Optimisation des stratégies d'acclimatation à la chaleur : impact sur les réponses psychophysiologiques à l'exercice

Gilles Roussey

▶ **To cite this version:**

Gilles Roussey. Optimisation des stratégies d'acclimatation à la chaleur : impact sur les réponses psychophysiologiques à l'exercice. Education. COMUE Université Côte d'Azur (2015 - 2019), 2018. Français. NNT : 2018AZUR4224 . tel-02103235

HAL Id: tel-02103235

https://theses.hal.science/tel-02103235

Submitted on 18 Apr 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.

UNIVERSITÉ CÔTE D'AZUR

ÉCOLE DOCTORALE
SCIENCES DU MOUVEMENT HUMAIN

OPTIMISATION DES STRATEGIES D'ACCLIMATATION A LA CHALEUR

Impact sur les réponses psychophysiologiques à l'exercice

Gilles ROUSSEY

Laboratoire LAMHESS (EA 6312)

Présentée en vue de l'obtention du grade de docteur en Sciences du Mouvement Humain **de** l'Université Côte d'Azur

Dirigée par :
M. Thierry BERNARD, MCU-HDR

Soutenue le : 12 décembre 2018

Devant le jury, composé de :
Mme Fabienne d'ARRIPE-LONGUEVILLE, PU, U Côte d'Azur, *Présidente*
Mme Nathalie KOULMANN, PU, IRBA Brétigny Sur Orge, *Rapporteuse*
M. Romuald LEPERS, PU, U Bourgogne, *Rapporteur*
M. Olivier CASTAGNA, PhD-HDR, IRBA Toulon, *Examinateur*
M. Jérémy COQUART, PU, U Rouen, *Examinateur*
M. Thierry BERNARD, MCU-HDR, U Toulon, *Directeur de thèse*

OPTIMISATION DES STRATEGIES D'ACCLIMATATION A LA CHALEUR

Impact sur les réponses physiologiques à l'exercice

Jury

Président du jury

Fabienne d'ARRIPE-LONGUEVILLE, P.U., Université Nice Sophia Antipolis

Rapporteurs du jury

Nathalie KOULMANN, P.U., IRBA Brétigny-sur-Orge

Romuald LEPERS, P.U., Université de Bourgogne

Examinateurs du jury

Olivier CASTAGNA, Ph.D., HDR, IRBA Toulon

Jérémy COQUART, P.U., Université de Normandie

Directeur de thèse

Thierry BERNARD, MCU, HDR, Université Toulon Var

OPTIMISATION DES STRATEGIES D'ACCLIMATATION A LA CHALEUR

Impact sur les réponses physiologiques à l'exercice

Résumé

De multiples événements sportifs majeurs vont se dérouler prochainement dans des environnements chauds voire tropicaux, justifiant l'intérêt scientifique actuel pour les questions associées à l'effet de la chaleur sur la performance en endurance. Il est admis que l'effort est subjectivement perçu comme plus difficile, en parallèle de la dégradation de la performance, à mesure que la température ambiante s'élève au cours d'une épreuve prolongée. Contrecarrer les effets délétères de la chaleur passe notamment par une exposition répétée dans des conditions écologiques ou simulées d'exercice (*i.e.* stratégie d'acclimatation). Toutefois, le décalage actuel entre les recommandations d'application issues d'études scientifiques et les conditions réelles de préparation et d'organisation des athlètes de haut niveau est à l'origine d'un faible engouement actuel pour de telles méthodes. Par conséquent, ce travail de thèse a eu pour ambition de répondre à certaines inconnues relatives à l'application de contenus d'entraînement classiques en ambiance chaude, en particulier *(i)* leur conséquence sur la capacité de performance de l'athlète et *(ii)* les moyens d'optimiser le contrôle et la régulation de la charge d'entraînement. Dans ce contexte, nous avons proposé à des sujets entraînés de soutenir la production de seuils de RPE (*i.e.* exercice à RPE fixe) dans un cadre expérimental puis d'entraînement. Au-delà de la validité de ce modèle, nous soutenons que la régulation volontaire de l'intensité dépend, au-delà de la perception de l'effort, de l'état émotionnel et de la motivation de l'individu. Lors d'une première étude, nous avons recherché à comparer les performances de solutions techniques pour le suivi de la température centrale en conditions écologiques (*i.e.* température gastro-intestinale *vs.* température frontale par capteur à annulation de flux). Les résultats obtenus ont validé l'usage du capteur à annulation de flux comme alternative pendant l'exercice, en dépit de l'absence de corrélation avec les mesures gastro-intestinales. Ceci suggère d'éventuelles perspectives en matière de contrôle de la température corporelle pendant l'exercice. La seconde étude s'est intéressée aux possibles conséquences de la répétition de sessions d'entraînement exigeantes et des contraintes logistiques d'un stage d'acclimatation (*i.e.* accumulation de fatigue mentale) sur la perception de l'effort et la performance. En dépit de l'absence d'effets combinés de la tâche cognitive préexercice et de la chaleur ambiante, les résultats tendent à démontrer le rôle-clé de la température cutanée et de la sensation de chaleur sous-jacente dans la régulation de la puissance soutenue à RPE-15 (chaud *vs.* tempéré : -0,022 *vs.* -0,008 $W.kg^{-1}.min^{-1}$). Enfin, la troisième étude suggère un potentiel intérêt de l'application de hautes intensités autorégulées, associée à une diminution du

volume d'entraînement (-23%), lors d'une période d'acclimatation de courte durée (*i.e.* 5 jours). Le moindre effet observé, en comparaison d'un protocole à intensité fixe, sur la performance au cours d'un exercice de contre-la-montre (*i.e.* expérimental *vs.* fixe : 1,4 *vs.* 2,8 %) soulève toutefois l'importance du rapport volume-intensité dans la construction d'un protocole d'acclimatation. De manière générale, l'ensemble des résultats de cette thèse offrent des perspectives pour une individualisation et une adaptation spécifique à l'activité sportive des protocoles d'acclimatation à la chaleur.

Mots-clés

Acclimatation à la chaleur ; contrainte thermique ; exercice à libre allure ; perception de l'effort ; température centrale

OPTIMIZE HEAT ACCLIMATION STRATEGIES

Impact on exercise-induced psychophysical answers

Abstract

The increasing number of major sport events that will take place in hot and/or tropical environments justify the current scientific interest in the effects of heat strain on endurance performance. During a prolonged self-paced exercise, it is well known that the subjectively perceived effort is higher as the ambient temperature increases and the performance level decreases. A repeated exposure to the heat in ecological and/or simulated exercise conditions may counteract the subsequent deleterious effects. However, the discrepancy between guidelines from scientific research and training priorities of well-trained athletes causes a lack of interest in these methods. Therefore, we aimed through the current thesis work to improve the current knowledge about heat acclimation strategies, more precisely about *i)* its effects on athlete's performance capacity and *ii)* the optimization of training load monitoring and building. To shed light on these issues, we proposed to our trained and/or well-trained subjects to cycle at a fixed RPE first in an experimental framework, and then during a training program. We submit that the self-regulation of fixed-RPE exercise work rate depends not only of perceived exertion but also on emotional and motivational parameters. The first study aimed to compare the performance of technical devices for core temperature monitoring in ecological conditions (*i.e.* gastrointestinal point *vs.* forehead point from a zero-heat-flux sensor). Results showed that zero-heat-flux measurements might be considered as relevant during exercise. In this way, some opportunities may be considered for the monitoring of body temperature during field-based exercise. The second study investigated the subsequent effects of repeated strenuous training sessions and logistical constraints during a heat camp (*i.e.* higher mental fatigue) on perceived exertion and endurance performance. Despite the lack of combined effects from the prior cognitive task and the ambient condition during exercise, skin temperature and underlying heat sensation impact the linear decrease of power output at RPE-15 (hot *vs.* neutral: -0,022 *vs.* -0,008 $W.kg^{-1}.min^{-1}$). Lastly, the third study suggested an interest for self-regulated high intensities, associated with a decrease of the total exposure duration (-23%), during a short-term heat acclimation protocol (*i.e.* 5 days). However, the slighter effect on the improvement of performance in comparison with a classic constant-power training program, (HIT *vs.* constant-power: 1,4 *vs.* 2,8 %) provides scope for the building of training load (*i.e.* volume *vs.* intensity) in this context. In summary, the overall results of this thesis work open some perspectives for individualizing or adapting heat acclimation strategies to sport-specific conditions.

Keywords:

Heat acclimation; Heat strain; Self-paced exercise; Perception of effort; Core temperature

REMERCIEMENTS

Voilà, c'est fait… A l'heure où j'écris ces mots, je m'apprête à tourner la page de presque cinq ans de ma vie pendant lesquels ce travail n'aura quasiment jamais quitté mon esprit. Je souhaite donc adresser tous mes remerciements aux personnes qui, de près ou de loin, ont été présentes à mes côtés pendant cette longue période…

…MM. Nathalie KOULMANN et Romuald LEPERS qui me font l'honneur d'accepter l'expertise de ce travail, ainsi que MM. Fabienne d'ARRIPE-LONGUEVILLE, Olivier CASTAGNA et Jérémy COQUART pour leur participation au jury de thèse.

…Tous les sujets qui ont accordé leur temps et leur énergie lors des protocoles expérimentaux, et sans qui ce travail n'aurait aucune valeur… Par leur présence je leur dois beaucoup.

…L'équipe de l'UFR STAPS de Toulon pour leur accueil durant cette période, en particulier les collègues étudiants et enseignants qui m'auront grandement épaulé dans la conduite de ce travail. Une pensée particulière à Thibaut, Joffrey et Mohamed pour le temps partagé ensemble au cours des manips.

