vol en course à pied (étude 5)	82
2. Recueil des variables métaboliques	82
2.1. Recueil des échanges gazeux et respiratoires (etudes 1, 2, 3 et 5)	82
2.2. Mesure de la fréquence cardiaque (études 1, 3 et 5)	83
2.3. Mesure de la lactatémie (etudes 4 et 5)	83
3. Recueil des variables électromyographiques (étude 5)	83
4. Recueil des variables perceptuelles	84
PRESENTATION DES TRAVAUX EXPERIMENTAUX	85
1. Etude n°1 : Distribution de la puissance de pédalage lors de la partie cycliste d'une épreuve de coupe du monde de triathlon (publiée dans <i>Medicine & Science in Sports & Exercise</i>, 2009, 41 :1296-1302)	86

1.1.	But de l'étude	87
1.2.	Méthodes	87
1.2.1.	Sujets	87
1.2.2.	Evaluations en laboratoire.....	88
1.2.3.	Evaluation lors de la compétition	89
1.3.	Analyse statistique.....	90
1.4.	Résultats	90
1.4.1.	Vitesse, cadence, puissance de pédalage et fréquence cardiaque durant la compétition	90
1.4.2.	Puissance de pédalage et fréquence cardiaque durant la compétition au regard des tests maximaux réalisés en laboratoire	92
1.5.	Discussion partielle.....	93
2.	Etude n°2 : Influence du sexe sur le choix des stratégies d'allure lors d'une épreuve internationale de triathlon (publiée dans <i>European Journal of Applied Physiology</i>, 2009, 106 :535-545).....	95
2.1.	But de l'étude	96
2.2.	Méthodes	97
2.2.1.	Mesures réalisées avant la compétition	97
2.2.2.	Mesures réalisées durant la compétition	97
2.3.	Analyse statistique.....	99
2.4.	Résultats	99
2.4.1.	Performance globale et position	99
2.4.2.	Section natation.....	100
2.4.3.	Section cyclisme	100
2.4.4.	Section course à pied.....	102
2.5.	Discussion partielle.....	104
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 (publiée dans <i>European Journal of Applied Physiology</i>, 2010, 108 :1115-1123).....	105
3.1.	But de l'étude	106
3.2.	Méthodes	106
3.2.1.	Test maximal en course à pied	107
3.2.2.	Course contrôle	107
3.2.3.	Compétitions de triathlon	108
3.3.	Analyse statistique.....	109
3.4.	Résultats	110

3.4.1. Charge d'entraînement	110
3.4.2. Performances	110
3.4.3. Paramètres physiologiques	111
3.4.4. Effets de la stratégie d'allure	112
3.5. Discussion partielle	113
4. Etude n°4 : Relations entre performance et stratégie d'allure en course à pied lors d'un triathlon international (publiée dans International Journal of Sports Physiology and Performance, sous presse)	114
4.1. But de l'étude	115
4.2. Méthodes	116
4.2.1. Participants	116
4.2.2. Procédures	117
4.2.3. Traitement des données	117
4.3. Analyse statistique	118
4.4. Résultats	118
4.4.1. Performance globale	118
4.4.2. Vitesse de course	118
4.4.3. Variabilité de la vitesse de course	120
4.5. Discussion partielle	123
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 (en cours d'expertise)	124
5.1. But de l'étude	125
5.2. Méthodes	126
5.2.1. Protocole expérimental	127
5.2.2. Traitement des données	131
5.3. Analyse statistique	131
5.4. Résultats	132
5.4.1. Performance	132
5.4.2. Paramètres physiologiques	132
5.4.3. Paramètres électromyographiques	134
5.4.4. Paramètres cinématiques	134
5.4.5. Raideur du membre inférieur	135
5.4.6. Difficulté d'effort perçue	135
5.5. Discussion partielle	137
DISCUSSION GENERALE ET PERSPECTIVES SCIENTIFIQUES	139

1. Décrire les stratégies d'allure en triathlon à haut niveau	140
1.1. En natation	141
1.2. En cyclisme	141
1.3. En course à pied	145
2. Optimiser les stratégies d'allure en triathlon à haut niveau	146
3. Comprendre les stratégies d'allure en triathlon : vers une approche multicentrique de la fatigue ?.....	152
4. Conclusion générale et perspectives.....	157
REFERENCES	159

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).

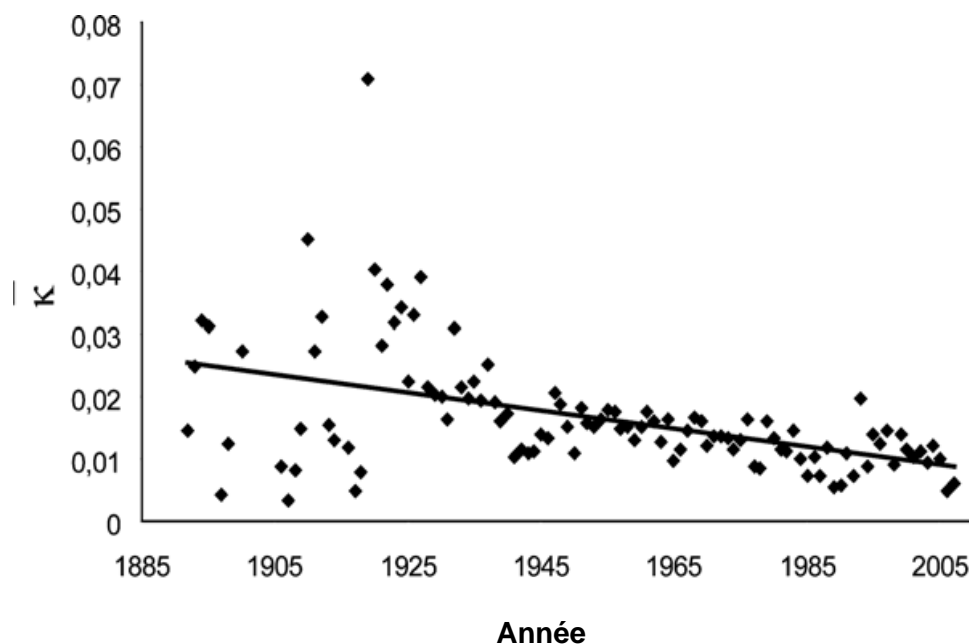


Figure 1. Evolution annuelle des améliorations des records du monde lors d'épreuves d'haltérophilie, de natation, de cyclisme, d'athlétisme et de patinage de vitesse depuis 1896 jusqu'en 2007. Le coefficient de progression (\bar{k}) a diminué de 0,024 lors de la période [1896-1915] à 0,010 lors de la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

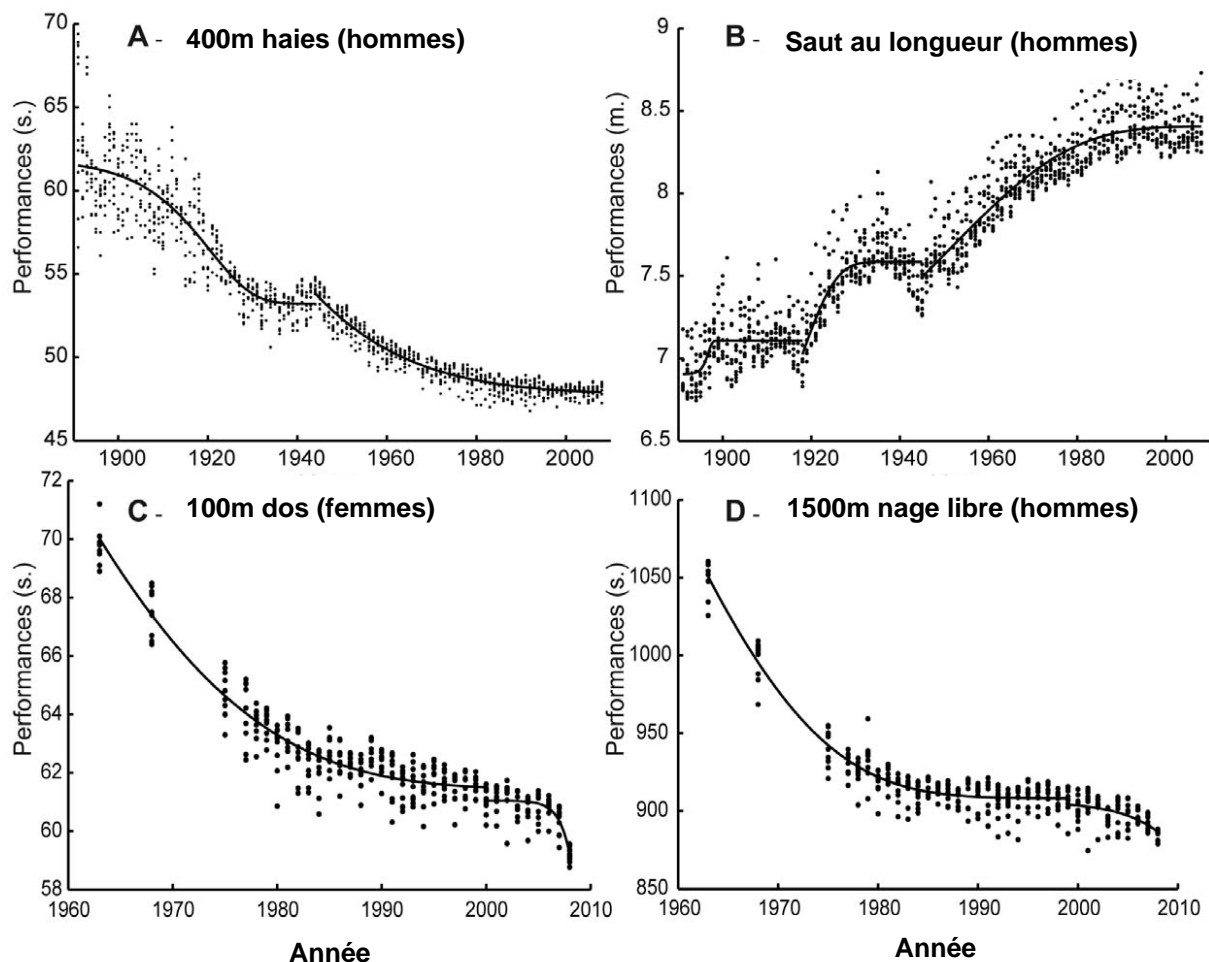


Figure 2. Modélisations de l'évolution des records du monde dans 4 disciplines olympiques (400m haies masculins et saut en longueur masculin ; 100m dos féminin et 1500m nage libre) entre 1963 et 2008. D'après Berthelot et al. (2010).

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 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. 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. 2005; Swain 1997).

1.1. LES STRATEGIES D'ALLURE DECROISSANTE

1.1.1. LES STRATEGIES D'ALLURE DECROISSANTE 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 $\dot{V}O_{2max}$ durant l'épreuve ($89,3 \pm 2,4\%$ vs. $92,5 \pm 3,1\%$ de $\dot{V}O_{2max}$) (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 ($\sim 39,5-40,5^\circ C$). 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. 1997; 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).

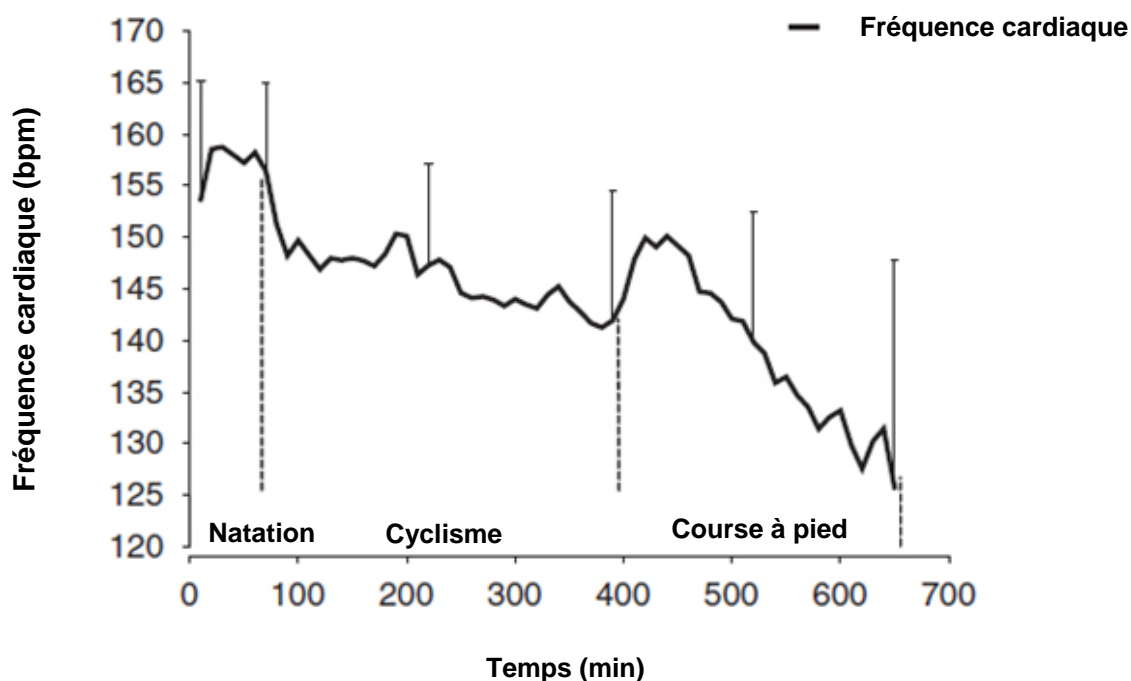


Figure 5. Exemple de stratégie d'allure décroissante révélée par la baisse de la fréquence cardiaque durant un triathlon longue distance Ironman ; n = 27. D'après Laursen et al. (Laursen et al. 2005; Laursen et al. 2006).

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.

1.1.2. LES STRATEGIES D'ALLURE DECROISSANTE 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).

1.2. 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%.

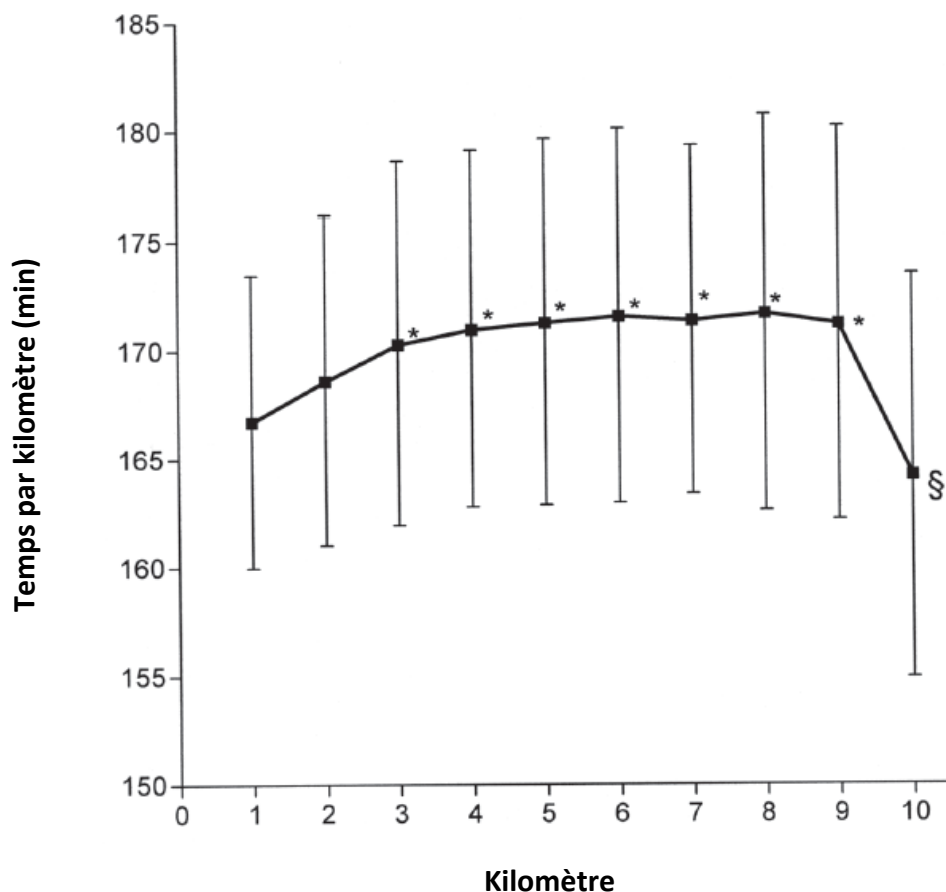


Figure 6. Evolution du temps par kilomètre lors des 34 records du monde du 10 000m battus entre 1921 et 2004. *Significativement plus grand que lors des kilomètres 1, 2 et 10 ($p < 0.05$). §Significativement plus faible que lors des 9 kilomètres précédents ($p < 0,005$). D'après Tucker et al. (2006a).

1.3. 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 ($53,0\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$) (Figure 7).