…Les personnes qui nous ont accordé leur temps et leur expertise précieuse, en particulier un grand merci à Claudine GEHIN et Julien LOUIS.

…MM. Serge COLSON et Laurent FICHET, je tiens à vous exprimer toute ma gratitude et ma reconnaissance pour m'avoir fait confiance à des moments-clés de mon parcours. Cette thèse n'aurait sans doute jamais vu le jour sans cela…

…Thierry, je suis vraiment heureux et fier d'avoir été sous la direction du passionné, de l'expert et de la personne que tu es. Tout n'a pas été simple, à commencer par moi, mais ton aide et tes encouragements m'auront aidé à garder le cap !

Clément, merci d'avoir contribué à ce que la liaison entre Lyon et Toulon fonctionne bien, et pour ton soutien précieux. Je te souhaite le meilleur pour la suite !

Mes amis de Toulon, Mohamed, Maxime, Loubna et Richard… Votre présence et les moments passés ensemble auront été importants pour moi.

Une pensée pour tous mes proches, famille ou amis, pour lesquels je n'ai pas toujours été très présent ces derniers temps… J'espère que l'avenir m'accordera un peu plus de temps à passer auprès de vous. Sachez en tout cas que vous n'avez pas quitté mes pensées malgré la distance !

Mes parents et ma sœur, sans tout ce que vous m'avez transmis ou donné alors je n'aurais jamais eu la moindre chance d'en arriver là… Je serai toujours là pour vous.

Enfin, Maïlys, tout ton amour (et ta patience) au quotidien m'auront aidé à aller au bout de ce travail. Une page se tourne à présent mais la suite de l'histoire sera encore plus belle…

TABLE DES MATIERES

LISTE DES FIGURES **11**
CONTEXTE DE LA THESE **14**
PUBLICATIONS ET COMMUNICATIONS **15**
INTRODUCTION GENERALE **16**
CADRE THEORIQUE **21**
1. LA PERCEPTION DE L'EFFORT **22**
1.1. L'effort 22
1.2. La perception de l'effort 23
1.3. Bases neurophysiologiques de la perception de l'effort 25
1.4. Régulation de l'allure lors d'un exercice prolongé 28
1.5. Rôle joué par les facteurs émotionnels et affectifs 38
2. L'EXERCICE A PERCEPTION D'EFFORT FIXE **44**
2.1. Généralités 44
2.2. Méthodologie de l'exercice à perception d'effort fixe 45
2.3. Concept et limites du « RPE clamp protocol » 48
2.4. Le rôle des facteurs affectifs et motivationnels 51
2.5. Perspectives dans le cadre de l'entraînement 54
3. CHALEUR ET PERFORMANCE **58**
3.1. Chaleur et performance sportive 58
3.2. Mécanismes autonomes liés à la chaleur 63
3.3. Adaptations psychophysiologiques à l'hyperthermie 71
4. L'ACCLIMATATION A LA CHALEUR **88**
4.1. Généralités 88
4.2. Acclimatation et adaptations psychophysiologiques 89
4.3. Comment s'acclimater à la chaleur ? 93
PROBLEMATIQUE ET OBJECTIFS **99**
METHODOLOGIE **102**
1. CARACTERISTIQUES DES POPULATIONS INCLUSES **103**
1.1. Méthode d'évaluation des caractéristiques anthropométriques 103
1.2. Méthode d'évaluation des caractéristiques physiologiques 103
1.3. Description des populations incluses 104
2. PROTOCOLE D'EXERCICE DE REFERENCE **105**

2.1. L'exercice à RPE fixe 105
2.2. La chambre climatique 106
3. MESURE DE LA TEMPERATURE CORPORELLE 108
3.1. Contrôle de la température centrale 108
3.2. Contrôle de la température cutanée 113
4. MESURE DES MARQUEURS PHYSIOLOGIQUES 116
4.1. Mesure de la fréquence cardiaque 116
4.2. Contrôle des marqueurs urinaires 116
4.3. Contrôle des marqueurs sanguins 117
4.4. Contrôle des marqueurs sudoraux 117
5. MESURE DES MARQUEURS NEUROMUSCULAIRES 118
6. MESURE DES MARQUEURS PSYCHOPHYSIOLOGIQUES 121
6.1. Contrôle préexercice de l'état de forme du sujet 121
6.2. Contrôle préexercice de l'humeur 121
6.3. Contrôle de la perception de l'effort 121
6.4. Contrôle de la perception thermique 121
6.5. Contrôle post-exercice de la charge subjective 122
PRESENTATION DES TRAVAUX EXPERIMENTAUX 123
ETUDE I 124
ETUDE II 135
ETUDE III 158
DISCUSSION GENERALE 185
CONCLUSION ET PERSPECTIVES 193
REFERENCES 196

LISTE DES FIGURES

Fig. 1 Exemples d'échelles psychophysiologiques pour l'estimation de la perception de l'effort (issu de Pageaux, 2016). De gauche à droite : échelle RPE 6-20 de Borg ; échelle « category ratio » ou CR-10 ; échelle CR-100. 24

Fig. 2 Représentation schématisée du « Modèle Explicatif Global » proposé par Noble et Robertson (1996 ; inspiré de Coquart, 2016) 27

Fig. 3 Représentation schématique du modèle cardiovasculaire de la fatigue proposé par A.V. Hill (1922) 29

Fig. 4 Représentation schématique de l'hypothèse de l'inhibition supraspinale réflexe pour expliquer la performance en endurance (issu de Amann et Dempsey, 2008) 31

Fig. 5 Représentation schématique du modèle théorique dit du « gouverneur central » (issu de Noakes, 2012) 32

Fig. 6 Représentation schématique du mécanisme anticipatoire intervenant au cours de l'exercice à libre allure (issu de Tucker, 2009) 33

Fig. 7 Description de l'interaction entre perception de l'effort et motivation potentielle selon le modèle psychobiologique. Ce schéma matérialise la variation du seuil de RPE maximal que peut tolérer le sujet, selon sa condition physique (*i.e.* individu X *vs.* individu Y), dans le cas d'une motivation faible (A) ou élevée (B) (issu du compte Tweeter de Samuele Marcora). 38

Fig. 8 Présentation du rapport entre intensité de l'exercice et réponses affectives selon l'hypothèse du « mode duel » (issu de Ekkekakis et al., 2005). 40

Fig. 9 Schématisation de l'interrelation entre la nature de la tâche, les réponses physiologiques, les processus psychologiques et l'ajustement de l'activité du système nerveux central sur les stratégies d'allure lors d'un exercice libre (issu de Baron et al., 2009). 42

Fig. 10 Relation entre perception de l'effort (RPE) et temps exprimé de manière absolue (A) ou relative à la durée totale d'un exercice à intensité fixe (B), démontrant la théorie dite du « temps scalaire » (issu de Noakes, 2004). 44

Fig. 11 Méthode de détermination du seuil de capacité de travail à RPE fixe (B), à partir des relations entre RPE et temps lors du maintien de quatre seuils de puissance fixe (A) pendant un exercice de pédalage (issu de Mielke et al., 2008). 47

Fig. 12 Variation moyenne de la puissance développée au cours d'un exercice à RPE-16 reproduit en ambiance froide (COOL ; 15 °C), tempérée (NORM ; 25 °C) et chaude (HOT ; 35 °C) (issu de Tucker et al., 2006). 49

Fig. 13 Variation moyenne de la puissance (à gauche) et de la fréquence cardiaque (à droite) au cours d'un exercice de pédalage à RPE-16 reproduit après consommation de méthylphénidate et après ingestion d'une substance « placebo » (issu de Swart et al., 2009)..... 53

Fig. 14 Expression de la puissance moyenne au cours des 3 premières et des 3 dernières minutes d'un exercice à RPE-16 reproduit avec ventilation d'air frais de face (COOL), avec ventilation d'air chaud de face (WARM), après application d'une solution mentholée (MEN) ou de capsaïcine (CAP) sur le visage (issu de Schlader et al., 2011). 54

Fig. 15 Graphique comparatif représentant les pourcentages de variation, pour chaque distance en athlétisme (*i.e.* 100m au marathon), entre les performances en ambiance tempérée et chaude chez les hommes (a) et chez les femmes (b) (Issu de Guy et al., 2014)..... 58

Fig. 16 Distribution graphique des performances chez les participants de sexe masculin aux marathons de Chicago 2002 (T = 5,4 °C ; A) et 2007 (T = 25 °C ; C), et de Paris 2002 (T = 7,6 °C ; B) et 2007 (T = 17,4 °C ; D) (Issu de El Helou et al., 2012). 60

Fig. 17 Evolution moyenne de la puissance développée au cours d'un exercice de contre-la-montre sur ergcycle de 20 km reproduit en ambiance tempérée (20 °C ; COOL) et chaude (35 °C ; HOT) (issu de Tucker et al., 2004)..... 62

Fig. 18 Description des différences sources d'échange de chaleur entre l'homme et son environnement proche au cours de l'exercice (issu de Exercise Physiology : Nutrition, Energy and Human Performance, 8th Edition, W.D. McArdle et al., 2015). 64

Fig. 19 Diagramme schématique représentant le fonctionnement des mécanismes autonomes de thermorégulation. T_{SET} = seuil thermique de déclenchement ; T_{CO} = température centrale ; T_{SK} = température cutanée (Issu de Sawka and Young, 2006)..... 66

Fig. 20 Expression de la sensibilité locale de l'activité sudomotrice à des variations transitoires et artificielles de la température cutanée : élévation de 4 °C (barres hachurées) ; diminution de 4 °C (barres grises) ; diminution de 11 °C (barres noires). La sensibilité sudomotrice est exprimée ici par la variation du débit sudoral en réponse à l'exposition thermique (issu de Cotter and Taylor, 2005). 68

Fig. 21 Représentation schématique des circuits neurophysiologiques complets à l'origine de la sensation thermique (issu de Filingeri et al., 2016)..... 70

Fig. 22 Représentation schématique du processus complexe associé à la regulation de la fatigue et de la performance en ambiance chaude, integrant les fonctions cardiovasculaires, respiratoires, nerveuses et périphériques (issu de Nybo et al. 2014). 72

Fig. 23 Evolution moyenne de la perception de l'effort (RPE) sur la durée d'un exercice à intensité fixe *(i.e.* entre 55 et 70 %PMA) reproduit en ambiance tempérée (15 °C ; C) ou chaude (35 °C ; H) (Issu de Crewe et al., 2008). 73

Fig. 24 Evolution moyenne respective de la puissance développée (A), de la perfusion sanguine cutanée (B), de la fréquence cardiaque (C) et du volume d'éjection systolique (D) relevés au cours d'un exercice

à libre allure de 40 km reproduit en ambiance tempérée (20 °C ; COOL) et chaude (35 °C ; HOT) (Issu de Périard et al., 2011a). 76

Fig. 25 Représentation graphique du mécanisme dit « effet Q10 » sur le plan métabolique 78

Fig. 26 Evolution moyenne respective de la force produite (en haut ; en newtons) et du pourcentage d'activation volontaire (en bas ; en %) soutenu lors d'une contraction maximale volontaire des extenseurs du genou avec variation locale de la température (issu de Morrison et al., 2004)..... 80

Fig. 27 A gauche, proposition de schéma représentant l'interaction entre perception thermique et stress cardiovasculaire dans la régulation de la perception de l'effort puis de l'intensité de travail pendant l'exercice à libre allure (A). A droite, représentation de l'évolution théorique de RPE et de l'intensité (B) et des contributions théoriques des fonctions cardiovasculaires et perceptives dans la régulation de l'allure, au cours de l'exercice libre et prolongé (C). 84

Fig. 28 Evolution de la puissance moyenne au cours d'un exercice de contre-la-montre de 43,4 km reproduit en ambiance tempérée (TTC) et en ambiance chaude après 1 jour (TTH-1), 6 jours (TTH-2) et 14 jours (TTH-3) d'exposition répétée à la chaleur (issu de Racinais et al., 2015). Une différence significative (*) est observée entre TTH-1 et TTC, inversement TTH-3 et TTC ne présente pas de différence particulière..... 89

Fig. 29 Evolution de l'adaptation des diverses fonctions physiologiques et psychologiques au cours de 14 jours d'exposition répétée à la chaleur (issu de Périard et al., 2015). 94

Fig. 30 A gauche, détail des dimensions au sol de la chambre climatique avec positionnement des panneaux radiants (*i.e.* triangles rouges à l'intérieur de la paroi) ; à droite, cliché pris à l'intérieur de la chambre climatique au cours d'un protocole expérimental. 107

Fig. 31 Description du capteur à annulation de flux SpotOn (3M) exploité lors de nos protocoles expérimentaux (à gauche, schéma représentant la formation du tunnel isotherme à la surface de la peau ; à droite, cliché en situation de mesure). 112

Tab. 1 Description des caractéristiques anthropométriques et physiques moyennes des populations incluses aux études I, II et III……105

CONTEXTE DE LA THESE

Ce projet de recherche a été financé à partir d'une subvention de type CIFRE (n°2013/0713) accordée en novembre 2013 pour une durée de 3 ans par l'Association Nationale de Recherche et de Technologie, dans le cadre d'un partenariat entre le laboratoire LAMHESS et l'entreprise Cityzen Sciences.

Cityzen Sciences est une entreprise crée en 2010, basée à Lyon puis Villeurbanne et spécialisée dans le développement de produits et services centrés autour du monitoring de l'individu. Ce projet de recherche entrait alors dans le cadre du projet collaboratif SmartSensing, lancé par un consortium d'entreprises françaises spécialisées dans le domaine de l'électronique (Eolane), du textile (Payen) ou de la conception et distribution d'articles de sport (CycleLab). SmartSensing avait pour objectif de créer plusieurs solutions novatrices de monitoring de l'individu autour d'un produit : le vêtement instrumenté multi-capteurs. Ces applications étaient, dans un premier temps, destinée aux domaines du bien-être et du sport (*i.e.* collaborations avec plusieurs clubs professionnels français en football, rugby et basket-ball). Ce projet a été définitivement interrompu au cours de l'année 2016. La société Cityzen Sciences a été liquidée judiciairement par le Tribunal de Commerce de Paris en novembre 2017.

Le projet de recherche a réellement débuté en mai 2014, soit lors de mon détachement au sein de l'unité toulonnaise du laboratoire LAMHESS. Je suis resté sur place jusqu'en juillet 2016 avant de reprendre officiellement mon poste d'Ingénieur spécialisé en Physiologie et Monitoring au sein de l'équipe de Cityzen Sciences. Mon contrat avec l'entreprise a pris fin lors de la liquidation de l'entreprise.

Initialement orienté vers une thématique autour du développement et de la validation d'indicateurs thermiques mesurables en surface, le projet de recherche a été redéfini à la fin de l'année 2014 en grande partie en raison des atermoiements, à l'époque, autour du projet collaboratif SmartSensing. En accord avec mon directeur de thèse et avec la bienveillance de mon ancien employeur, nous avons donc opté pour un sujet de recherche plus en adéquation avec les thématiques réelles du laboratoire LAMHESS (Axe 1 // Performance Sportive).

PUBLICATIONS ET COMMUNICATIONS

Cette thèse a fait l'objet de deux articlés publiés dans des revues scientifiques internationales à comité de lecture :

- Roussey, G., Géhin, C., Massot, B., Ali, I. A., Bernard, T., 2018. A Comparative Study of Two Ambulatory Core Temperature Assessment Methods. *IRBM*, 39(2), 143-150.
- Roussey, G., Gruet, M., Vercruyssen, F., Louis, J., Vallier, J. M., Bernard, T. 2018. Interactions between perceived exertion and thermal perception in the heat in endurance athletes. *Journal of Thermal Biology*, 76, 68-76.

Deux projets d'article dont une revue de littérature, actuellement en fin d'écriture, seront prochainement soumis à des revues scientifiques internationales à comité de lecture.

Enfin, les résultats issus des protocoles expérimentaux ont été diffusés lors de congrès scientifiques nationaux et internationaux :

- G. Roussey, M. Gruet, F. Vercruyssen et coll. Effet d'une tache cognitive préalable sur la perception de l'effort au cours d'un exercice en ambiance chaude, *17^{e} congrès de l'ACAPS*, Dijon, 29-31 octobre 2017
- T. Bernard, G. Roussey, P. Fontanari et coll. Effets comparés de deux méthodes d'acclimatation à la chaleur de courte durée sur la performance en ambiance chaude, *17^{e} congrès de l'ACAPS*, Dijon, 29-31 octobre 2017
- G. Roussey. Facteurs psychophysiologiques de la perception de l'effort en ambiance chaude, *Séminaire des chercheurs du LAMHESS*, Toulon, 21 janvier 2017
- G. Roussey, M. Gruet, F. Vercruyssen et coll. Previous active cognitive task does not affect subsequent self-paced exercise in the heat, *21^{e} congrès annuel de l'ECSS*, Vienne (Autriche), 6-9 juillet 2016

INTRODUCTION GENERALE

Open d'Australie de Tennis, Tour de France puis Tour d'Espagne cyclistes, Coupe d'Afrique des Nations de football au Cameroun, U.S. Open de Tennis, Championnats du Monde d'Athlétisme à Doha, Jeux Olympiques d'été à Tokyo… Toutes ces compétitions qui tiendront le monde sportif en haleine au cours des deux prochaines années ont un point commun : les futurs participants seront susceptibles d'évoluer dans un environnement ambiant qualifié de « chaud ». Si la notion de chaleur conserve un caractère abstrait et propre à chaque individu, le suivi d'indices météorologiques parmi lesquels le Wet Bulb Globe Temperature (WBGT ; référence) permet une description rationnelle de la contrainte thermique. Selon ce référentiel, un risque de « surchauffe » est considéré comme important à partir de 23 °C_{WBGT}, et très important au-delà de 28 °C_{WBGT}. Or, les relevés effectués lors des compétitions disputées en 2018 sont assez significatifs : par exemple, jusqu'à 31 °C_{WBGT} lors de l'Open d'Australie de Tennis, 31,5 °C_{WBGT} lors de la 4^{e} étape du Tour d'Espagne cycliste et même 32,5 °C_{WBGT} lors du dernier US Open de Tennis ! Il n'est alors pas un jour sans qu'un athlète ou un entraîneur critique l'attitude des organisateurs consistant à maintenir les compétitions y compris au moment du pic de chaleur quotidien, et en dépit des risques aggravés de « coups de chaleurs », malaises et autres syndromes de déshydratation que ces conditions sont susceptibles de générer. Voici par exemple les mots du tennisman argentin Leonardo Mayer, 43^{e} joueur mondial, à l'issue de son abandon lors du dernier US Open : « Je crois qu'il ne faut plus jouer en cinq sets parce que tant qu'un joueur ne sera pas mort, ils n'arrêteront pas […]. La seule solution, c'est d'écourter un peu (les matches) parce que nous ne maîtrisons pas la chaleur. […]. Je n'ai pas supporté, j'ai essayé mais je ne pouvais pas. Je ne pouvais plus jouer, c'était impossible. Je n'allais pas mourir sur le court… ».