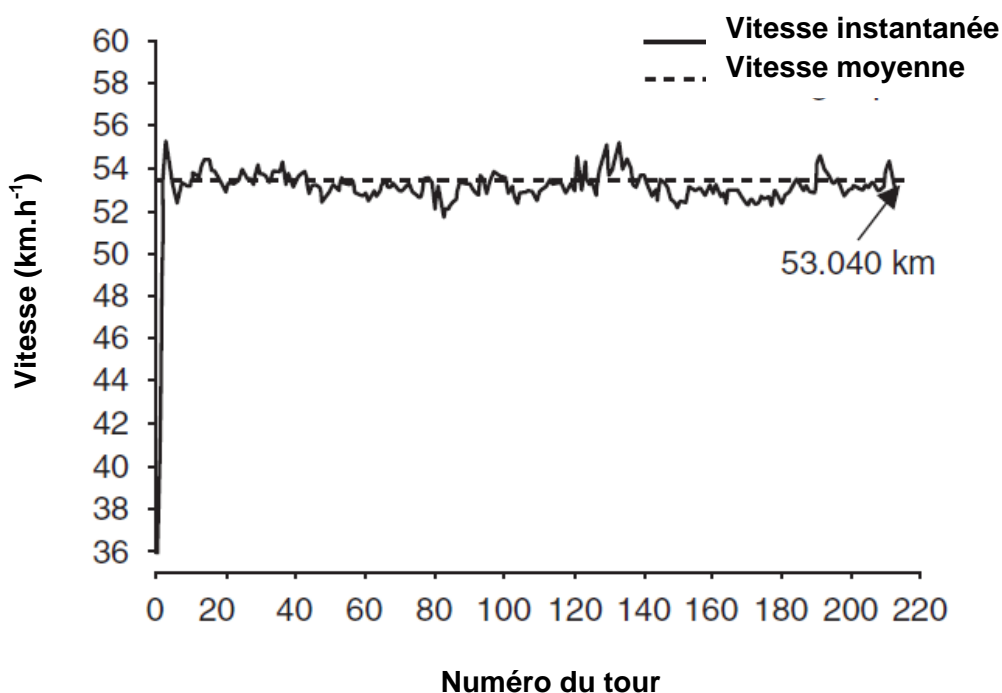


Figure 7. Evolution de la vitesse instantanée de Miguel Indurain lors de son record de l'heure en 1994 D'après Padilla et al. (2000a).

Etant donné qu'à vitesse élevée ($> 40\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$), 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).

1.4. 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 Brunskill 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.

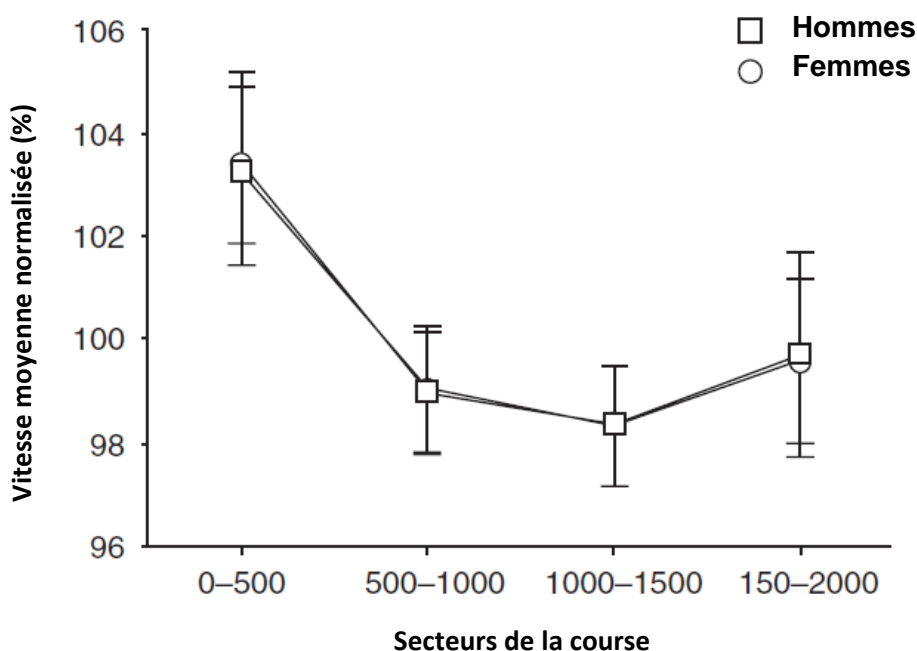


Figure 8. Exemple de stratégie d'allure en J inversé classiquement observée lors des compétitions internationales d'aviron. D'après Garland (2005).

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.

1.5. 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). Cette 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 $\dot{V}O_{2max}$). 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 ($\sim 40-80\%$ $\dot{V}O_{2max}$ de 140min) engendre une plus haute valeur de $[La]_s$ par rapport à une stratégie constante ($\sim 65\%$ de $\dot{V}O_{2max}$), 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.

1.6. 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; Hauswirth et al. 1999; Hauswirth 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 (Hauswirth et al. 1996; Hauswirth et al. 1997) 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. 1988b).

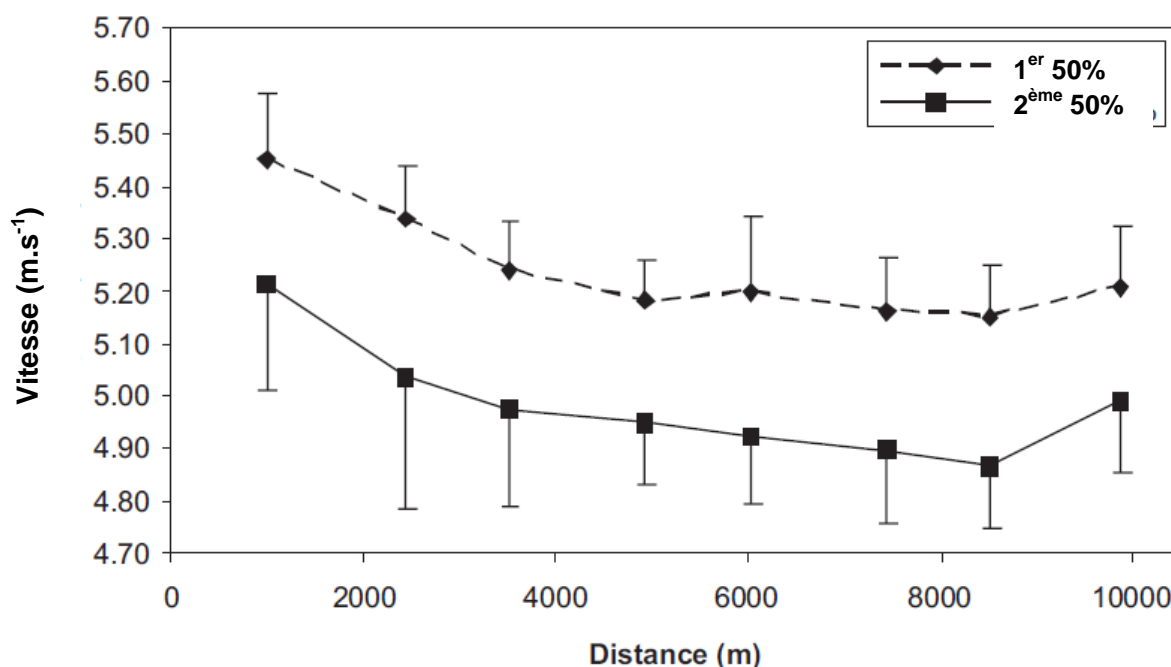


Figure 9. Evolutions de la vitesse de course moyenne des premiers et des derniers 50% des compétiteurs engagés lors de l'épreuve de Coupe du Monde de triathlon de Lausanne en 2002. La vitesse était significativement différente entre les deux groupes sur toutes les portions du parcours pédestre ($p <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

2. 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.

2.1. LES CARACTERISTIQUES INTRINSEQUES DE L'ACTIVITE SPORTIVE PRATIQUEE

2.1.1. 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).

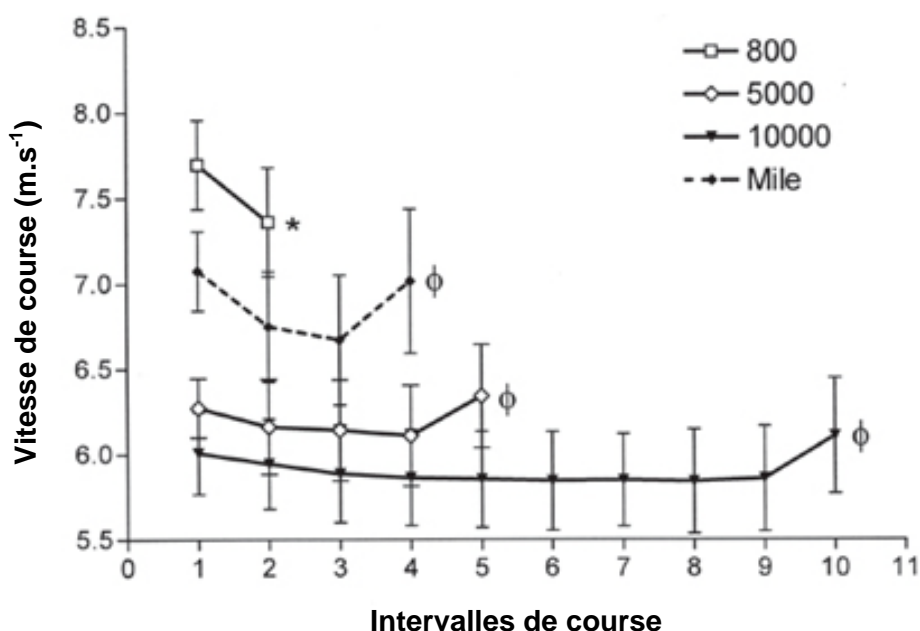


Figure 10. Vitesse de course moyenne sur chaque intervalle de course lors des records du monde du 800m, du 1500m, du mile et du 10 000m entre 1921 et 2004. *Significativement plus faible que lors du premier intervalle ($p < 0,005$). φ Significativement plus élevée que les intervalles précédents. D'après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

2.1.2. 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 (R_a exprimé en Newton N) au carré de la vitesse (di Prampero et al. 1979), comme l'exprime l'équation :

$$R_a = 0,5 * S * C_x * \rho * v^2$$

où S représente la surface de projection frontale en m^2 , C_x 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.

2.2. 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.

2.2.1. LES PARAMETRES METABOLIQUES

2.2.1.1. L'INFLUENCE DE LA FRACTION EN OXYGENE INSPIREE 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 ($F_{iO_2} = 15,8\%$) 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 « hyperoxie » 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 liés 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 « hyperoxie » que dans la condition « normoxie ». Parallèlement, un plus haut niveau de recrutement neuromusculaire était observé en condition d'hyperoxie 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 régulée durant l'exercice en fonction du contenu en oxygène de l'air inspiré (Kayser et al. 1994; Peltonen et al. 1997).

2.2.1.2. 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 dépleté, 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 glycoliques endogènes ne soit atteint.

2.2.1.3. 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.

2.2.2. 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 pédalage 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. 2001; 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°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°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 prédicateurs 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 abaissée 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.

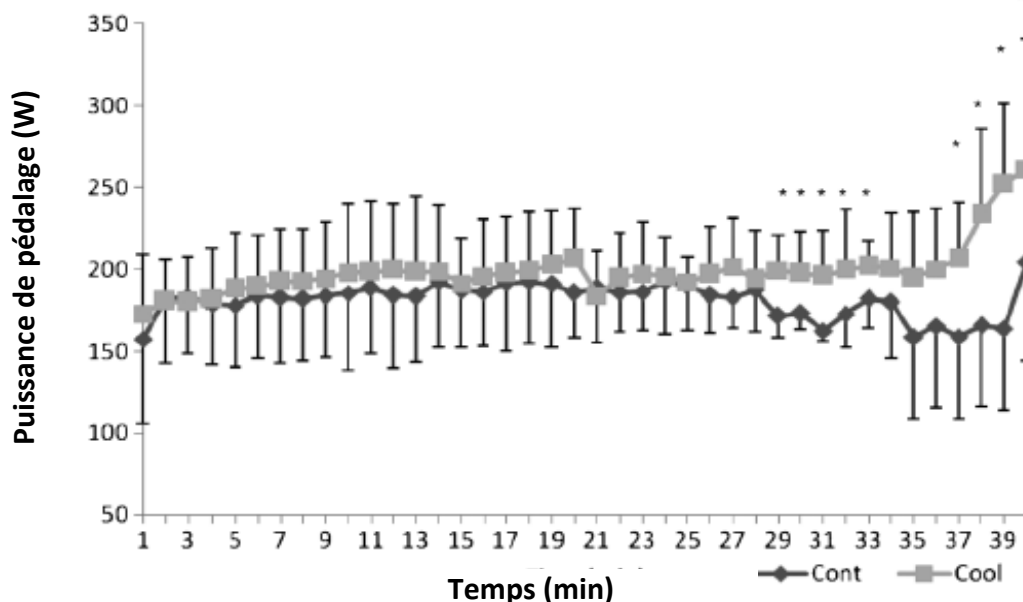


Figure 11. Evolution de la puissance de pédalage dans les conditions contrôle (Cont) et *pre-cooling* (Cool) lors d'une épreuve maximale de 40min réalisée sur ergocycle en conditions chaudes et humides. *Différence significative entre les deux conditions ($p < 0,05$). D'après Duffield et al. (2010).

Certains résultats expérimentaux suggèrent toutefois que la température rectale, qui est souvent utilisée pour mesurer la température corporelle dans les études précitées (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.

2.2.3. 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).

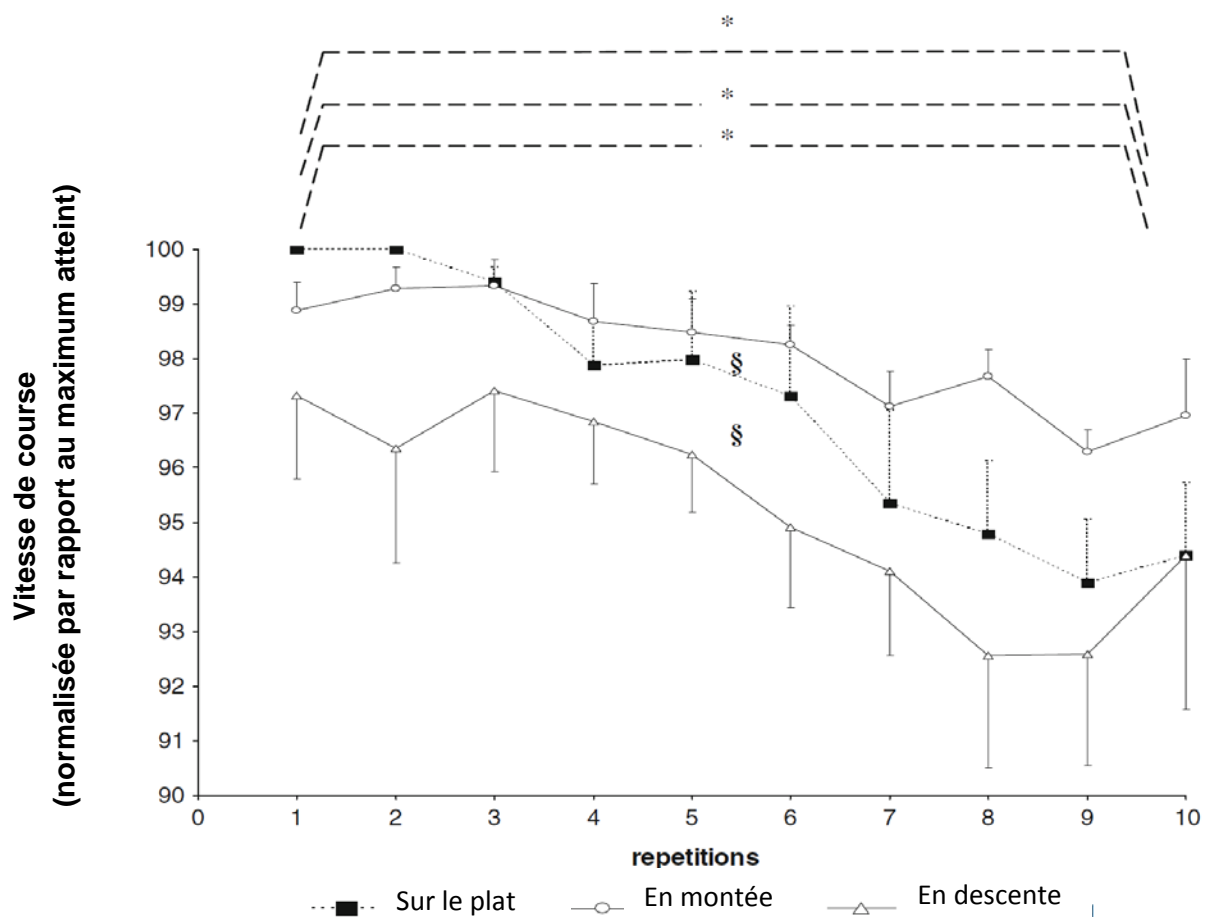


Figure 12. Evolutions de la vitesse de course moyenne lors de 10 sprints de 60m réalisés sur le plat, en montée et en descente. *Différence significative entre la dernière et la 1^{ère} répétition ($p < 0,05$). §Différence significative entre les 10 répétitions d'une même série. D'après Baron et al.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

2.3. 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.

2.3.1. L'ETAT AFFECTIF ET LE NIVEAU DE MOTIVATION

2.3.1.1. 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).

2.3.1.2. 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).

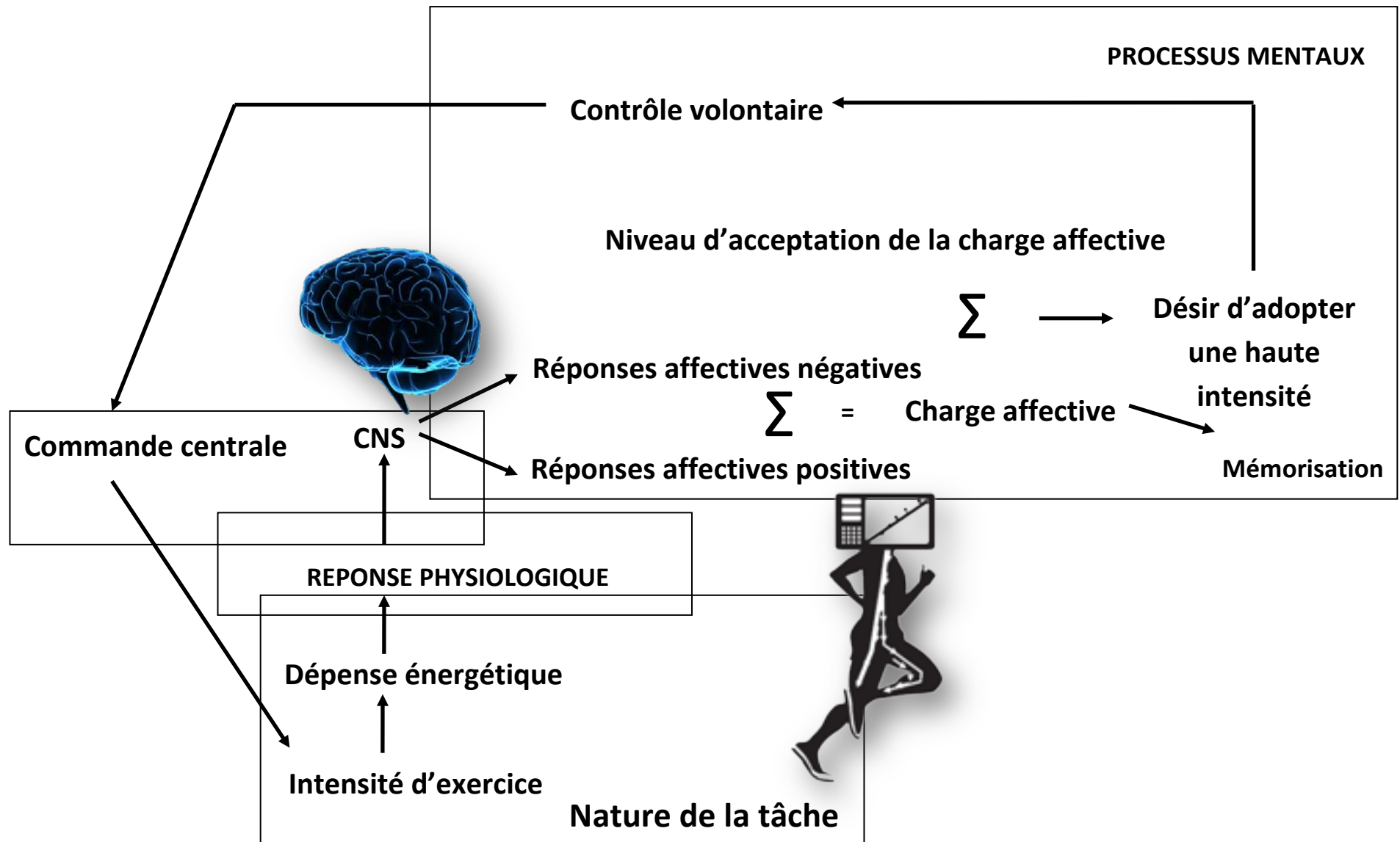


Figure 13. Mécanismes interactionnels entre la nature de la tâche, la réponse physiologique et les processus mentaux lors du choix de la stratégie d'allure. Le niveau d'acceptation est défini comme la plus haute charge affective pouvant être supportée au regard de la durée d'effort anticipée. Ce paramètre 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).

2.3.1.3. 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).

2.3.2. 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 anticipatoire 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 dûes 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.

2.3.3. 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).

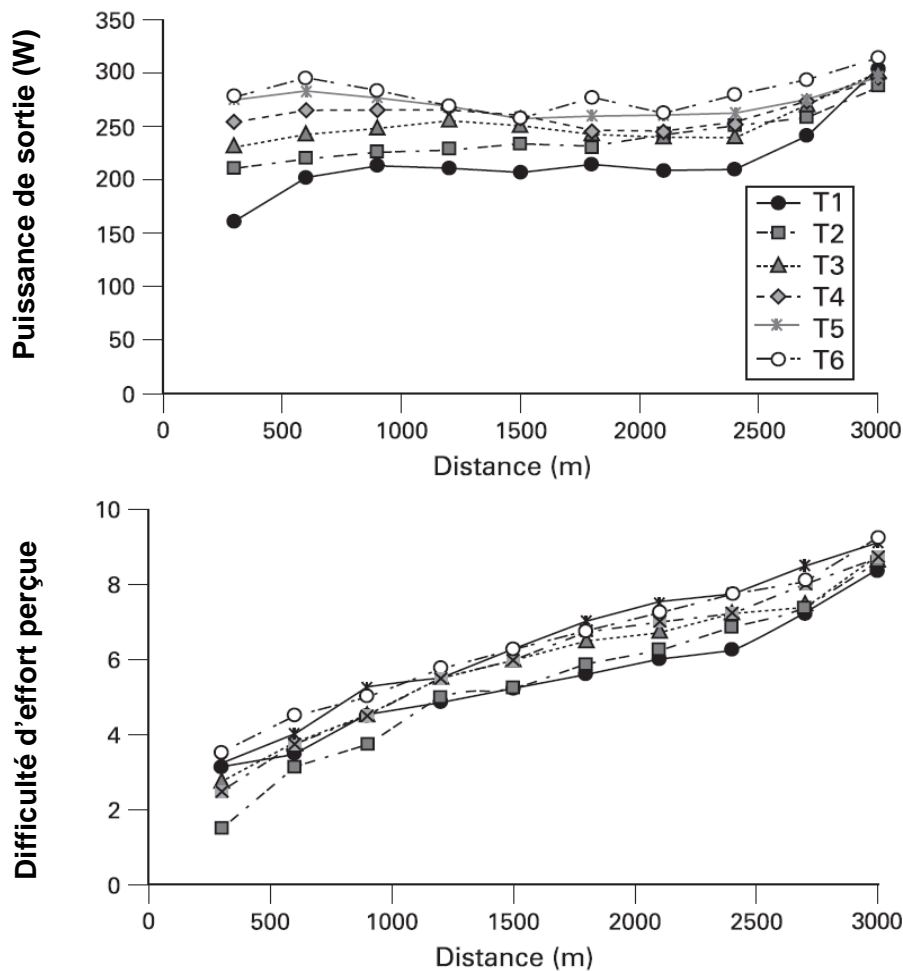


Figure 14. Evolutions de la puissance développée et de la difficulté d'effort perçue lors d'une performance maximale de 3000m sur ergocycle réalisée 6 fois par des sujets novices. Il faut noter l'augmentation progressive de la puissance développée lors des 600 premiers mètres et l'augmentation de la 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.

2.4. 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.

2.4.1. 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.

2.4.2. 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 6 ans (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.

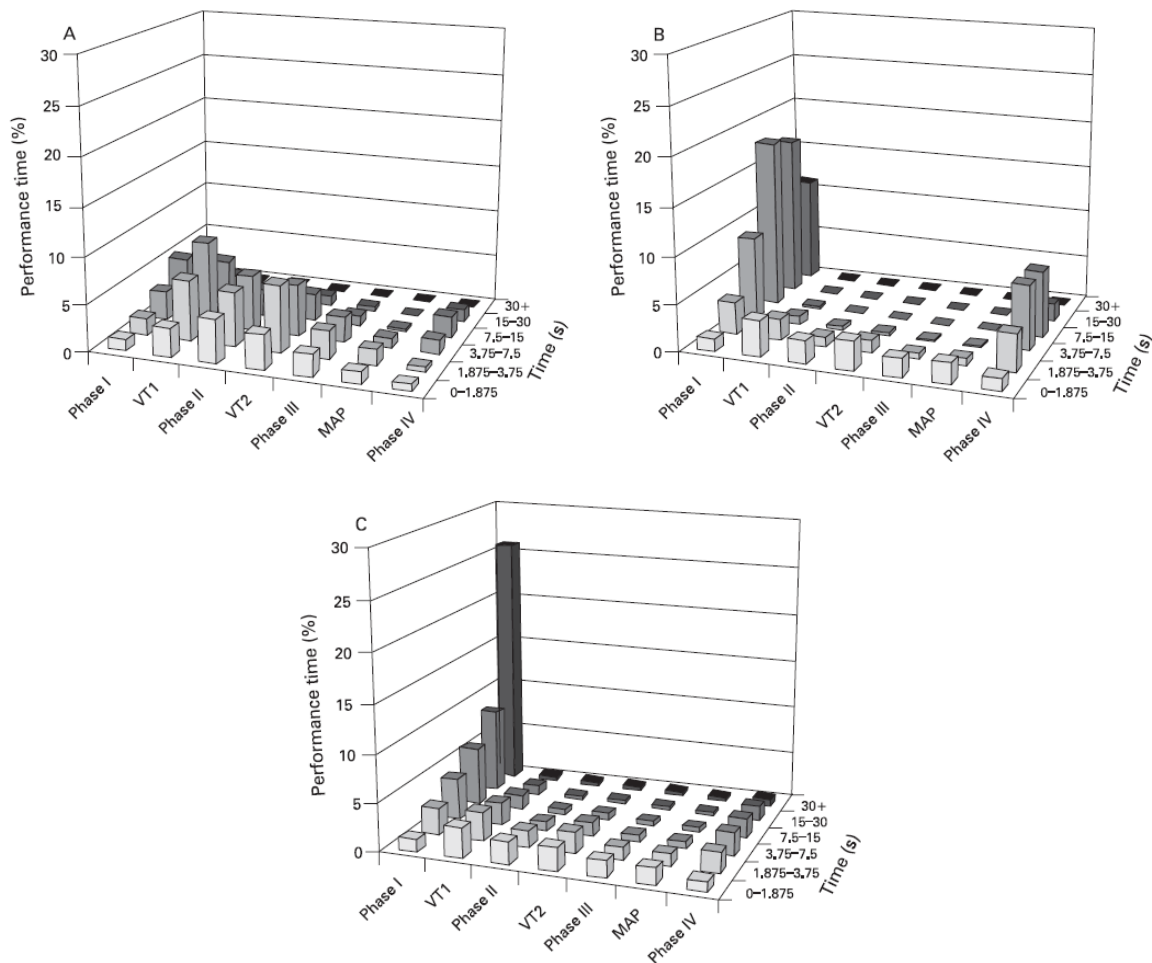


Figure 15. Analyse de la distribution des puissances développées par des cyclistes féminines lors de trois compétitions internationales sur route : épreuve contre-la-montre (A), critérium (B) et course en ligne (C). D'après Abbiss et al. (2010).

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.

2.5. LES AUTRES FACTEURS D'INFLUENCE

2.5.1. 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. A 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 aérobie. 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.

2.5.2. 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 $\dot{V}O_{2max}$. Les résultats ont révélé que si aucune différence n'était constatée dans la situation thermique neutre (~27min ; 15°C, 60% 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).

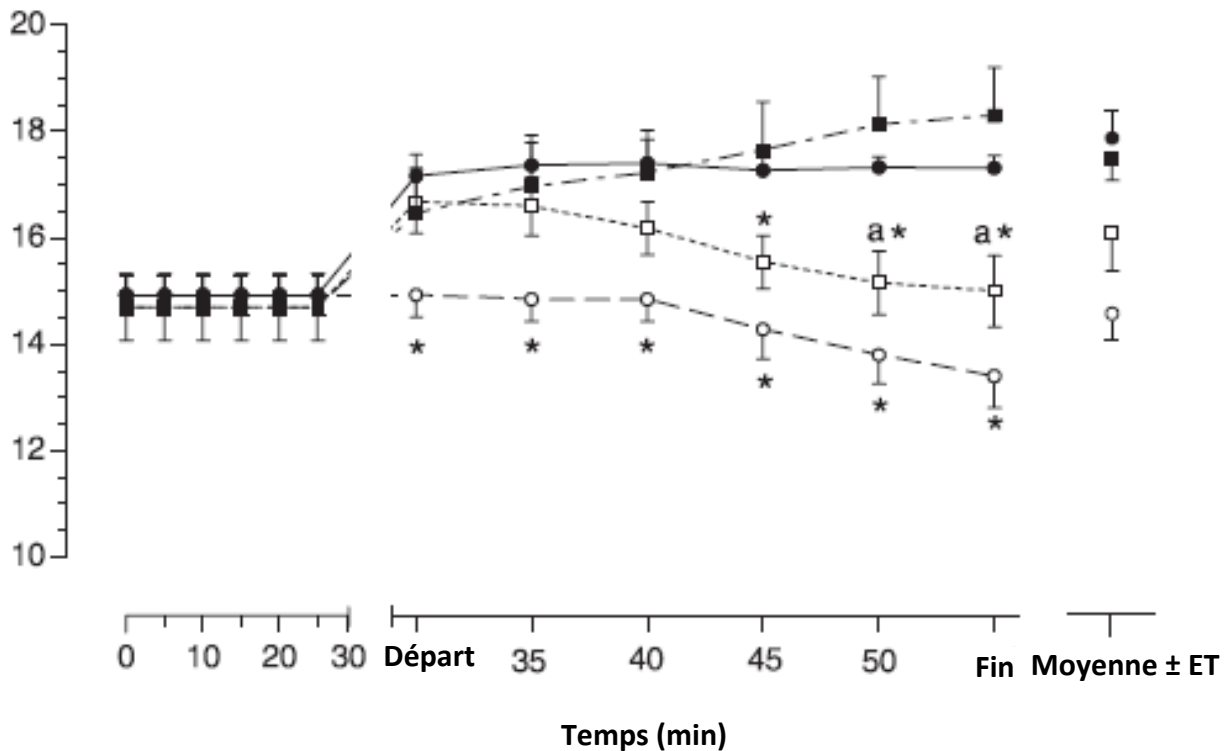


Figure 16. Evolution de la vitesse de course moyenne lors des 30min à 70% de $\dot{V}O_{2max}$ et les 8km à allure libre chez les coureurs caucasiens et africains, en ambiances neutre et chaude. Les moyennes des coureurs caucasiens sont représentées par des ronds et celles des coureurs africains par 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 prématuré. 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.

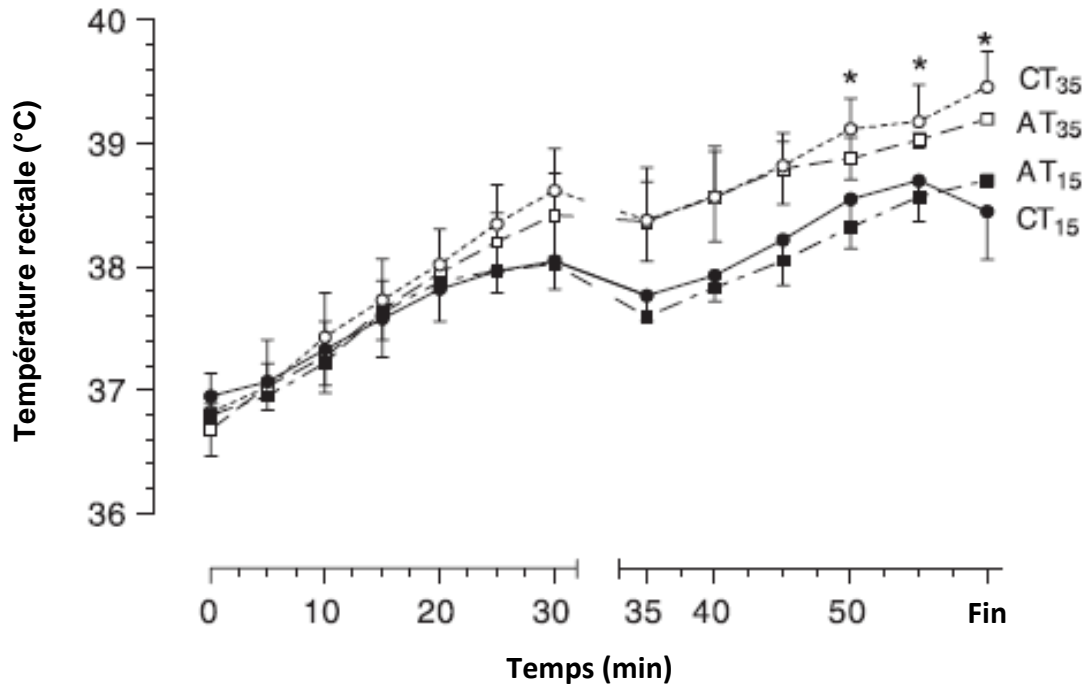


Figure 17. Evolution de la température rectale moyenne lors des 30min à 70% de $\dot{V}O_{2max}$ et les 8km à allure libre chez les coureurs caucasiens et africains, en ambiances neutre et chaude. Les moyennes des coureurs caucasiens sont représentées par des ronds et celles des coureurs africains par 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).