La chaleur est bel et bien l'un des ennemis du sportif, peu importe son niveau, et cette tendance n'est pas prête de s'inverser en particulier pour les plus performants d'entre eux. Plusieurs éléments laissent en effet supposer que la proportion de grands événements sportifs se déroulant dans des environnements chauds, voire extrêmement chauds, sera plus importante à l'avenir. La première raison est d'ordre géopolitique. A l'heure actuelle, au moins la moitié de la population mondiale vit dans la zone dite « Tropicale » du globe (*i.e.* entre les deux tropiques du Cancer et du Capricorne ; Harding, 2011). Or, le poids démographique et/ou économique croissant de certaines régions du monde, couplé à leur intérêt grandissant pour le sport de haut niveau (*e.g.* Chine, Asie du Sud-Est, Moyen-Orient), tend à influencer essentiellement pour des raisons lucratives la localisation, voire la « délocalisation », de certains événements (*e.g.* Trophée des Champions de football (France) en Chine ou en Afrique, tournées estivales des grands clubs européens de football en Asie-Pacifique, Tour cycliste du

Qatar devenu épreuve « World Tour »…). Le second élément concerne les changements climatiques en cours et futurs à l'échelle du monde. Ainsi, le dernier rapport du Groupe d'experts Intergouvernementaux sur l'Evolution du Climat (GIEC) dévoilé le 8 octobre dernier prévoit un réchauffement global du climat de l'ordre de 1,5 °C sur la période 2035-2052 associé à des vagues de canicule estivale plus récurrentes. Le professeur John Balmes de l'Université de Berkeley a même déclaré qu'à la fin du siècle, seules une dizaine de grandes métropoles de l'hémisphère nord seront à priori assez « fraîches » pour pouvoir accueillir les Jeux Olympiques d'été… Au-delà de ces considérations, tout laisse à penser que la chaleur demeurera, pour de nombreuses disciplines, l'un des possibles freins à la performance dans les grandes compétitions sportives futures.

Ce qui n'est en aucun cas une bonne nouvelle pour les athlètes… La chaleur est considérée, de longue date, comme un phénomène environnemental difficilement tolérable par l'homme et à plus forte raison lorsqu'il est en activité. La légende du coureur de Marathon, mort d'un probable coup de chaleur après avoir parcouru 42 kilomètres jusqu'à Athènes pour annoncer la victoire des Grecs sur les Perses en 490 avant J-C., est sans doute l'un des plus anciens exemples de la relation délétère entre l'effort et le thermomètre (Cabanac and Bonniot-Cabanac, 1997)… De nos jours, la recherche scientifique a permis de valider la relation négative entre élévation de la température ambiante et dégradation de la performance en endurance. Par exemple, une analyse particulièrement intéressante issue des résultats de sept des derniers championnats du monde d'athlétisme (*i.e.* de Séville 1999 à Pékin 2015) met en évidence cette relation (Guy et al., 2014). Ainsi, les meilleures performances observées lors des épreuves dont la distance est supérieure à 5000 mètres l'ont été dans des ambiances dites tempérées (*i.e.* < 25 °C). L'analyse révèle également que le marathon, sans doute l'une des épreuves les plus populaires de par l'engouement suscité lors de courses ouvertes à toutes et à tous, est le format d'épreuve le plus impacté par la chaleur chez les hommes comme chez les femmes. Au-delà de l'athlétisme, la problématique de la chaleur concerne toutes les disciplines proposant des épreuves à durée prolongée (*e.g.* cyclisme, triathlon…) mais également les sports « mixtes » incluant la répétition d'efforts intenses voire une dimension cognitive inhérente aux prises d'information et de décision fréquentes (*e.g.* sports collectifs *outdoor*, tennis). L'ensemble des fonctions physiologiques et perceptives du corps humain sont mises à contribution, directement ou indirectement, par l'élévation progressive de la température corporelle elle-même favorisée pendant l'exercice par une contrainte thermique significative. Le maintien d'un relatif équilibre homéostatique requiert dès lors, dans ces conditions, des ajustements de l'intensité de

l'exercice. Inversement, l'organisme s'expose à des conséquences plus ou moins sévères, allant d'un simple « coup de chaleur » à la mort.

L'un des marqueurs de baisse de la performance commun à ces différentes épreuves sportives est la dégradation de la perception subjective de l'effort (Crewe et al., 2008). Ce phénomène, inhérent à une plus grande difficulté ressentie à produire une action musculaire, va de pair avec des ajustements significatifs de l'allure pendant l'exercice (Abbiss et al., 2015). Si l'origine neurophysiologique de la perception de l'effort est encore aujourd'hui l'objet de débats (Pageaux et al., 2016), la plupart des modèles théorisant le concept de régulation volontaire de l'allure la considèrent cependant comme un rouage-clé de ce mécanisme complexe. Contrecarrer les effets délétères de la chaleur sur la performance lors d'épreuves prolongées passe ainsi par une action ou un ensemble d'actions destinées à réduire la difficulté subjective de l'effort produit. Si ces actions peuvent prendre la forme de stratégies à effets immédiats et aigus (*e.g.* techniques de refroidissement ou cooling ; Bongers et al., 2017), le fait d'exposer de manière répétée un individu à la chaleur, que ce soit passivement ou au cours d'un exercice physique, semble présenter des résultats plus marqués et durables dans le temps (Racinais et al., 2015). Pourtant, si l'impact des stratégies d'acclimatation sur la performance et le contrôle homéostatique pendant l'exercice font consensus dans la littérature (Chalmers et al., 2014 ; Périard et al., 2015), leur usage au quotidien dans la préparation des athlètes ne fait pas l'unanimité. Une étude récente a ainsi montré que seuls 15 % des participants aux Championnats du Monde d'Athlétisme de 2015 à Pékin (*i.e.* conditions moyennes en journée : 33 °C, 58 %HR) ont suivi un tel protocole préalablement à leur entrée en compétition, contre 52 % qui ont, par exemple, privilégié le suivi d'une stratégie de refroidissement juste avant leur épreuve (Périard et al., 2017). La durée moyenne de la période d'acclimatation (*i.e.* 20 jours) observée chez ces sujets peut expliquer la faible proportion d'athlètes concernés. En effet, nous verrons que, bien que de longues phases (*i.e.* au moins 14 jours) soient à privilégier afin de développer des adaptations physiologiques optimales, les stratégies d'acclimatation courtes de moins de 7 jours contribuent à une amélioration sensible du niveau de performance (Chalmers et al., 2014) tout en étant plus adaptées aux contraintes inhérentes à la pratique du sport de compétition à haut niveau.

Contribuer à un usage plus fréquent de stratégies d'acclimatation passe donc par une meilleure appréhension des besoins et des contraintes propres aux athlètes de haut niveau et à leur encadrement technique (Casadio et al., 2016). Au travers des études expérimentales qui ont été mises en place, l'objectif de ce travail de thèse est de proposer des solutions, à condition qu'elles soient applicables dans le cadre de protocoles d'acclimatation de courte durée, ou

identifier des risques dans le but de préserver la perception de l'effort d'une distorsion à la chaleur pendant l'exercice. Cet intérêt pour les réponses perceptives a conduit à exploiter au cours de nos travaux un mode d'exercice imposant l'autorégulation des intensités de travail à partir de la difficulté subjective de l'effort (*i.e.* exercice à RPE fixe), mais aussi à s'attarder sur les réponses dites de perception thermique pendant l'exercice.

Structuration de la thèse

Le manuscrit de thèse se compose de quatre parties distinctes.

Au cours de la première partie, nous développerons le cadre théorique de ce projet de recherche afin de faire état des connaissances théoriques et pratiques actuelles. Nous approfondirons d'abord les connaissances liées à la perception de l'effort et à son rôle dans la régulation volontaire de l'allure, mis en valeur par les différents modèles théoriques descriptifs de la performance lors de l'exercice prolongé. Puis nous évoquerons l'exercice dit à RPE fixe, par la définition d'un cadre méthodologique optimal et de nos hypothèses concernant les phénomènes à l'origine de la diminution progressive et linéaire de l'intensité dans le temps. Nous développerons ensuite les diverses fonctions physiologiques et perceptives susceptibles d'être impactées par l'élévation de la température ambiante avant, pour terminer, de présenter le concept d'acclimatation à la chaleur à travers ses effets sur le plan psychophysiologique et les prérequis associés à sa mise en œuvre sur le terrain.

Suite à la présentation des objectifs de ce projet de recherche, nous évoquerons au cours de la seconde partie, et de manière détaillée, la méthodologie appliquée lors des protocoles expérimentaux. Les deux méthodes non-invasives de mesure de la température centrale, comparées puis utilisées lors des protocoles expérimentaux, seront largement présentées.

Dans une troisième partie, nous présenterons les résultats et conclusions issues des trois études expérimentales mises en place dans la cadre de ce projet.

Enfin, la quatrième partie sera dédiée à une discussion générale des résultats obtenus et à la proposition de perspectives de recherche susceptibles d'être poursuivies au-delà de ce seul projet de thèse.

CADRE THEORIQUE

1. LA PERCEPTION DE L'EFFORT

1.1. L'effort

Que signifie le mot « effort » ? N'a-t-on jamais promis à un professeur, à un supérieur hiérarchique ou à nos parents de « faire un effort » suite à un défaut de résultats scolaires ou professionnels ? En sport, quel entraîneur ou athlète n'aurait jamais utilisé ce terme lors de ses échanges avec les athlètes ? Largement employé dans le « jargon sportif », le terme « effort » est associé à la difficulté, voire la souffrance, subie lors d'une tâche physique. La notion d'effort renvoie dans notre culture et notre imaginaire collectif à des valeurs positives de courage, de volonté ou de résilience. Mahatma Gandhi a d'ailleurs dit que « c'est dans l'effort que l'on trouve la satisfaction et non la réussite » (Lettres à l'Ashram, 1948).

D'un point de vue étymologique, l'effort renvoie au terme latin « *conatus* », également racine du mot « tentative » et défini comme « l'action par laquelle une personne cherche à atteindre un but ». La notion de *conatus* a été longuement décrite dans les écrits du philosophe néerlandais Baruch Spinoza comme « l'exercice de la force d'exister, de persévérer d'un être » (1677). En d'autres termes, faire un effort renverrait à un acte de résistance face à une sollicitation physique et/ou mentale. Les racines du terme « effort » sont également visibles dans le français ancien, ainsi l'expression « *ad esforz* » signifie « à toute force, à toute vitesse » (la Chanson de Roland, Turold, XI^{e} siècle) et ramène cette fois à la notion de travail. Désormais mot courant de la langue française, l'effort est défini comme l'action de « mobilisation de forces physiques, intellectuelles ou morales en vue de résister ou pour vaincre une résistance » (Dictionnaire Larousse). Du point de vue biologique, il est décrit comme « l'accroissement énergétique d'un organisme qui cherche à surmonter une résistance » (Garcin, 2014). Si l'on considère la définition proposée par le Dictionnaire Littré, l'effort possède une dimension physique (*i.e.* contraction musculaire qui a pour objet, soit de résister à une puissance, soit de vaincre une résistance) mais aussi mentale (*i.e.* action énergique des forces morales).

Les dimensions physiques et mentales d'une activité ou d'un travail quelconque sont fréquemment opposées dans notre culture, et il en est de même dans le champ scientifique. En physiologie, l'effort physique est associé à la « contraction des muscles expirateurs qui se produit après une inspiration profonde » survenant lors d'actions impliquant de puissantes contractions musculaires telles que la défécation, la parturition, la fin de la miction ou le vomissement (Garcin, 2014). A l'inverse, la psychologie cognitive caractérise l'effort comme proportionnel à « la quantité de ressources attentionnelles assignées » (Kanheman, 1973). L'absence de consensus entre ces deux champs scientifiques sollicités en sciences du sport

illustre le débat permanent qui entoure la définition de la notion d'effort. Chris Abbiss et ses collaborateurs (2015) ont ainsi exprimé la confusion née de l'usage alterné et injustifié, en langue anglaise, des termes *effort* (*i.e. amount of mental or physical energy being given for the task*) et *exertion* (*i.e. degree of strain experienced in physical work*) en dépit de leur caractère interchangeable. Ainsi, Oxford Dictionary propose l'intégration du mot *exertion* à la définition du mot *effort* (*i.e. strenuous physical or mental exertion*), et inversement (*i.e. vigorous action or effort* comme définition du terme *exertion*).

Pratiquer une activité physique permet généralement de vérifier que les aptitudes mentales sont, de la même manière que les aptitudes physiques, mises à contribution. Sinon, comment expliquer l'abandon d'athlètes de très haut niveau au cours d'un marathon ou d'une étape de montagne sur un grand tour cycliste, et ce malgré leurs qualités physiologiques et leur expérience bien au-dessus de la moyenne ? Ainsi, le maintien de l'effort « physique » lors d'une épreuve prolongée à libre allure est avant tout conditionné par ce qu'il exige du point de vue mental et psychologique. Nous n'évoquerons donc l'effort et sa perception que dans une dimension « globale ». D'autre part, l'étude sémantique valide l'idée selon laquelle un effort est avant tout un acte volontaire et conscient. Dès lors, la perception de l'effort exprime la difficulté associée à la production de ce dernier et non la quantité de ressources physiologiques ou psychologiques nécessaires à sa production (Borg, 1970).

1.2. La perception de l'effort

Toute production d'un effort exerce une contrainte physique et psychologique explicitable par l'individu. La perception de l'effort est considérée comme une mesure « psychophysiologique » dont les origines de l'étude remontent au 19^{e} siècle (Delignières, 1993). Le philosophe français Maine de Biran évoqua alors « la sensation d'effort » comme la preuve de la conscience de soi-même, tandis que le physiologiste allemand Herman von Helmholtz s'appuya sur les témoignages de personnes paralysées pour justifier la distinction entre « sensation d'effort » et contraction musculaire (Von Helmholtz, 1866 ; cité par Lafargue and Franck, 2009). Ce champ d'investigation a pris essor à la fin des années 1950 par les travaux de l'équipe de S.S. Stevens de l'Université d'Harvard (1957) et ceux, conjoints, du psychologue Gunnar Borg et du physiologiste Hans Dahlström de l'Université de Stockholm. La thèse de psychologie soutenue par Gunnar Borg en 1962 et intitulée « Performance physique et effort perçu » constitue d'ailleurs l'un des points de départ de l'application moderne des mesures psychophysiologiques.

En effet, Borg a défini de manière originale la perception de l'effort comme « l'expérience consciente de la difficulté, de la pénibilité associée à une tâche physique quelconque » (*i.e. how hard, heavy and strenuous a physical task is* ; Borg, 1990). Suite à ces travaux, une première échelle psychométrique de mesure de la perception de l'effort, intitulée *Rating of Perceived Exertion Scale* ou *Borg RPE Scale* (RPE), a été proposée dans le but d'établir une référence interindividuelle d'évaluation de ce paramètre.

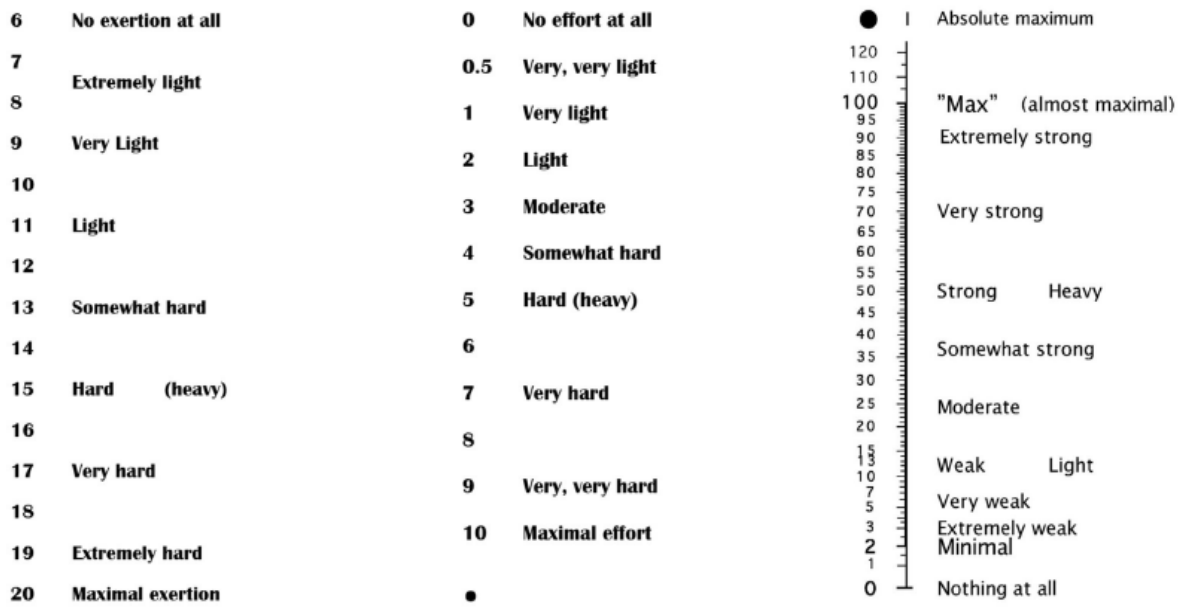


Fig. 1 Exemples d'échelles psychophysiologiques pour l'estimation de la perception de l'effort (issu de Pageaux, 2016). De gauche à droite : échelle RPE 6-20 de Borg ; échelle « category ratio » ou CR-10 ; échelle CR-100.

D'abord construite sur sept graduations associées chacune à un qualificatif (*i.e.* de 1- très facile à 7- très difficile ; Borg, 1962), la version définitive de l'échelle (Borg RPE 6-20 Scale) repose désormais sur 15 graduations calquées sur la plage de variation linéaire de la fréquence cardiaque (FC ; 60-200 bpm) en référence à la relation RPE – FC (*i.e.* RPE = 10 x FC ; Borg et al., 1987). Les outils d'estimation de la perception de l'effort sont aujourd'hui utilisés dans de multiples contextes inhérents à la pratique physique et sportive pour l'estimation subjective de l'intensité (Eston, 2012).

Au-delà de l'échelle RPE 6-20 de Borg, plusieurs déclinaisons méthodologiques de l'estimation de la perception de l'effort ont été proposées dans la littérature : échelle CR-10 de Foster (Category Ratio Scale ; Herman et al., 2006), échelle OMNI (Omnibus Scale ; Robertson et al., 2004). Le sujet est également apte à différencier des perceptions somatiques particulières à partir d'une même échelle RPE de référence. En effet, par opposition à la perception de l'effort

dite « globale » (RPE-G) peuvent être contrôlés les points de repère « centraux » (RPE-C) ou relatifs à l'activité cardiorespiratoire, et « périphériques » (RPE-L) ou relatifs à la sollicitation musculo-articulaire (Pandolf, 1982). Leur application est pertinente dans le cadre, par exemple, de tâches physiques sollicitant les membres supérieurs (*e.g.* fauteuil roulant, Paulson et al., 2015) ou produites dans des conditions expérimentales particulières (*e.g.* hypoxie, Christian et al., 2014). Nous verrons plus loin que perception « globale » et « locale » sont deux phénomènes neurophysiologiques plus ou moins générés par des origines sensorielles distinctes.