2.5.3. 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.

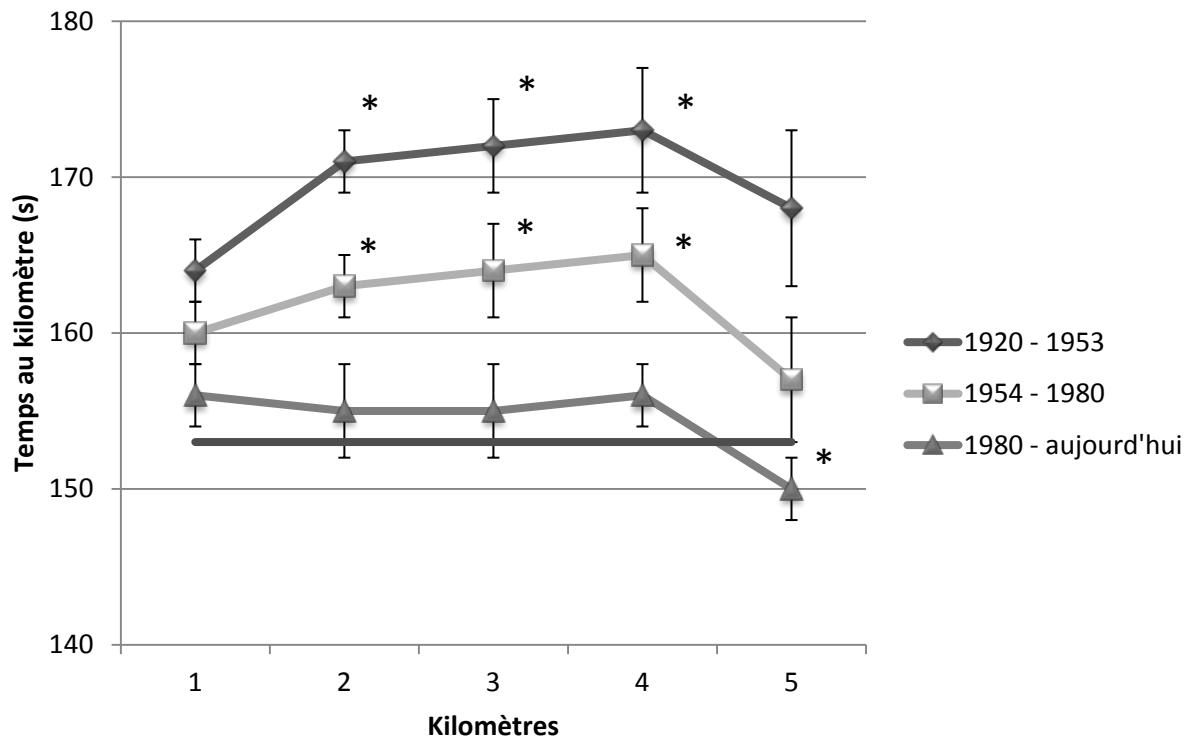


Figure 18. Evolution du temps moyen par kilomètre lors des records du monde de course à pied sur 5km depuis 1920. La droite représente l'évolution du temps par kilomètre lors d'une course-hypothétique strictement constante qui reproduirait l'allure moyenne adoptée lors des records du monde 1980 à aujourd'hui. *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.

3. 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.

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

3.1.1. 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).

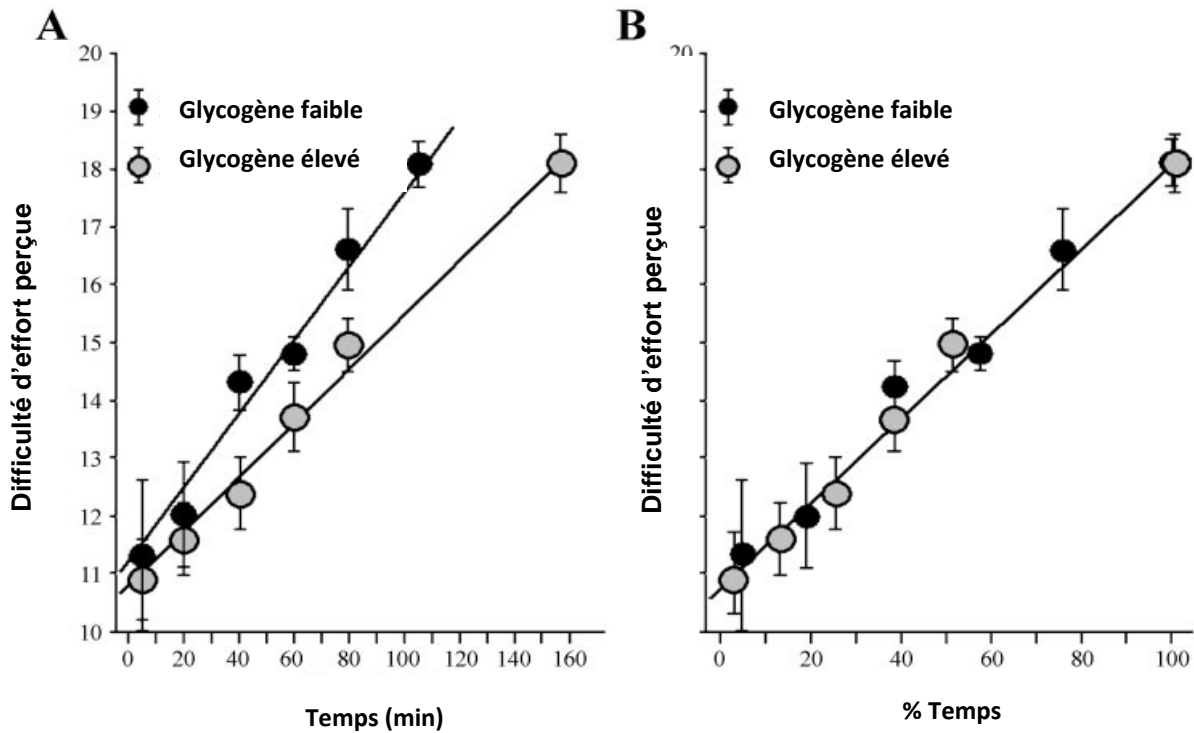


Figure 19. Evolutions de la difficulté d'effort perçue en fonction de la durée d'exercice lors d'une épreuve de pédalage à 70% de $\dot{V}O_{2max}$ menée à épuisement chez des cyclistes ayant suivi un régime pauvre ou riche en hydrates de carbone (A : en temps d'effort absolu ; B : en temps d'effort 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. 2001; 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 glycolytiques 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.

3.1.2. 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°C) (Nielsen et al. 2001; 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.

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

3.2.1. 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 $\dot{V}O_{2max}$. 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 psychophysique 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'occurrent.

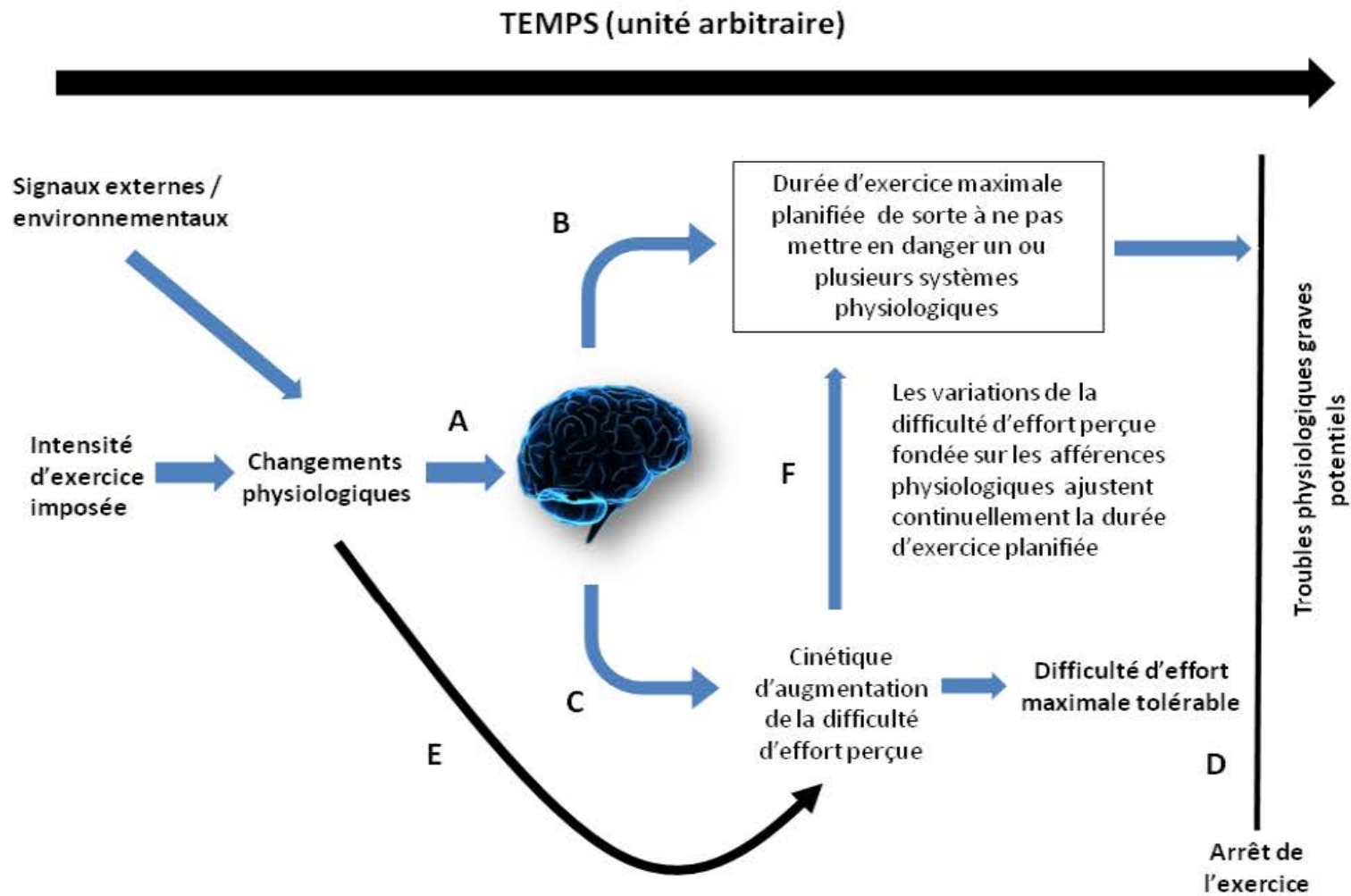


Figure 20. Application du modèle « Anticipation – Difficulté d’Effort Perçue – Feedbacks » aux exercices où l’intensité est constante et imposée. *D’après Tucker (2009).*

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. 2001; 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.

3.2.2. 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 (décrites 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 prématuré (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 prématurée 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.

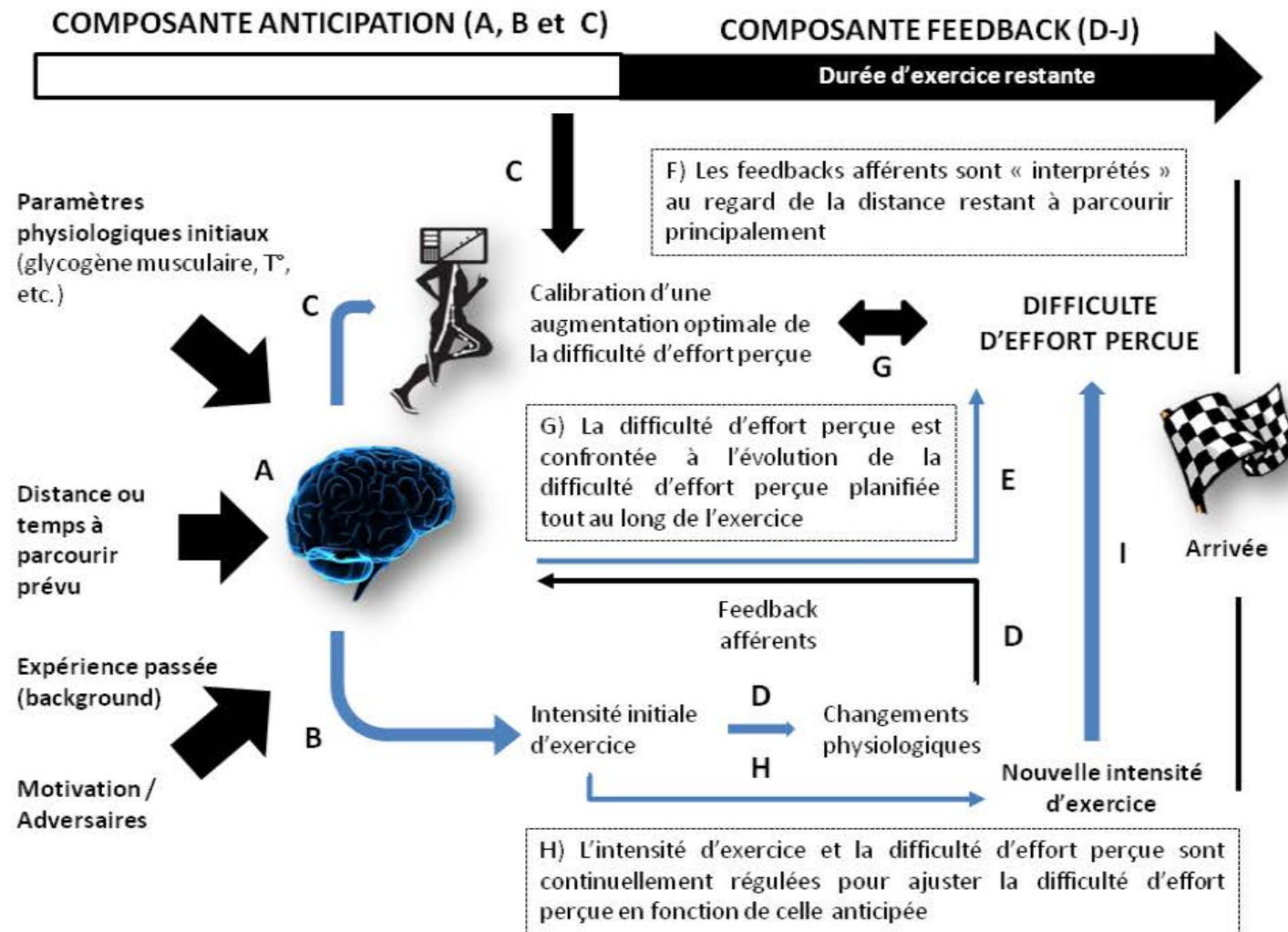


Figure 21. Application du modèle « Anticipation – Difficulté d'Effort Perçue – Feedbacks » aux exercices où l'intensité est librement gérée. Les lignes noires représentent la commande centrale ; les lignes bleues représentent l'intensité d'exercice consentie et les processus efférents. *D'après Tucker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

3.2.3. 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 imposée. 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).

3.2.4. 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).

3.2.5. 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).

3.2.6. 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 prématurée, 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 inexacts 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.

3.3. 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)

3.3.1. 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 métabosensibles) 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 (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 2008).

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) (Hauswirth 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 (Hauswirth 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. 2002; 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.

3.3.2. 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; Marcora 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.

3.3.2.1. SUR LE MAINTIEN DE L'HOMÉOSTASIE 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 limitée, 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 données 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.

3.3.2.2. 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 Shepard (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.

3.3.2.3. 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).

3.3.2.4. 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. sous presse). 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. sous presse). 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 minimales, 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.

3.3.2.5. 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-limité) 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).