1.3. Bases neurophysiologiques de la perception de l'effort

1.3.1. Problématique actuelle

Si les travaux de Gunnar Borg ont posé les bases de la perception de l'effort, la définition de ce phénomène fait l'objet d'une certaine confusion amplifiée par les conclusions issues de recherches postérieures. En particulier, le modèle explicatif global proposé en 1996 par Bruce J. Noble et Robert J. Robertson considère que l'effort est un processus multidimensionnel associé à d'autres phénomènes subjectifs inhérents à l'exercice tels que la douleur, la fatigue ou l'inconfort (*i.e. the subjective intensity of effort, strain, discomfort and fatigue that is experienced during physical exercise*). Ce postulat s'appuie notamment sur une interprétation de l'hypothèse avancée par Gunnar Borg, qui décrit « l'ensemble des sensations issues des organes cardiorespiratoires, des muscles, de la peau et des articulations » comme les origines neurophysiologiques de la perception de l'effort (Borg, 1970). Le fait que les projections centrales des messages afférents sensoriels contribuent fortement à la représentation consciente de l'état de l'organisme, au travers de la douleur ou de la perception de la ventilation (Craig, 2002), entretient une possible confusion avec les déterminants réels de la perception de l'effort. De même, les différences méthodologiques de traitement de la perception de l'effort (Amann et al., 2009 ; Amann et al., 2010) contribuent, en dépit d'une littérature scientifique riche et pertinente, à la poursuite d'un débat ancien sur le rôle exact des afférences sensorielles dans la construction de l'image subjective de l'effort entre partisans d'une approche « physiologique » et ceux d'une approche « kinesthésique ».

1.3.2. L'approche « physiologique »

L'approche « physiologique » ou « périphérique » suppose que les afférences sensorielles régulent indirectement et de manière subconsciente la perception de l'effort.

Initialement, les fortes corrélations vérifiées entre RPE et FC (Borg et al., 1987) ont convaincu du rôle possible joué par les sensations issues des récepteurs musculaires, viscéraux ou cutanés dans la construction de l'image subjective de l'effort (Noble and Robertson, 1996). Sa perception constituerait alors une manifestation consciente de l'intégration de ces signaux sensoriels (Hampson et al., 2001). Plus récemment, la concomitance des réponses perceptives (*i.e.* RPE centrale et périphérique), cardiorespiratoires et/ou neuromusculaires à l'inhibition des afférences métabosensibles III et IV ont conduit les auteurs à supposer l'existence d'un rôle médiateur de ces terminaisons nerveuses (voir partie 1.4.2. ; Amann et al., 2010 ; Amann and Secher, 2010).

Ce postulat s'appuie également sur des arguments d'ordre neurophysiologique. En effet, les projections centrales des messages afférents sensoriels contribuent fortement à la représentation consciente de l'état de l'organisme, par exemple la perception de la douleur, de l'activité ventilatoire ou de l'état thermique (Craig, 2002). Cette capacité d'intéroception de l'individu met essentiellement en jeu les aires antérieures et dorsales du cortex insulaire (Craig, 2009). Le cortex cingulaire antérieur participerait également, en collaboration avec le cortex insulaire, à la construction des réponses émotionnelles issues de la représentation physiologique de l'organisme (voir partie 1.4.5.). Or, ces mêmes aires cérébrales seraient potentiellement impliquées dans la prise de décision (Walton et al., 2006) ou encore sensibles à des changements de la perception de l'effort au cours d'un exercice (Williamson et al., 2001).

Toutefois, il est aujourd'hui accepté que l'homme soit apte à distinguer subjectivement l'effort des autres phénomènes perceptifs issus d'adaptations cardiorespiratoires et neuromusculaires que sont la tension musculaire (Jones and Hunter, 1983), la fatigue (Pageaux et al., 2015), la douleur (O'Connor and Cook, 2001) ou l'inconfort (Christian et al., 2014). D'autre part, plusieurs éléments scientifiques sont venus contredire l'existence de mécanismes neurophysiologiques similaires entre les processus d'intéroception et la perception de l'effort. Par exemple, l'administration préalable de bêtabloquants lors d'un exercice de pédalage n'a induit aucune variation de RPE en dépit d'une diminution significative de la FC moyenne (Myers et al., 1987). De même, les résultats observés lors du blocage pharmacologique préalable des afférences musculaires métabosensibles III et IV viennent contredire l'hypothèse de leur action sensorielle directe sur la perception de l'effort (Pageaux and Gaveau, 2016). En effet, la stimulation alors atténuée des afférences nerveuses n'a pas été suivie de changements de RPE lors d'un exercice de pédalage mené par des sujets souffrant d'hypertension, ce en dépit d'une réduction de la pression sanguine artérielle (Barbosa et al., 2016).

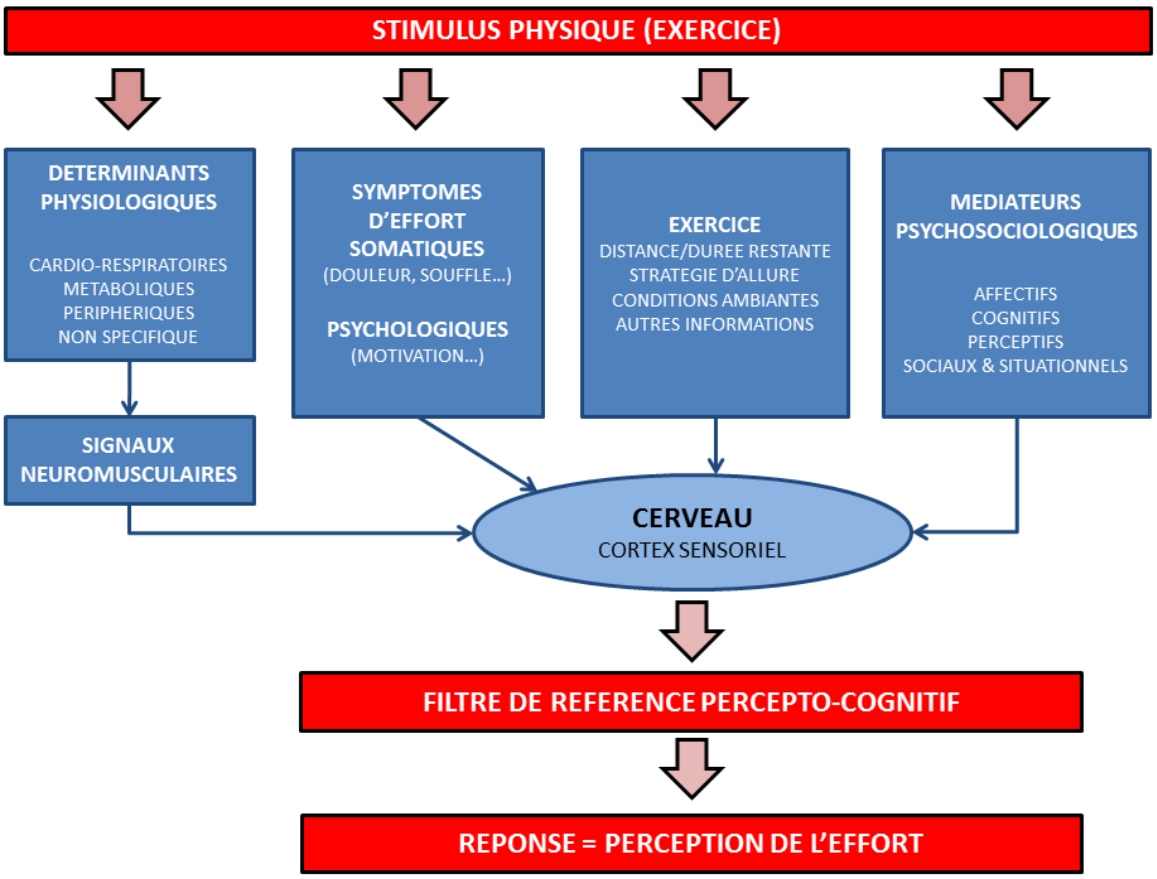


Fig. 2 Représentation schématisée du « Modèle Explicatif Global » proposé par Noble et Robertson (1996 ; inspiré de Coquart, 2016).

1.3.3. L'approche « kinesthésique »

Sur la base des arguments scientifiques évoqués en fin de paragraphe précédent, il est suggéré que les signaux afférents issus des muscles et des organes vitaux ne constituent pas l'origine neurophysiologique de la perception de l'effort (Marcora, 2009a). Si leur rôle dans la régulation subconsciente des réponses cardiorespiratoires et neuromusculaires n'est pas remis en cause, leur activation n'aurait toutefois aucune influence directe sur les signaux sensoriels relatifs à l'effort. En d'autres termes, la stimulation des afférences nerveuses musculaires ne tend pas à créer elle-même une distorsion de la perception de l'effort, mais un ressenti de phénomènes subjectifs issu des adaptations physiologiques (*i.e.* douleur, inconfort) et susceptible d'affecter, indirectement, la perception de l'effort (Smirmaul, 2012).

Une approche alternative dite « kinesthésique » ou « centrale » suggère que la perception de l'effort, alors définie comme la sensation consciente du caractère de difficulté inhérent à la tâche produite (*i.e. the conscious sensation of how hard, heavy, strenuous is an effort* ; Marcora, 2010), soit générée par un processus nerveux efférent issu de la commande

motrice centrale (*i.e.* décharge corollaire ; McCloskey, 1981). La représentation subjective de l'effort aurait alors pour origine un message nerveux issu de l'aire prémotrice et de l'aire motrice supplémentaire, et émis en direction du cortex moteur M1 (Carson et al., 2002). L'aire motrice supplémentaire jouerait un rôle-clé dans la perception et l'anticipation de l'action motrice (Romero et al., 2000). La copie du message nerveux à l'origine de l'action motrice serait transmise par voie efférente vers les aires somatosensorielles impliquées dans la construction des réponses perceptives (voir partie 1.3.1.). Ainsi, le cerveau serait capable d'autoréguler la production de force par rétroaction de la commande motrice centrale (Lafargue and Franck, 2009).