3.3.2.6. 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 (Schoberer 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 jauges 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 jauges de contraintes validé par Balmer et al. (2000). Les bandes de jauges 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 partir 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 0,1km.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 avons validé préalablement (Hauswirth 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 métatarse et du talon selon les recommandations de Morin et al. (2005). Ceux-ci étaient connectés à un enregistreur portable (ME6000, Mega Eletronics 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.min⁻¹) et la fréquence respiratoire (FR, exprimée en cycles.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.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 (O₂) et en dioxyde de carbone (CO₂) sont alors mesurées à des intervalles de temps réguliers. La fraction d'oxygène contenue dans l'air expiré (F_eO₂) est mesurée par une sonde polarographique tandis qu'une sonde infrarouge permet d'analyser la fraction de gaz carbonique (F_eCO₂). Les analyseurs d'O₂ et de CO₂ sont également calibrés avant chaque expérimentation en fonction de la concentration en O₂ et en CO₂ 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'O₂ et de CO₂ (FIO₂ et FICO₂ 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 enregistrerait 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 100 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 Ω ; 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).

6	
7	Très très facile
8	
9	Très facile
10	
11	Facile
12	
13	Ni facile, ni difficile
14	
15	Difficile
16	
17	Très difficile
18	
19	Très très difficile
20	

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 $\dot{V}O_{2max}$ (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 P_{max} pour chaque triathlète.

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

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

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
$\dot{V}O_{2max}$ (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 ; $\dot{V}O_{2max}$, 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**.

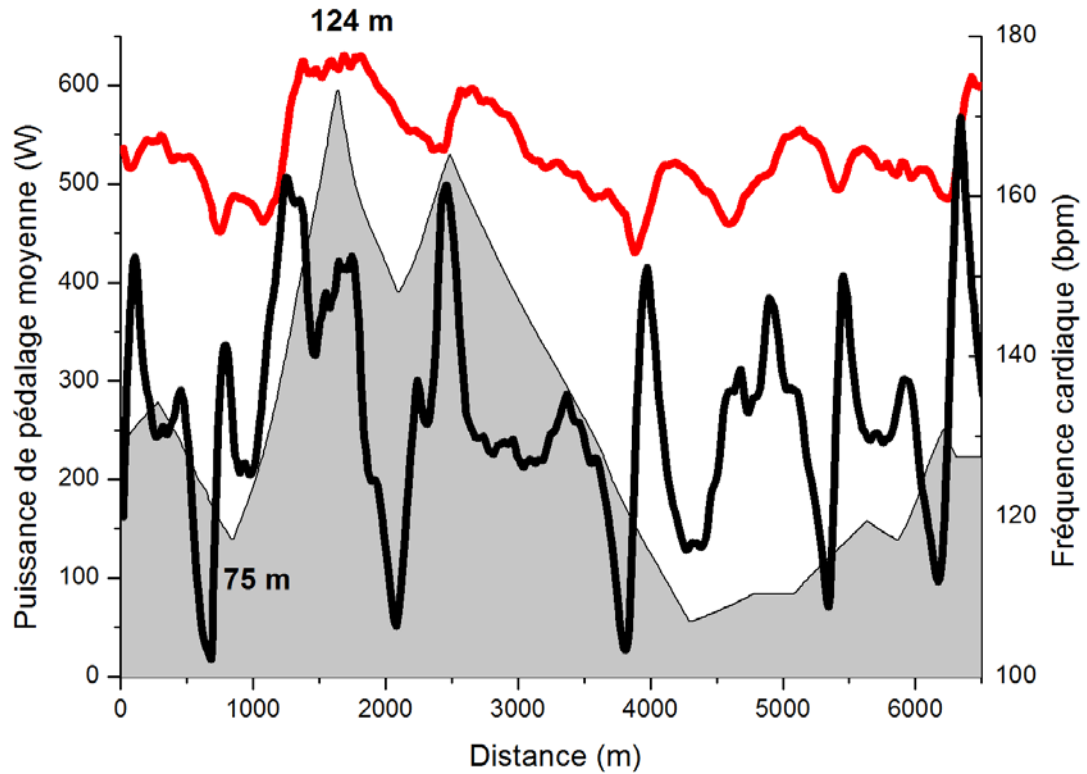


Figure 1. Profil du parcours et exemple d'évolution de la puissance de pédalage (ligne noire) et de la fréquence cardiaque (ligne rouge) chez un triathlète masculin lors d'un tour de la section cyclisme (tour de 6,9km, dénivelé positif global par tour de 100m ; lissage des courbes sur 5s).

Les triathlètes ont complété le parcours cycliste à puissance de sortie moyenne de $230 \pm 53W$ ($3,6 \pm 0,5W \cdot kg^{-1}$, $60 \pm 8\%$ PMA), à une vitesse moyenne de $38 \pm 3km \cdot h^{-1}$ en adoptant une cadence moyenne de 91 ± 5 rpm et un braquet de $6,4 \pm 0,4m$ par tour de manivelle. Leur FC moyenne était de $165 \pm 5bpm$ ($91 \pm 4\%$ 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 ± 7,1	60,7 ± 9,1	52,7 ± 7,5* ^μ
CV Puissance (%PMA)	59 ± 7	66 ± 10*	77 ± 15* ^μ
Vitesse (km.h⁻¹)	38,2 ± 2,6	38,0 ± 2,6	36,9 ± 2,5*
CV Vitesse (%)	28 ± 2	27 ± 1	28 ± 2
Cadence (rpm)	91,1 ± 5,0	91,3 ± 4,6	90,9 ± 4,8
CV Cad (%)	17 ± 7	16 ± 5	15 ± 3
Braquet (m par tour de manivelle)	6,6 ± 0,4	6,4 ± 0,4*	6,2 ± 0,5* ^μ
CV Braquet (%)	19 ± 2	19 ± 2	20 ± 1
%FC_{max}	94,0 ± 2,6	90,6 ± 4,1*	87,2 ± 5,7* ^μ
CV FC (%)	4 ± 1	7 ± 2*	9 ± 2* ^μ

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 ± ET, *n* = 8. * Significativement différent de L1-L2, ^μ 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 ± 9% pour la zone 1, 17 ± 6% pour la zone 2, 15 ± 3% pour la zone 3 et 17 ± 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 ± 12% en zone 1, 26 ± 8% en zone 2 et 48 ± 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 ± 5,9% (L1-L2) à 9,4 ± 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 ± 4,3 % à 3,8 ± 2,5 %, $p < 0,05$).

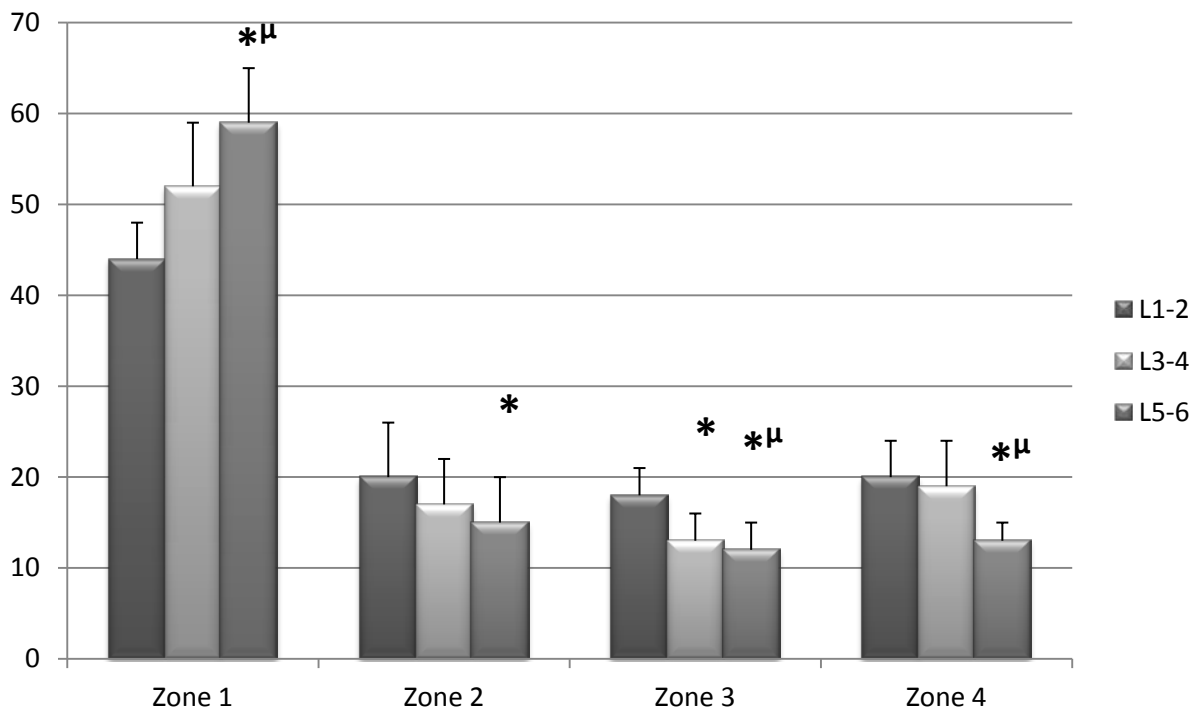


Figure 2. Distribution du temps total des trois sections cyclistes (L1-2, L3-4, L5-6) au sein des quatre zones d'intensité : 1) en-dessous du 1^{er} seuil ventilatoire (zone 1 ; puissance de pédalage < 64% PMA), 2) en dessous de la puissance de pédalage au 2nd seuil ventilatoire (zone 2 ; puissance = 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 ± ET. *Significativement différent de L1-L2, ^μSignificativement 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[, ≥ 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 ± 7,5% et 63,4 ± 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 ± 3%, 36 ± 5%, 13 ± 2%, 13 ± 6%, 22 ± 2% en zone 1, 2, 3, 4 et 5 pour les femmes vs. 17 ± 5%, 31 ± 5%, 19 ± 7%, 14 ± 3%, 19 ± 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 ± 4% vs. 32 ± 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
$\dot{V}O_{2max}$ (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, $n = 6$). $\dot{V}O_{2max}$: 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 ($\dot{V}O_{2max}$), 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 côte 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 côte 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) (Hauswirth 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 associé 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](#).

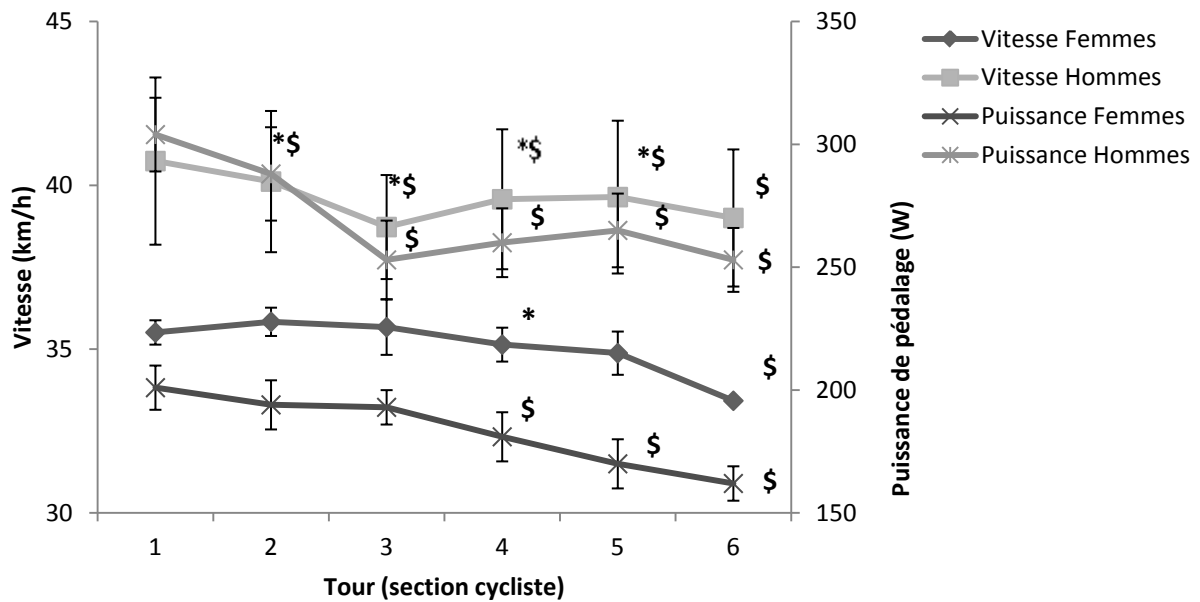


Figure 1. Vitesse de déplacement (moyenne \pm ET, km.h⁻¹) et puissance de pédalage (moyenne \pm ET, W) lors de chaque tour du circuit cycliste pour les triathlètes féminines ($n = 6$) et masculins ($n = 6$) suivis lors de l'étude.*Significativement différent du tour précédent ($p < 0,05$). [§]Significativement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

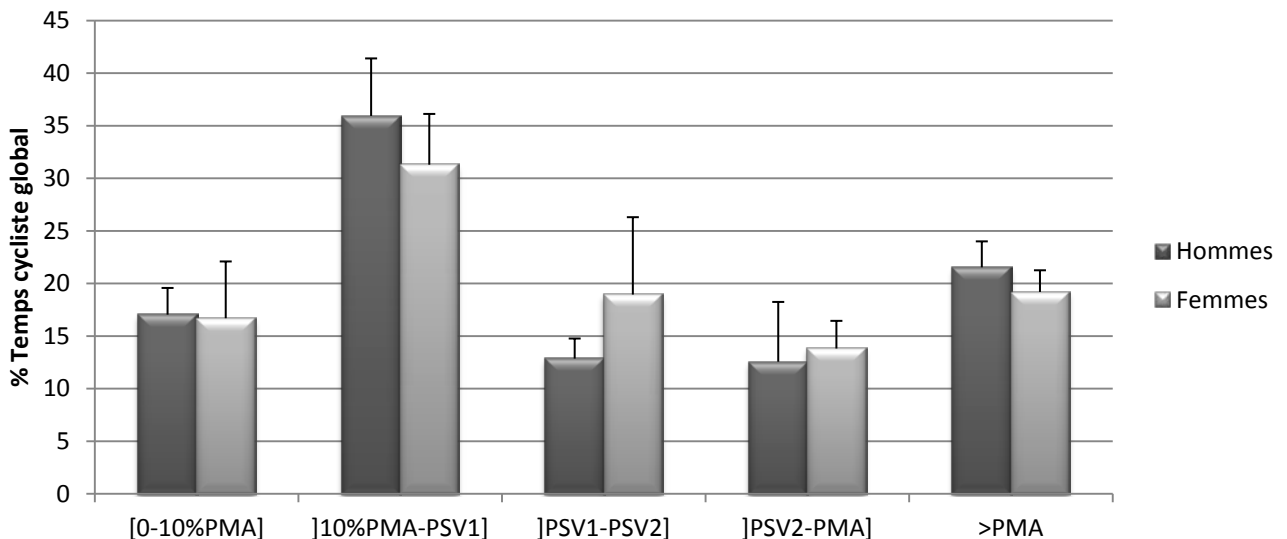


Figure 2. Distribution du temps d'exercice cycliste dans les cinq zones d'intensité : en dessous de 10% de PMA ; entre 10% de PMA et en dessous de P_{SV1} ; entre P_{SV1} et en dessous de P_{SV2} ; entre P_{SV2} et en dessous de PMA ; égales ou supérieurs à PMA. Aucune différence entre les deux sexes 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 ± 4 rpm) par rapport aux hommes (95 ± 4 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. $18,4 \pm 0,5\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$, $p < 0,01$) 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**.