Plusieurs arguments semblent plaider en faveur de l'approche « kinésthésique ». En premier lieu, le rôle joué par les décharges corollaires dans la construction de l'image subjective de l'effort s'exprime par la forte corrélation entre RPE et amplitude du potentiel cortical émis par les aires motrices et pré-motrices du cerveau (*i.e.* MRCP, Motor – Related Cortical Potential ; Shibasaki and Hallett, 2006) lors de contractions sous-maximales du biceps brachial (De Morree et al., 2012). En second lieu, une distorsion de la perception de l'effort a pu être observée au cours d'un exercice de type « handgrip » lors de l'application d'une stimulation magnétique transcraniale continue inhibant l'activité nerveuse de l'aire motrice supplémentaire (Zenon et al., 2015). Le rôle-clé des décharges corollaires dans la construction de l'image subjective de l'effort fait désormais consensus (Pageaux, 2016).

1.4. Régulation de l'allure lors d'un exercice prolongé

1.4.1. Généralités

La plupart des activités physiques et sportives modernes, en particulier les spécialités d'endurance (*e.g.* multiples épreuves de course à pied, cyclisme, natation, ski de fond, disciplines combinées telles que le triathlon…), imposent de parcourir une distance donnée en un temps le plus court possible. Etre performant requiert alors une exploitation optimale *(i)* des ressources physiologiques et psychologiques à disposition, et *(ii)* une certaine expérience face aux différentes contraintes inhérentes à l'activité (pour revue : Smits et al., 2014). D'autre part, alors que l'opposition (*e.g.* coureurs cyclistes dans un peloton) implique de gérer physiquement les variations de la puissance ou de l'allure initiées par le scénario de course, la performance lors d'un exercice « en solitaire » (*e.g.* contre-la-montre cycliste) est avant tout conditionnée par l'état physiologique de l'athlète. Ainsi la régulation de la dépense énergétique est destinée à préserver l'athlète d'un déséquilibre homéostatique sévère et/ou d'une perception extrême de

fatigue jusqu'à la fin de l'épreuve (Marino, 2004). Les conditions météorologiques (*i.e.* chaleur) et/ou l'altitude modifient également les réponses physiques et physiologiques au cours des compétitions, et doivent être intégrées au schéma de course (Junge et al., 2016).

Dans l'histoire de la physiologie de l'exercice, plusieurs réflexions théoriques ont été menées afin d'identifier les facteurs de performance et mieux comprendre leurs diverses interactions lors de la libre régulation de l'allure. Pendant longtemps, le modèle « cardio-vasculaire de la fatigue » dit de Hill (du nom du physiologiste anglais Archibald Vivian Hill, nommé Prix Nobel de Médecine en 1922), a défendu l'idée d'une performance physique strictement tributaire de l'état du système cardiorespiratoire et des muscles. En d'autres termes, la fatigue a été définie comme la conséquence d'une inadéquation entre les besoins et les apports en oxygène. Le débit cardiaque maximal et le débit ventilatoire étaient alors considérés comme les facteurs limitants majeurs de la performance en endurance.

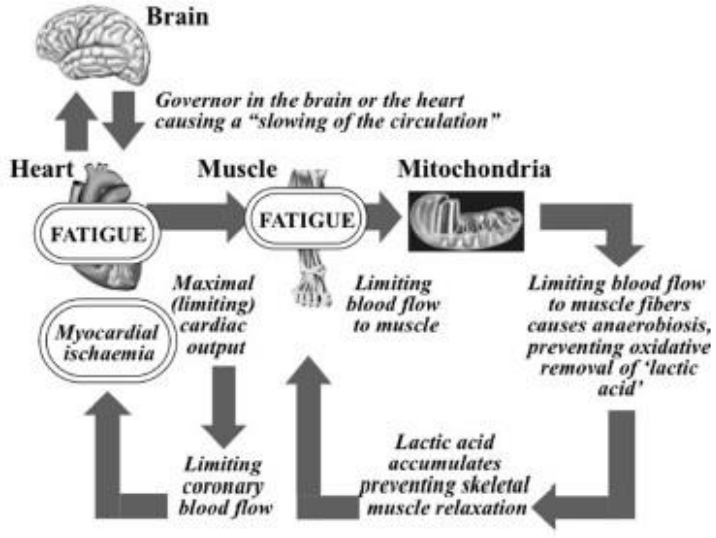


Fig. 3 Représentation schématique du modèle cardiovasculaire de la fatigue proposé par A.V. Hill (1922).

Bien que l'hypothèse du rôle majeur joué par le cerveau dans la gestion de l'effort ait été soutenue dans un premier temps (Mosso, 1894), l'omniprésence du modèle de Hill a quelque peu éclipsé le champ d'étude sur les réponses psychophysiologiques à l'exercice pendant plusieurs décennies. Il aura fallu attendre un passé récent pour observer la réhabilitation du cerveau comme organe majeur de la construction de la performance physique et sportive. De nouveaux concepts théorisant la régulation volontaire de l'allure sont ainsi apparus. Ces modèles seront ainsi définis lors de ce chapitre : *(i)* le seuil critique de fatigue périphérique (Amann and Secher, 2010) ; *(ii)* le seuil de tolérance sensorielle (Hureau et al., 2018) ; *(iii)* le gouverneur central (Noakes, 2012) ; *(iv)* le « flush model » (Millet, 2011) ; *(v)* le modèle psychobiologique (Pageaux, 2014). L'ensemble de ces modèles considèrent la régulation optimale de la perception de l'effort comme déterminant de la performance lors d'un exercice prolongé.

1.4.2. L'hypothèse du seuil critique de fatigue périphérique

De manière générale, l'état de la commande neuromusculaire influence de manière significative la régulation de l'allure lors d'une épreuve prolongée. Pour rappel, la fatigue neuromusculaire est définie comme l'incapacité à maintenir dans le temps la force ou la puissance produite d'exercices musculaires tels qu'une contraction maximale volontaire (Place et al., 2004). L'étude des réponses neuromusculaires se décompose en une analyse de paramètres dits « centraux » et « périphériques » (pour revue : Boyas and Guével, 2011). La fatigue dite centrale est relative aux phénomènes d'origine supraspinale ou spinale à l'origine d'une dégradation progressive de l'activation volontaire par la commande motrice centrale. La fatigue dite périphérique est représentative d'une baisse du potentiel contractile des fibres musculaires et/ou de la vitesse de transmission des potentiels d'action, consécutive par exemple à l'accumulation de métabolites sanguins ou l'inhibition des mécanismes de libération et recaptage des ions calcium. Une dégradation excessive des propriétés contractiles peut être à l'origine de l'apparition de douleurs, voire à des difficultés ambulatoires post-exercice.

La régulation de la fatigue neuromusculaire pendant l'exercice dépend grandement de l'activité des afférences métabosensibles III et IV des muscles sollicités. Le rôle de ces terminaisons nerveuses, également impliquées dans la stimulation réflexe de l'activité cardiorespiratoire (Kaufman and Hayes, 2002), a été démontré au cours de protocoles impliquant leur blocage préalable par voie pharmacologique (*i.e.* injection de fentanyl au niveau lombaire ; Amann et al., 2009). Par exemple, au cours d'un exercice de type contre-la-montre de 5 km, les sujets ont produit une puissance moyenne plus élevée suite à la réduction artificielle de la sensibilité sensorielle. La performance et l'activité musculaire plus importante a été néanmoins associée à une dégradation plus marquée des paramètres métaboliques (*i.e.* lactatémie) et neuromusculaires périphériques (« twitch » potentiée ; Amann et al., 2009). Le dépassement d'un hypothétique seuil de fatigue périphérique aurait, dans ces conditions, été favorisé par le blocage pharmacologique des afférences sensorielles. En conclusion, la réponse sensitive des afférences III et IV à une accumulation excessive de métabolites intramusculaires restreindrait, par inhibition de la commande motrice centrale, la production de force alors régulée de manière subconsciente (Amann and Secher, 2010). La perception de l'effort ne serait, par conséquent, que l'expression consciente de cet état de fatigue neuromusculaire.

Toutefois, en l'absence de réelles variations des paramètres associés à la fatigue centrale (*e.g.* pourcentage d'activation volontaire lors d'une contraction maximale volontaire), l'hypothèse d'une origine supraspinale de ce phénomène demeure incertaine (Amann et al., 2009). De plus, elle néglige d'autres facteurs susceptibles d'affecter la commande motrice centrale, par exemple l'élévation de la température centrale (T_{CO} ; Nybo and Nielsen, 2001a) ou l'activité des muscles ventilatoires (Hill, 2000). Enfin, l'occurrence de certains événements spécifiques à la compétition (*i.e.* « end-spurt », ou élévation rapide de l'intensité en fin d'épreuve) contredit les arguments qui défendent l'hypothèse d'une régulation rétroactive et subconsciente de la production de force par voie sensorielle (Noakes, 2012).