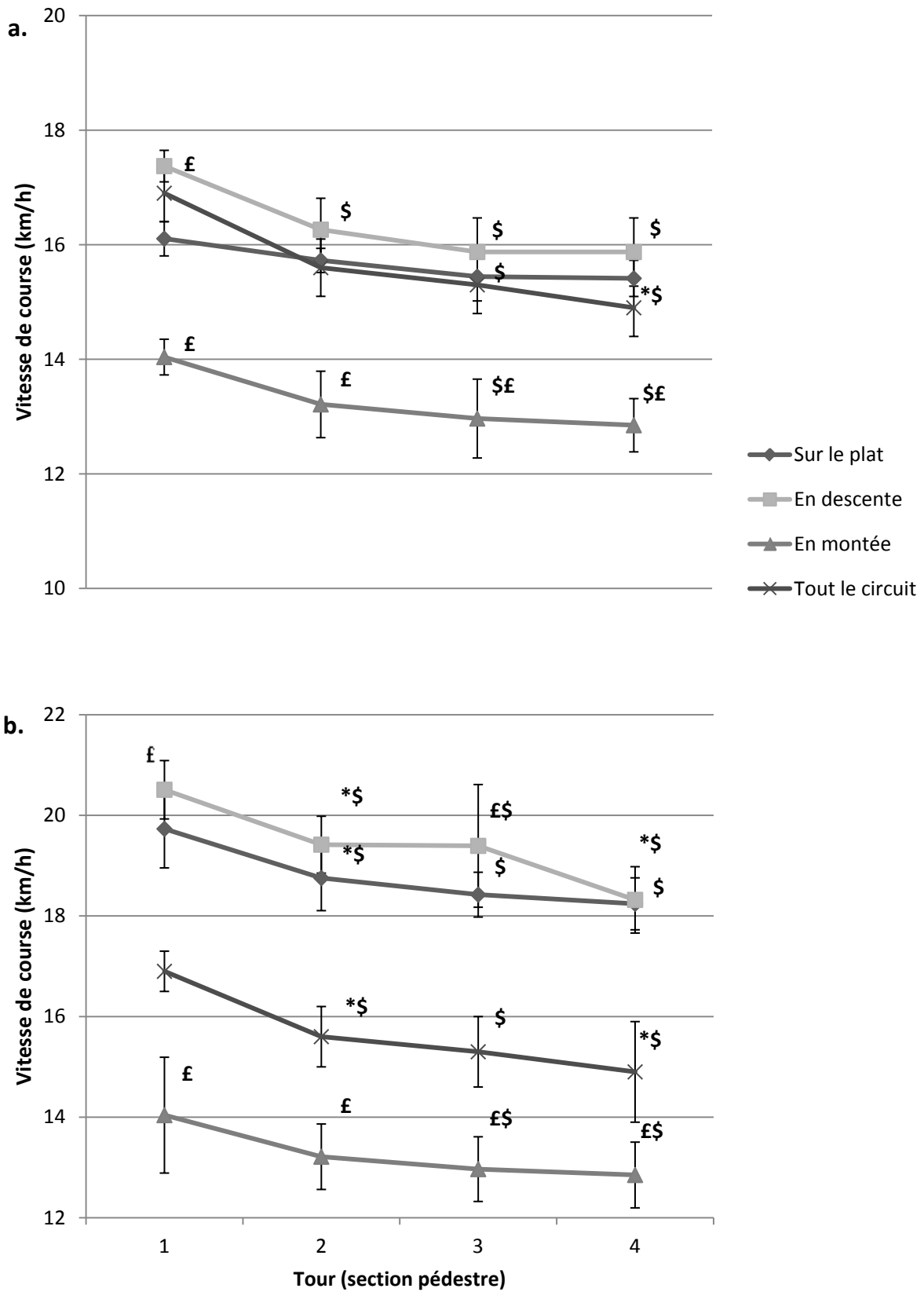


Figure 3. Vitesse de course moyenne (\pm ET) pour les femmes (a) et les hommes (b) en fonction des différents profils du parcours. *Significativement différent du tour précédent ($p < 0,05$). § Significativement différent du tour 1 ($p < 0,05$). $^{\text{£}}$ Significativement différent de la vitesse 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. 1988b) 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 ± 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 fatiguant 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 ($\dot{V}O_{2max}$), de fréquence cardiaque maximale (FC_{max}) et de débit ventilatoire (\dot{V}_{Emax}). 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 ± 6,7
Entraînement en natation (km.semaine⁻¹)	12,5 ± 1,9
Entraînement en cyclisme (km.semaine⁻¹)	220 ± 42
Entraînement en course à pied (km.semaine⁻¹)	65 ± 12
$\dot{V}O_{2max}$ en course à pied (mL.min⁻¹.kg⁻¹)	69,1 ± 7,1
\dot{V}_{Emax} 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 ± écart-type. $\dot{V}O_{2max}$, consommation maximale d'oxygène; \dot{V}_{Emax} , 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 précédant 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 ± 3h/semaine et 79, 10, 12%, respectivement). Cette charge d'entraînement moyenne était similaire à celle déjà rapportée dans la littérature pour des triathlètes entraînés (Hauswirth et al. 1997), 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 (Arkay, 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 x 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, $\dot{V}O_2$,

\dot{V}_E et $[La]_s$. Un test *post-hoc* de Newmann-Keuls était utilisé pour déterminer les 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'ENTRAÎNEMENT

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 ($200 \pm 15s$, $190 \pm 14s$, $210 \pm 17s$ et $220 \pm 18s$ 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 ($p = 0,58$) ($2028 \pm 78s$ et $17,8 \pm 0,4km.h^{-1}$ vs. $2000 \pm 72s$ et $18,0 \pm 0,6km.h^{-1}$, $2178 \pm 121s$ et $16,5 \pm 0,9km.h^{-1}$, $2087 \pm 88s$ et $17,2 \pm 0,6km.h^{-1}$, 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			$2000 \pm 72^{\mu\mu\epsilon\epsilon}$	
CàP-Tri _{+5%}	1278 ± 54	4260 ± 52	$2178 \pm 121^{**\$\$ \mu\mu}$	$7716 \pm 196^{\$\$ \mu\mu}$
CàP-Tri _{-5%}	1275 ± 51	4255 ± 50	$2028 \pm 78^{\epsilon\epsilon \mu}$	$7558 \pm 188^{\epsilon\epsilon \mu}$
CàP-Tri _{-10%}	1281 ± 52	4263 ± 57	$2087 \pm 88^{\$\$ \epsilon}$	$7631 \pm 191^{\epsilon}$

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 $p < 0,05$, $\epsilon\epsilon$ $p < 0,01$

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

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

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	$\dot{V}O_2$ (mL.min ⁻¹ .kg ⁻¹)			\dot{V}_E (L.min ⁻¹)			FC (bt.min ⁻¹)			Lactatémie ([La ⁻] _s) (mmol.L ⁻¹)		
	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 (± 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 autre 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).

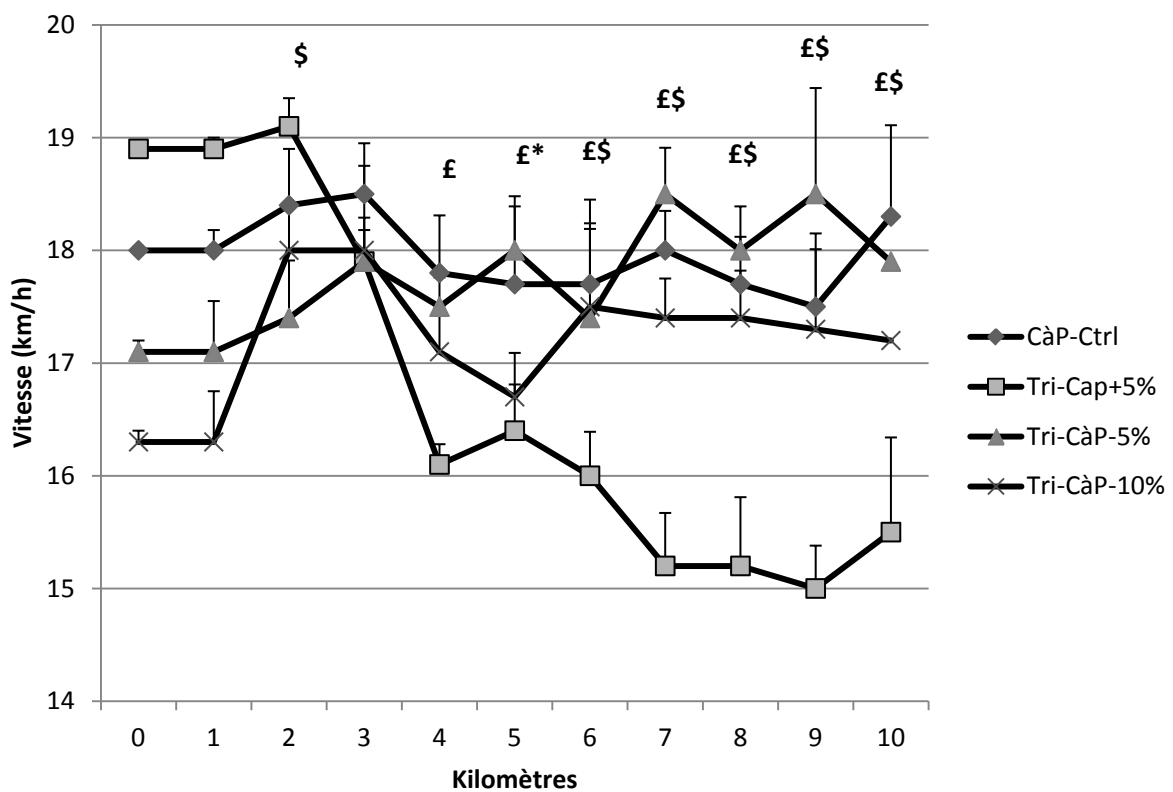


Figure 2. Evolutions de la vitesse moyenne (\pm ET) sur chaque kilomètre de la course contrôle (CàP-Ctrl) et des trois triathlons simulés, lors desquels la vitesse fut imposée 5% supérieure (Tri-CàP_{+5%}), 5% inférieure (Tri-CàP_{-5%}) ou 10% inférieure (Tri-CàP_{-10%}) de la vitesse moyenne lors de 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 (Hauswirth 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 $0,76\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$ (+4,4%) et $1,00\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$ (+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 ($6,1 \pm 0,5\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$ vs. $4,0 \pm 1,4\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$, 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 (Hauswirth 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.* $17\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$ vs. $19\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$) 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 (Hauswirth 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 $< 2m.s^{-1}$, 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 :

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

Des indices de variabilité de la vitesse de course lors de chaque tour (IVV_{tour} , $\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$), sur les portions planes (IVV_{plat} , $\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$) et dans les montées ($IVV_{\text{montée}}$, $\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$) 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 $IVV_{\text{montée}}$. 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 $121 \pm 4\text{min}$ et de $108 \pm 3\text{min}$, pour les femmes et les hommes, respectivement.

4.4.2. VITESSE DE COURSE

La performance sur la partie course à pied a été de $37\text{min}32\text{s} \pm 3\text{min}$ ($15,6 \pm 1,0\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$) pour les femmes et de $33\text{min}20\text{s} \pm 2\text{min}$ ($17,4 \pm 1,1\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$) 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.

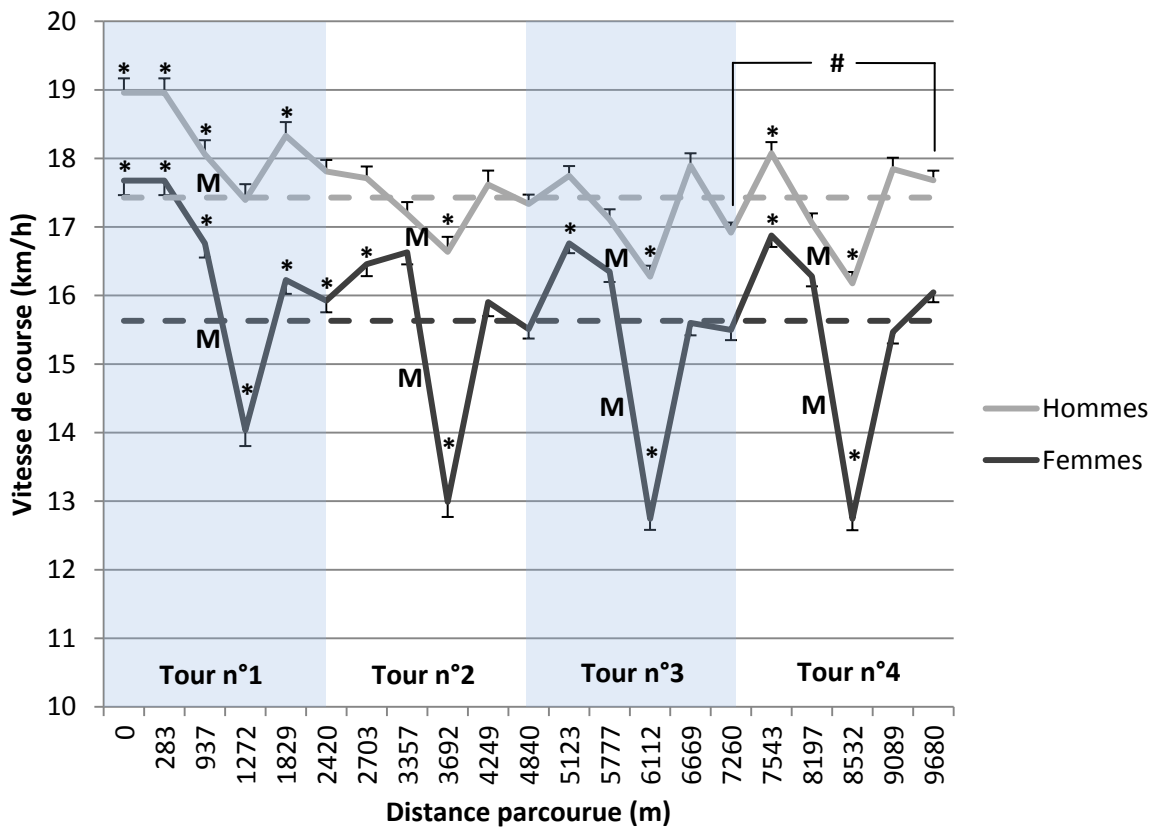


Figure 1. Evolution de la vitesse de course moyenne lors des Championnats d'Europe de triathlon distance Olympique 2009 chez les femmes ($n = 39$) et les hommes ($n = 55$) ayant franchi la ligne d'arrivée. Les droites en pointillés représentent la vitesse de course moyenne sur l'ensemble du 10km.. M: 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 $0,76\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$ (+4,4 %) et de $1,00\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$ (+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 ($+0,6\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$ et +3,7% pour les femmes et $+0,8\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$ et +4,3% pour les hommes, respectivement, $p < 0,0001$), les sections planes ($+0,5\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$ et +2,7% pour les femmes et $+0,7\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$ et +4,0% pour les hommes, respectivement, $p < 0,0001$) et les sections ascendantes isolément ($+1,2\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$ et +8.6% pour les femmes et $+1,0\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$ et +5,9% pour les hommes, respectivement, $p < 0,0001$) ([Tableau 1](#)). La vitesse ($\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$) 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 (Δplat/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**).

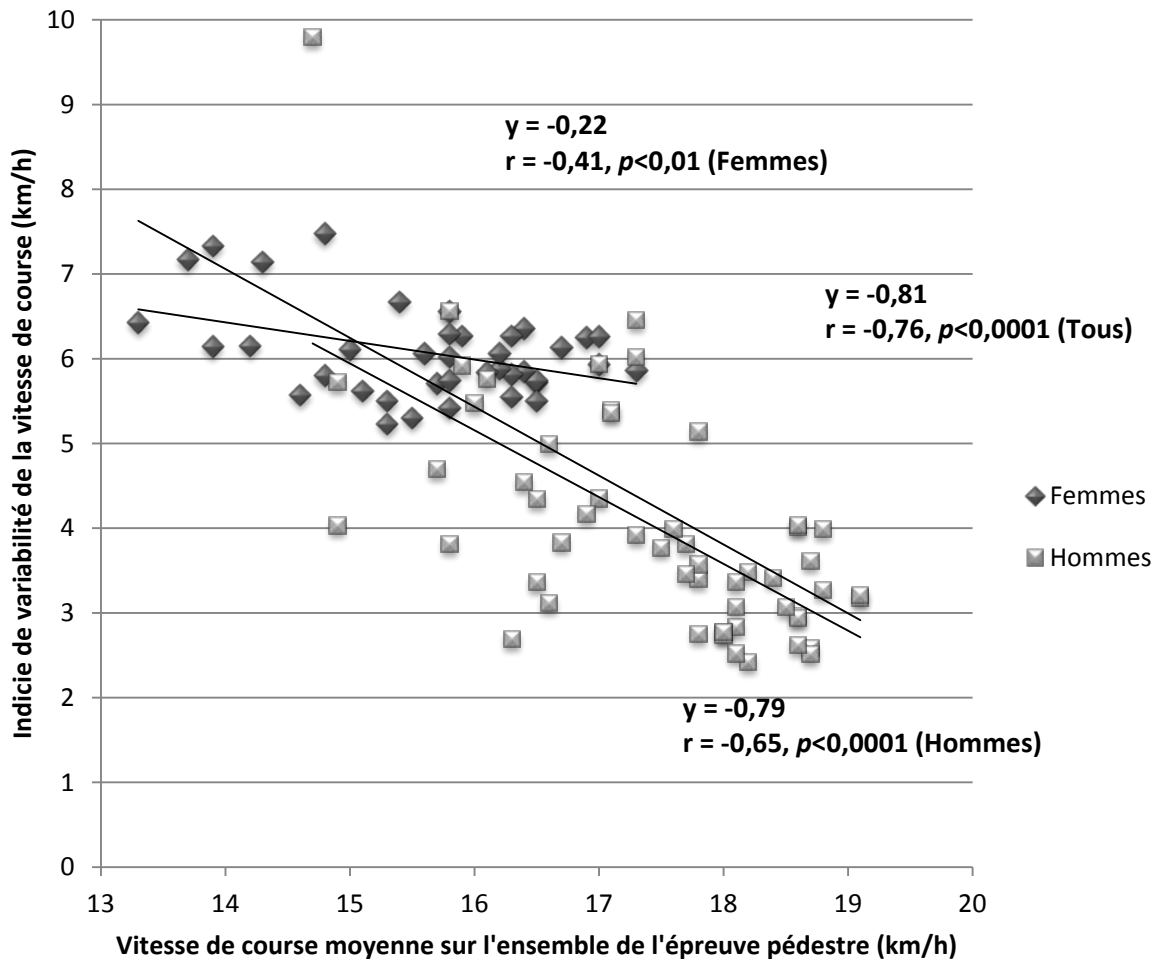


Figure 2. Indices de variabilité de la vitesse de course sur l'ensemble du circuit pédestre en considérant les hommes ($n = 55$), les femmes ($n = 39$) et l'ensemble des participants lors des Championnats d'Europe de Triathlon.

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 ($6,1 \pm 0,5 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ et $4,0 \pm 1,4 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$, 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**).

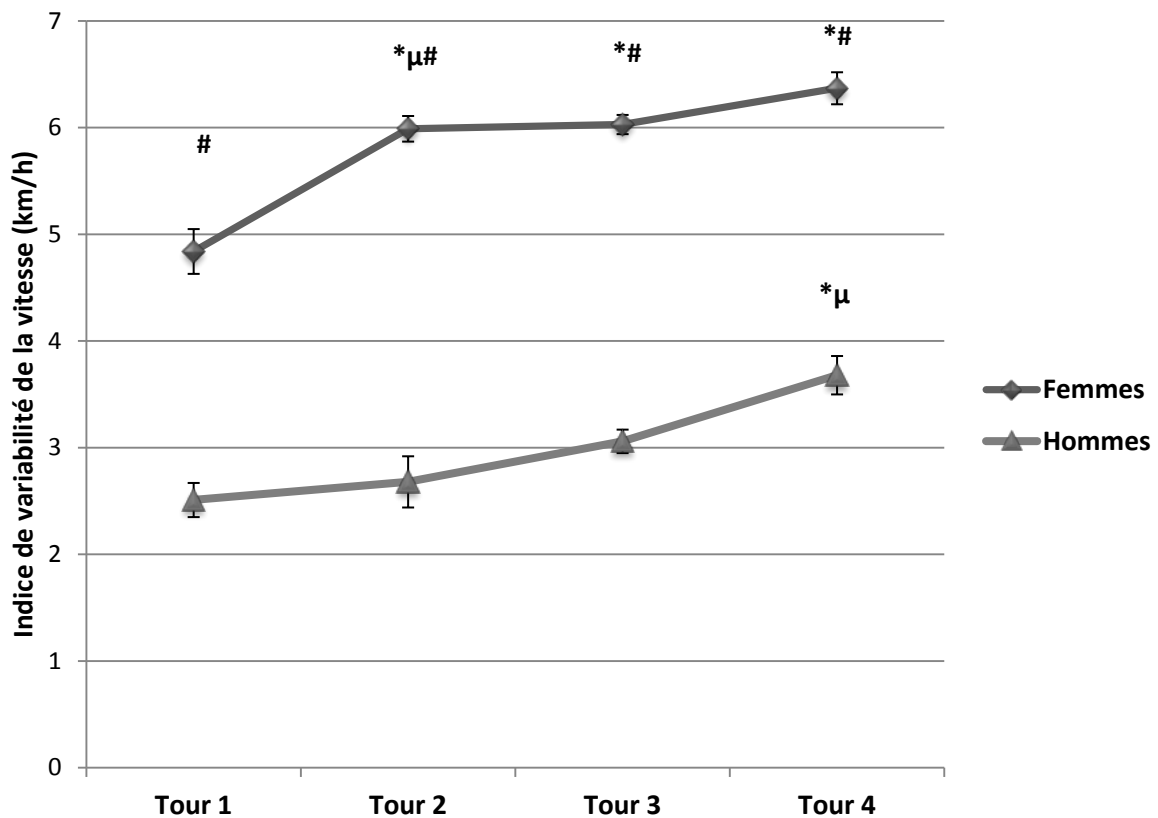


Figure 3. Evolution de l'indice de variabilité de la vitesse de course moyen chez les femmes ($n = 39$) et les hommes ($n = 55$) lors des Championnats d'Europe de triathlon 2009. *Significativement différent du tour 1. ^μSignificativement du tour précédent. #Significativement différent des hommes sur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

La fonction linéaire représentative $f(x) : IVV_{course} = a * Vitesse + b$ 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 $Vitesse_{montée}$ 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 (Hauswirth 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 MENE 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 ($\dot{V}O_{2max}$). 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 $\dot{V}O_{2max}$ 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. 2005) 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 $\dot{V}O_{2max}$ 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 enchaînement 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 $\dot{V}O_{2max}$), 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 (Hauswirth 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	$\dot{V}O_{2max}$ (mlO ₂ .min ⁻¹ .kg ⁻¹)	63,0 ± 4,3
	PMA (W)	347 ± 29
	P _{SV1} (W)	219 ± 24
	P _{SV1} (% $\dot{V}O_{2max}$)	70,6 ± 5,0
	P _{SV2} (W)	280 ± 30
	P _{SV2} (% $\dot{V}O_{2max}$)	87,7 ± 4,9
	$\dot{V}O_{2max}$ (mlO ₂ .min ⁻¹ .kg ⁻¹)	61,6 ± 3,7
Course à pied	Vitesse maximale atteinte (km.h ⁻¹)	18,5 ± 0,7
	V _{SAAAL} (km.h ⁻¹)	15,7 ± 0,6
	V _{SAAAL} (% $\dot{V}O_{2max}$)	86,9 ± 4,6

Tableau 1. Caractéristiques des triathlètes de l'étude ($n = 10$). Les valeurs sont exprimées en moyenne ± écart-type. $\dot{V}O_{2max}$: consommation maximale d'oxygène, PMA: Puissance Maximale Aérobie, P_{SV1}: Puissance au premier seuil ventilatoire, P_{SV2}: Puissance au deuxième seuil ventilatoire, V_{SAAAL}: 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 fatiguant lors des 48h précédant 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 ($\dot{V}O_{2max}$, 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 $\dot{V}O_{2max}$, 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 $11\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$ puis 5min à $13\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$) 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 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 ($[\text{La}^-]_s$) à la fin de la phase cycliste et de T_{lim} .

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

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 métatarse. 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 C&P-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):

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

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} ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-1}$) 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 ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) 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

Les valeurs maximales de puissance et de vitesse atteintes lors des tests incrémentés menés à l'épuisement volontaire ont été de $347 \pm 20\text{W}$ et $18,5 \pm 0,7\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$, respectivement (**Tableau 1**).

5.4.1. PERFORMANCE

La puissance moyenne maintenue lors de la phase cycliste était de $249 \pm 47\text{W}$. La section pédestre de l'épreuve enchaînée cyclisme-course à pied a été réalisée à une vitesse moyenne de $15,7\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$ pour un temps de soutien moyen de $15\text{min}35\text{s} \pm 4\text{min}41\text{s}$.

5.4.2. PARAMETRES PHYSIOLOGIQUES

L'évolution des valeurs de FC, $\dot{V}\text{O}_2$ et \dot{V}_E est représentée par la **Figure 1**. Les valeurs de $\dot{V}\text{O}_2$ n'ont pas démontré de variation significative après $T_{\text{lim}10\%}$ et aucune différence n'a été constatée avec la valeur atteinte lors de CàP-Ctrl après cette période. Les valeurs de FC et de \dot{V}_E étaient supérieures à leur valeur initiale, après $T_{\text{lim}20\%}$ et $T_{\text{lim}30\%}$, respectivement. Les valeurs de FC, $\dot{V}\text{O}_2$, \dot{V}_E , VC et FR durant T_{lim} étaient significativement plus basses que leur valeur maximale atteinte lors du test incrémenté en course à pied ($p < 0,01$).

$\dot{V}_E/\dot{V}\text{O}_2$ a augmenté significativement à partir de $T_{\text{lim}50\%}$ par rapport à sa valeur lors de CàP-Ctrl ($28,2 \pm 0,9$ pour CàP-Ctrl vs. $31,4 \pm 1,1$ à $33,2 \pm 1,2$ entre $T_{\text{lim}50\%}$ et $T_{\text{lim}100\%}$, $p < 0,05$). $\dot{V}_E/\dot{V}\text{CO}_2$ était significativement plus élevé que sa valeur lors de CàP-Ctrl tout au long de T_{lim} ($p < 0,05$). Les valeurs de $\dot{V}_E/\dot{V}\text{O}_2$ et $\dot{V}_E/\dot{V}\text{CO}_2$ sont demeurées sous-maximales lors de T_{lim} ($33,3 \pm 1,4$ vs. $32,6 \pm 1,7$, $p = 0,99$, pour $\dot{V}_E/\dot{V}\text{O}_2$ et $32,4 \pm 1,5$ vs. $34,1 \pm 1,3$, $p = 0,38$, pour $\dot{V}_E/\dot{V}\text{CO}_2$, durant CàP-Ctrl et à $T_{\text{lim}100\%}$, respectivement). QR n'a pas démontré de variation significative avec sa valeur moyenne lors de CàP-Ctrl tout au long de T_{lim} . $[\text{La}]_s$ a augmenté significativement lors de l'épreuve enchaînée mais sa valeur est demeurée inférieure à celle mesurée à la fin de l'épreuve maximal de course incrémentée ($p < 0,01$; **Tableau 2**).

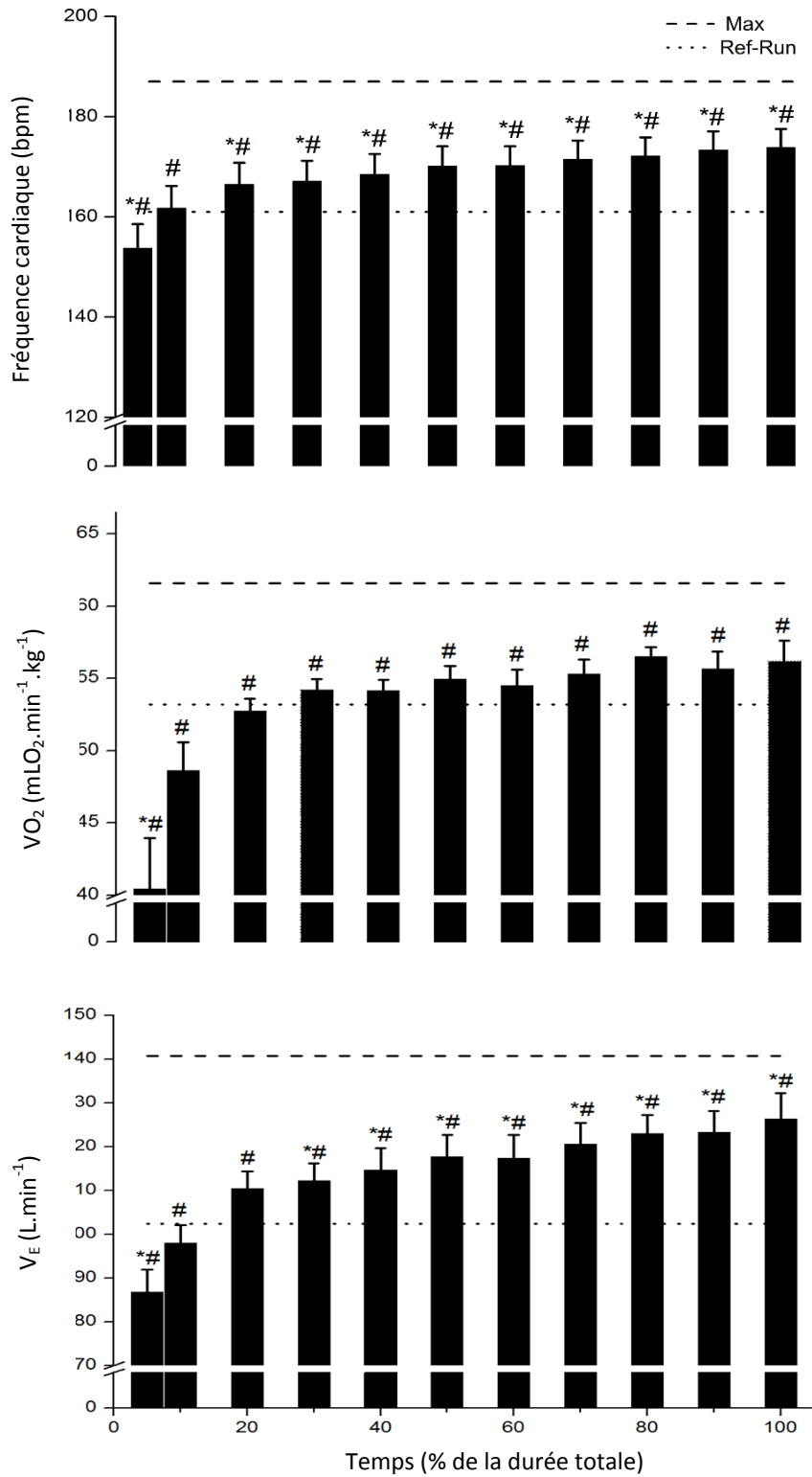


Figure 1. Evolutions des valeurs moyennes de la fréquence cardiaque (FC), de la consommation d'oxygène ($\dot{V}O_2$) et du débit expiratoire (\dot{V}_E) lors de la course enchaînée cyclisme-course à pied menée à l'épuisement volontaire (T_{lim}). Les lignes en tiret représentent la valeur maximale atteinte pour chaque paramètre lors de l'épreuve maximale incrémentée. Les lignes en pointillés représentent les valeurs moyennes atteintes lors de la course-contrôle.

*Significativement différent de la valeur moyenne atteinte lors de la course-contrôle, $p < 0,05$.

Significativement différent de la valeur moyenne atteinte lors de la course maximale incrémentée, $p < 0,05$.

	Test $\dot{V}O_{2max}$	CàP-Ctrl	Epreuve enchaînée cyclisme – course à pied	
			Cyclisme	CàP (T_{lim})
$[La^-]_s$ (mmol.L ⁻¹)	10,5 ± 0,5	3,9 ± 0,3	4,8 ± 0,7 [§]	7,8 ± 0,7 ^{*§£}
Difficulté d'effort perçue	17,9 ± 0,5	12,6 ± 3,5	15,3 ± 0,9 [§]	17,5 ± 0,5 ^{§£}

Tableau 2. Valeurs de lactatémie et de difficulté d'effort perçue lors du test maximal incrémenté en course à pied, de la course-contrôle et à la fin de l'enchaînement cyclisme-course à pied. *Significativement différent de la valeur atteinte lors du test incrémenté, $p < 0,05$. §Significativement différent de la valeur moyenne de la course contrôle, $p < 0,05$. £Significativement différent de la valeur atteinte à la fin de la phase cycliste, $p < 0,05$.

5.4.3. PARAMETRES ELECTROMYOGRAPHIQUES

L'évolution des valeurs RMS moyennes de l'activité EMG est présentée dans le **Tableau 3**. Hormis le *rectus femoris*, aucun muscle n'a démontré de différence significative lors de T_{lim} avec sa valeur enregistrée lors de CàP-Ctrl. Les enveloppes moyennes RMS de l'activité EMG lors de la course-contrôle (CàP-Ctrl), lors de la transition cyclisme-course à pied ($T_{lim5\%}$) et à la fin de la course temps-limite ($T_{lim100\%}$) sont présentées dans la **Figure 2**. Les décalages moyens d'activation musculaire k sont demeurés inférieurs à 1% pour tous les muscles étudiés à toutes les périodes de T_{lim} . Les valeurs de *cross-correlation* étaient supérieures à 0,95 pour tous les muscles à tout moment de T_{lim} , hormis pour le *rectus femoris* ($0,936 \pm 0,048$ à $T_{lim100\%}$). Aucune différence significative n'a été constatée pour ce paramètre entre la valeur mesurée lors de CàP-Ctrl et les périodes de T_{lim} étudiées.

5.4.4. PARAMETRES CINEMATIQUES

L'évolution des paramètres cinématiques lors de T_{lim} est présentée dans le **Tableau 3**. Aucune modification significative des valeurs d'amplitude et de fréquence de foulée n'a été constatée entre CàP-Ctrl et les différentes périodes de T_{lim} . Le temps de contact au sol était significativement plus court jusqu'à $T_{lim40\%}$ mais plus aucune différence significative n'était ensuite constatée. Le temps de vol était significativement plus long à $T_{lim5\%}$ que lors de CàP-Ctrl mais plus aucune différence n'était ensuite identifiée.

5.4.5. RAIDEUR DU MEMBRE INFÉRIEUR

L'évolution des valeurs de la raideur du membre inférieur (K_{MI}) est présentée dans le **Tableau 3**. Celle-ci était significativement supérieure à sa valeur lors de CàP-Ctrl jusqu'à $T_{lim40\%}$ mais plus aucune différence n'était ensuite constatée jusqu'à T_{lim} avec la valeur moyenne de la course référence.

5.4.6. DIFFICULTE D'EFFORT PERÇUE

L'évolution de la difficulté d'effort perçue est présentée dans le **Tableau 2**. Les sujets considéraient que le niveau de difficulté à l'arrêt du temps-limite se situait entre « très difficile » et « très très difficile » (difficulté d'effort perçue à $T_{lim100\%} = 17,5 \pm 0,5$). Aucune différence significative n'était constatée entre la valeur moyenne de difficulté d'effort perçue à la fin de l'épreuve incrémentée en course à pied par rapport à la fin de l'épreuve temps-limite ($17,5 \pm 0,5$ vs. $17,9 \pm 0,5$, $p = 0,71$).

Muscles	CàP-Ctrl	T _{lim5%}	T _{lim20%}	T _{lim40%}	T _{lim60%}	T _{lim80%}	T _{lim100%}
Amplitude de foulée (m)	2,95 ± 0,02	2,95 ± 0,03	2,95 ± 0,03	2,95 ± 0,04	2,96 ± 0,04	2,93 ± 0,04	2,96 ± 0,03
Fréquence de foulée (Hz)	1,47 ± 0,01	1,47 ± 0,01	1,47 ± 0,01	1,47 ± 0,02	1,47 ± 0,02	1,48 ± 0,02	1,46 ± 0,02
Temps de contact (ms)	222 ± 6	212 ± 6*	216 ± 6*	216 ± 7*	220 ± 7	218 ± 7	218 ± 6
Temps de vol (ms)	120 ± 5	130 ± 6*	127 ± 6	127 ± 7	124 ± 7	122 ± 8	126 ± 7
K _{Mi} (kN.m ⁻¹)	8,78 ± 0,58	9,68 ± 0,61*	9,29 ± 0,54*	9,30 ± 0,55*	8,99 ± 0,59	8,95 ± 0,54	9,05 ± 0,51
TA	100,0 ± 0,0	107,7 ± 7,8	93,6 ± 4,7	87,7 ± 5,4	92,2 ± 7,7	90,0 ± 5,9	85,7 ± 4,6
SOL	100,0 ± 0,0	100,4 ± 3,9	96,5 ± 4,5	97,1 ± 4,1	95,1 ± 4,3	92,5 ± 3,7	92,7 ± 3,9
GaL	100,0 ± 0,0	101,7 ± 5,9	96,3 ± 5,3	95,2 ± 6,6	93,7 ± 6,2	92,0 ± 5,7	91,1 ± 6,9
GaM	100,0 ± 0,0	105,5 ± 3,4	102,7 ± 4,3	102,7 ± 4,6	101,9 ± 5,4	94,7 ± 3,2	93,2 ± 3,7
VL	100,0 ± 0,0	101,6 ± 5,4	97,1 ± 4,4	98,0 ± 4,4	97,8 ± 5,6	96,6 ± 6,6	97,8 ± 6,9
VM	100,0 ± 0,0	112,3 ± 5,6	118,1 ± 15,7	112,6 ± 9,2	99,7 ± 3,4	99,6 ± 4,5	98,2 ± 3,8
RF	100,0 ± 0,0	105,6 ± 5,9	100,4 ± 4,1	98,3 ± 4,8	94,1 ± 4,6	94,8 ± 6,4	92,5 ± 6,0*
SM	100,0 ± 0,0	92,1 ± 2,8	93,7 ± 2,8	96,1 ± 2,9	92,8 ± 2,4	94,1 ± 3,7	93,4 ± 2,2
BF	100,0 ± 0,0	104,5 ± 8,1	100,0 ± 5,6	99,8 ± 6,0	98,9 ± 6,6	97,0 ± 5,8	95,8 ± 6,1

Tableau 3. Evolution durant la course-contrôle (CàP-Ctrl) et la course temps-limite (T_{lim}) des paramètres cinématiques, de la raideur du membre inférieur (K_{Mi}) et de la valeur RMS moyenne lors de la foulée des 9 muscles du membre inférieur étudiés (Moyenne ± erreur-standard). TA: *tibialis anterior*, SOL: *soleus*, GaL: *gastrocnemius lateralis*, GaM: *gastrocnemius medialis*, VL: *vastus lateralis*, VM: *vastus medialis*, RF: *rectus femoris*, SM: *semimembranosus*, BF: *biceps femoris*. Les valeurs RMS lors de T_{lim} étaient normalisées par rapport à la valeur atteinte lors de CàP-Ctrl. *, Significativement différente de la valeur moyenne lors de CàP-Ctrl, $p < 0,05$.

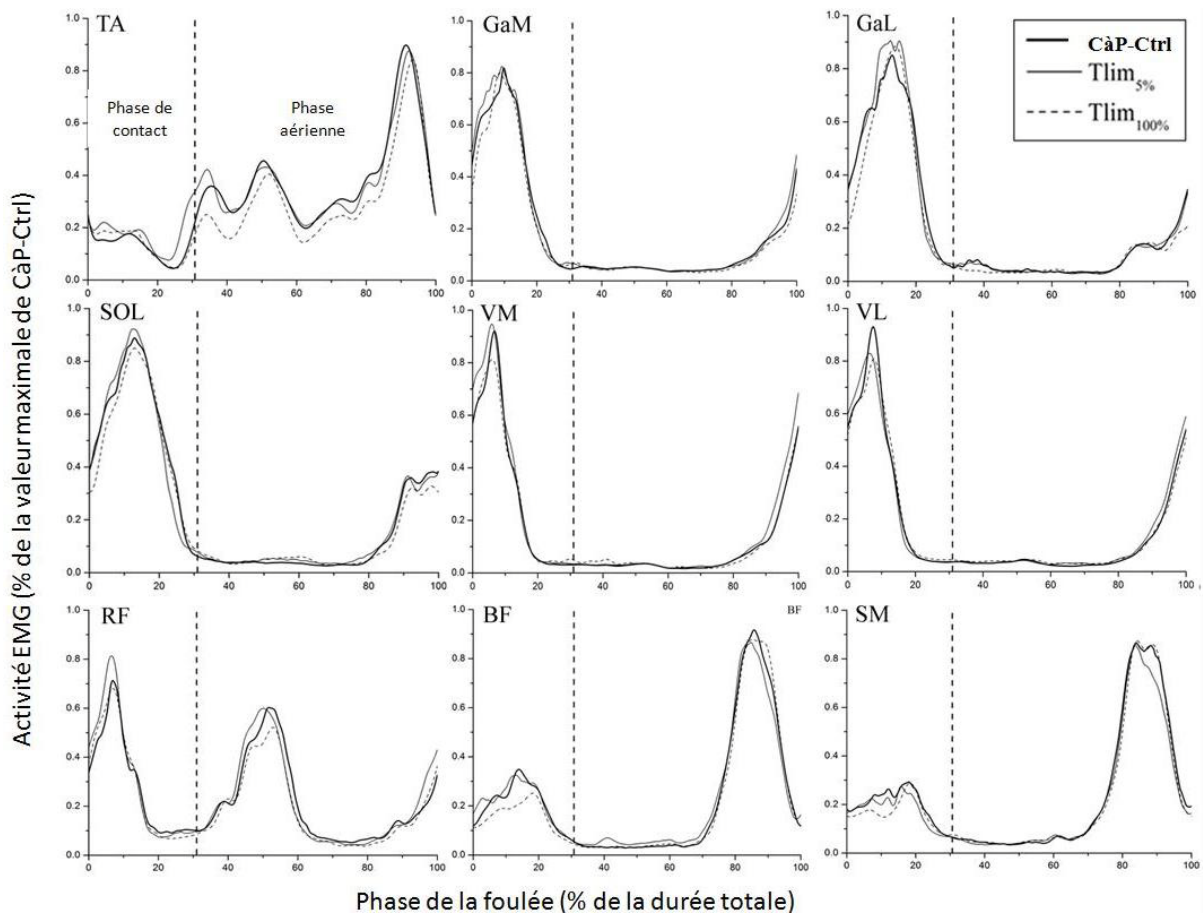


Figure 2. Ensemble des courbes RMS de l'activité EMG des 9 muscles du membre inférieur étudiés lors de la course-contrôle (CàP-Ctrl, lignes noires), au départ de la course à pied enchaînée ($T_{lim5\%}$, lignes grises) et à la fin de l'épreuve temps-limite ($T_{lim100\%}$, lignes pointillées). Chaque profil représente la valeur moyenne mesurée sur 30 foulées consécutives, normalisée par rapport à la valeur maximale atteinte lors de CàP-Ctrl (« patron de référence ») puis elle-même moyennée sur les dix triathlètes. Les lignes pointillées verticales représentent la fin du contact du pied droit au sol. BF, *biceps femoris*; GL, *gastrocnemius lateralis*; GM, *gastrocnemius medialis*; RF, *rectus femoris*; SM, *semimembranosus*; SOL, *soleus*; TA, *tibialis anterior*; VL, *vastus lateralis*; VM, *vastus medialis*.

5.5. DISCUSSION PARTIELLE

Ces résultats suggèrent que les triathlètes ont stoppé l'exercice lors d'un enchaînement cyclisme-course à pied mené à l'épuisement volontaire (*i.e.* ils n'étaient plus capables de maintenir la stratégie constante imposée), 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. Les valeurs de FC, $\dot{V}O_2$, \dot{V}_E et $[La^-]_s$ sont restées inférieures à leur valeur maximale respective atteinte lors du test de détermination de $\dot{V}O_{2max}$. Seul le muscle *rectus femoris* a révélé une diminution de son activité EMG à la fin du temps-limite, tandis qu'aucune variation significative de la valeur RMS moyenne n'a été constatée sur l'ensemble des 10 triathlètes pour les 8 autres muscles étudiés (TA,

SOL, GaM, GaL, VM, VL, BF, SM). Ces résultats ont révélé une forte stabilité des timings d'activation musculaire et des profils RMS pour les 9 muscles investigués, tandis que la raideur du membre inférieur n'a jamais baissé lors du temps-limite par rapport à sa valeur de référence. De nouvelles 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. Le maintien de valeurs sous-maximales pour les paramètres métaboliques et cardiorespiratoires et la stabilité du patron de recrutement neuromusculaire lors tout au long de l'épreuve maximale ne permettent pas d'affirmer avec certitude que l'incapacité à maintenir l'allure de course initiale imposée n'était pas reliée à une défaillance physiologique.

**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 $\dot{V}O_{2max}$ en natation, en cyclisme et en course à pied, de la capacité à maintenir un pourcentage élevé de $\dot{V}O_{2max}$, 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. DÉCRIRE LES STRATÉGIES 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 ($38\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$), 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 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 1 mmol.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; Hauswirth 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 précitées) 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 (Hauswirth 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 (Hauswirth 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 prématuré, 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. 2001), 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 prématurées 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 $\dot{V}O_{2max}$ vs. 75% de $\dot{V}O_{2max}$), 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-enchaînées « 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 $\dot{V}O_{2max}$ 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 EqO_2 et $EqCO_2$ 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 CO_2 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, hématicrite 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 de les études n°2, n°3 et n°4 (Hauswirth 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 investiguées post-exercice. Une analyse de certains paramètres sanguins (statut acido-basique, ammoniémie, hémocrite 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. L'analyse des données de vitesse dans les trois disciplines du triathlon et des relevés de puissance de pédalage en cyclisme collectées lors des coupes du monde Madrid 2010, Londres 2010, Londres 2011 et Pékin 2011 permettra d'appréhender cette question.

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. Les enregistrements cinématiques effectués à l'aide de caméras haute fréquence lors de la course à pied des manches de coupe du Monde de Pékin 2011 et Sydney 2012 permettront par ailleurs de discuter de l'évolution du comportement du modèle masse-ressort décrite en laboratoire lors de l'étude n°5.

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
- 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
- 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
- Baden 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 (2010) The role of emotions on pacing strategies and performance in middle and long duration sport events. *Br J Sports Med*
- 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, 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
- 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
- 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
- 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
- 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
- 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
- Cafarelli E (1982) Peripheral contributions to the perception of effort. *Med Sci Sports Exerc* 14: 382-389
- 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
- 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
- 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
- Clarkson PM (2007) Exertional rhabdomyolysis and acute renal failure in marathon runners. *Sports Med* 37: 361-363
- Coyle EF, Coggan AR (1984) Effectiveness of carbohydrate feeding in delaying fatigue during prolonged exercise. *Sports Med* 1: 446-458

- 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
- Damasio 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
- 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
- Decorte N, Lafaix PA, Millet GY, Wuyam B, Verges S (2010) Central and peripheral fatigue kinetics during exhaustive constant-load cycling. *Scand J Med Sci Sports*
- Delextrat A, Bernard T, Hauswirth 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
- Delextrat A, Brisswalter J, Hauswirth 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
- Delextrat A, Tricot V, Bernard T, Vercruyssen F, Hauswirth 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
- 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, 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
- 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
- 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
- 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
- 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 (2005) The science of cycling: factors affecting performance - part 2. *Sports Med* 35: 313-337
- 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, 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
- 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
- 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, Couret 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
- 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
- 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
- Hauswirth 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
- Hauswirth 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
- Hauswirth 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
- Hauswirth 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
- Hauswirth 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
- Hauswirth 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
- Hauswirth 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 (2010) Relative importance of pacing strategy and mean power output in 1500-m self-paced cycling. *Br J Sports Med*
- Hill NS, Jacoby C, Farber HW (1991) Effect of an endurance triathlon on pulmonary function. *Med Sci Sports Exerc* 23: 1260-1264
- Hopkins WG (2009) The implausible governor. *Sportscience* 13: 9-11
- 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
- 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
- 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
- Impellizzeri 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
- 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
- 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, Cundiff DE, Hammett JB, Cortes CW, Williams KW (1988b) 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 homeostatic 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
- 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, 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
- 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 (2010) 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
- Luke AC, Bergeron MF, Roberts WO (2007) Heat injury prevention practices in high school football. *Clin J Sport Med* 17: 488-493
- Marcora 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
- 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, Geysant 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

Medbo JJ, 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

Micklewright D, Papadopoulou E, Swart J, Noakes T (2010) Previous experience influences pacing during 20 km time trial cycling. *Br J Sports Med*

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, 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 (2002) 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

Mizrahi J, Verbitsky O, Isakov E (2000) Shock accelerations and attenuation in downhill and level running. *Clin Biomech (Bristol, Avon)* 15: 15-20

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 (2010) 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

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

Nakamura 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

Neumayr G, Pfister R, Mitterbauer G, Gaenger 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 (2001) 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
- 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 (2008) 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, 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. *Journal of Applied Physiology* 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. Marcora. *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
- Padilla S, Mujika I, Angulo F, Goirienea JJ (2000a) Scientific approach to the 1-h cycling world record: a case study. *J Appl Physiol* 89: 1522-1527
- 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 (2005) Effect of swimming intensity on subsequent cycling and overall triathlon performance. *Br J Sports Med* 39: 960-964; discussion 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
- 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
- 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
- Pugh LG (1962) Physiological and medical aspects of the Himalayan scientific and mountaineering expedition, 1960-61. *Br Med J* 2: 621-627
- 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
- Rainoldi 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 *Journal of Thermal Biology* 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
- Rejeski WJ, Ribisl PM (1980) Expected task duration and perceived effort: an attributional analysis. *J Sport Psychol* 39: 249-254
- Robertson RJ (1982) Central signals of perceived exertion during dynamic exercise. *Med Sci Sports Exerc* 14: 390-396
- 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
- 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
- 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
- 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
- Schiff HB, MacSearraigh ET, Kallmeyer JC (1978) Myoglobinuria, rhabdomyolysis and marathon running. *Q J Med* 47: 463-472
- 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
- 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
- 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, Schabert EJ, Noakes TD (2001b) Reduced neuromuscular activity and force generation during prolonged cycling. *Am J Physiol Regul Integr Comp Physiol* 281: R187-196
- 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
- Stephens 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
- Takai K (1998) Cognitive strategies and recall of pace by long-distance runners. *Percept Mot Skills* 86: 763-770
- Tattersall 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
- 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
- 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, Raunch 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. *Pflügers Arch* 448: 422-430
- Ulmer HV (1996) Concept of an extracellular regulation of muscular metabolic rate during heavy exercise in humans by psychophysiological feedback. *Experientia* 52: 416-420
- 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
- 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. *British Journal of Sports Medicine* 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
- 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, Loooverie 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 GP (2008) Clinical significance of cardiac damage and changes in function after exercise. *Med Sci Sports Exerc* 40: 1416-1423

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

Winter DA (1979) *Biomechanics of human movement*. Wiley & Sons, New York

Wittekind AL, Micklewright D, Beneke R (2009) Teleoanticipation in all-out short duration cycling. *Br J Sports Med*

Wittekind AL, Micklewright D, Beneke R (sous presse) 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

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

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 multivariable ; 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.