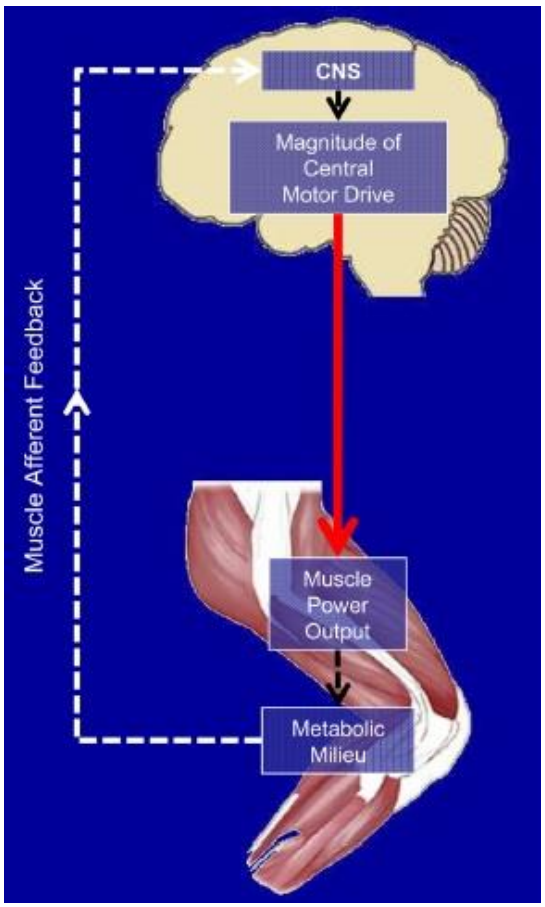


Fig. 4 Représentation schématique de l'hypothèse de l'inhibition supraspinale réflexe pour expliquer la performance en endurance (issu de Amann et Dempsey, 2008).

1.4.3. L'hypothèse du seuil de tolérance sensorielle

Une proposition théorique alternative à l'hypothèse du seuil critique de fatigue périphérique suggère que le système nerveux central régule l'activité musculaire, par l'intermédiaire d'une boucle rétroactive intégrant l'ensemble des signaux sensoriels afférents et efférents (Hureau et al., 2018). Afin de demeurer tolérable d'un point de vue physiologique, la production de force serait alors ajustée via le cumul des informations sensorielles issues des muscles stabilisateurs ou secondaires dans l'exécution de la tâche motrice (Amann et al., 2013), des muscles respiratoires (Laviolette et Laveneziana, 2014), des afférences nociceptives musculaires (Deschamps et al., 2014) et des décharges corollaires (Gallagher et al., 2001). La perception de l'effort serait dès lors un moyen de quantifier l'écart entre la difficulté subjective instantanément perçue par le sujet et le seuil limite de tolérance au-delà duquel il sera susceptible de réduire l'intensité de l'exercice.

1.4.4. L'hypothèse du gouverneur central

Le modèle théorique du « gouverneur central » proposé par l'équipe du physiologiste sud-africain Timothy D. Noakes (Saint Clair Gibson et al., 2003 ; Noakes, 2012) repose sur une régulation subconsciente de l'intensité de l'exercice par le cerveau, dont le but est de prévenir tout déséquilibre homéostatique majeur. Le phénomène de fatigue serait donc une « émotion » qui incite l'individu à ajuster son effort (Saint Clair Gibson et al., 2003). Bien que des bases neurophysiologiques soient communes (*i.e.* intervention des afférences sensorielles, *e.g.* terminaisons métabosensibles III et IV ; Amann and Secher, 2010), le modèle du gouverneur central se distingue clairement des deux hypothèses précédemment exposées. En effet, il suggère l'existence d'un mécanisme de communication permanente et complexe entre muscles et cerveau pour expliquer l'origine de la sensation de fatigue (« boîte noire »).

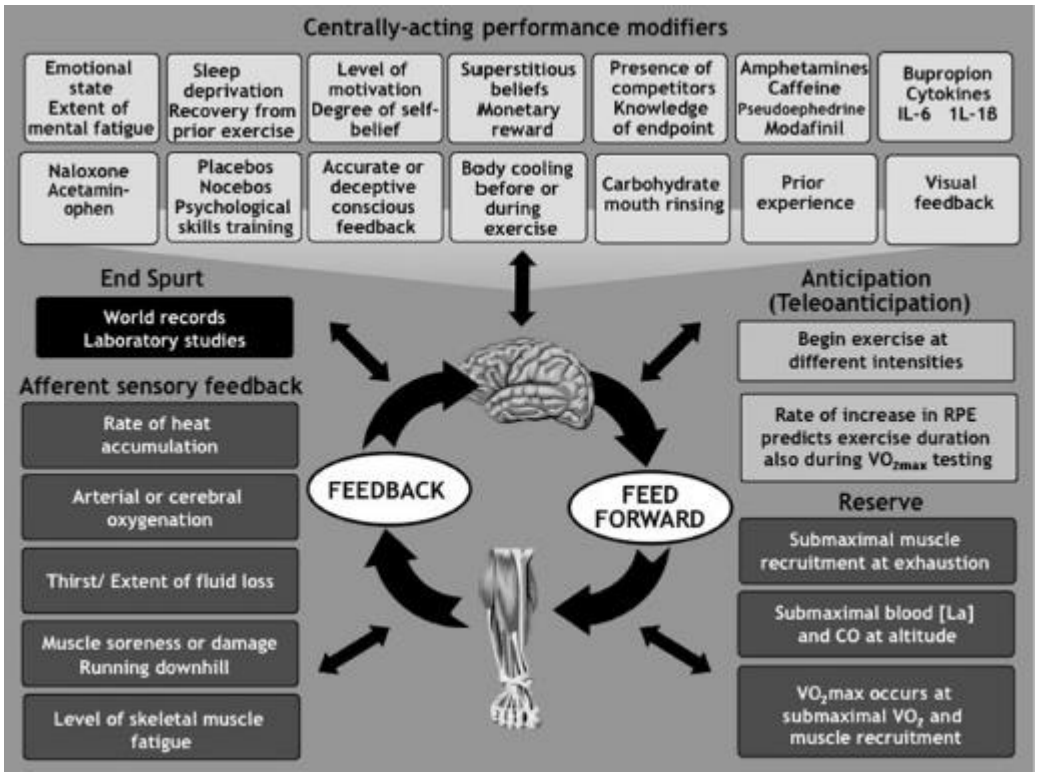


Fig. 5 Représentation schématique du modèle théorique dit du « gouverneur central » (issu de Noakes, 2012).

Les différents « feedbacks » sensoriels afférents seraient intégrés par la commande motrice centrale dans le but d'ajuster, par voie subconsciente, les signaux nerveux efférents (*i.e. feedforwards*) transmis aux muscles pour le recrutement d'unités motrices. Ce mécanisme permet alors le maintien d'une capacité de « réserve » neuromusculaire minimale (Noakes, 2012). En effet, le pourcentage d'unités motrices actives au cours d'un exercice demeure

largement sous-maximal lors d'un exercice prolongé (*i.e.* entre 35 et 50 % du nombre total d'unités activées lors d'une contraction maximale volontaire ; Tucker et al., 2004). Seule une situation exceptionnelle (*e.g.* danger vital) ou propre à un surcroît de motivation (*e.g.* dernier kilomètre lors d'une épreuve de longue distance) laisserait à l'individu la possibilité de puiser des ressources physiques au-delà de sa capacité de réserve neuromusculaire.

En parallèle, ces signaux efférents seraient transmis, interprétés et traduits par les aires cérébrales impliquées dans la perception de l'effort en phénomène conscient de « sensation de fatigue ». Plusieurs facteurs psychobiologiques rendraient également l'exercice plus ou moins tolérable par une action sur la sensation de fatigue (Noakes, 2012). Ces paramètres sont d'origine neurochimique (*e.g.* consommation de stimulants ; Swart et al. 2009) et/ou psychologique (*e.g.* connaissance de l'état de l'épreuve, par exemple la distance ou la durée restante ; Wittekind et al., 2011). Leur intervention permettrait d'expliquer les rares dérèglements physiologiques majeurs de l'organisme susceptibles de survenir lors de compétitions sportives de haut niveau *(e.g.* hypoglycémie, « coup de chaleur »).

Le rôle principal de la « boîte noire » du gouverneur central serait de définir une vitesse optimale d'élévation progressive de la perception de l'effort à partir de l'état des fonctions homéostatiques (Saint Clair Gibson et al., 2006).

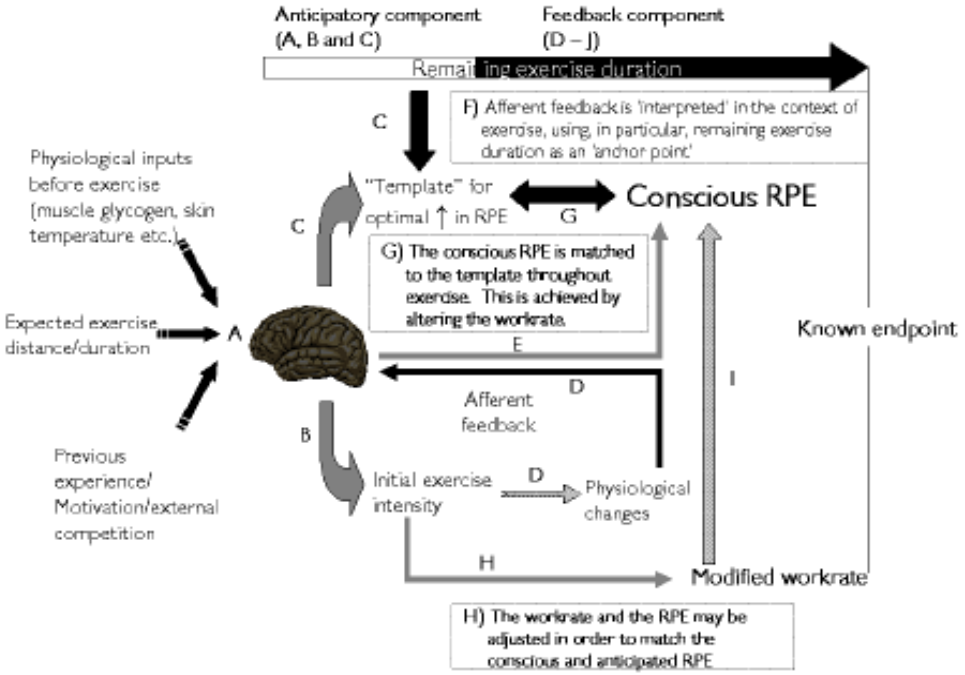


Fig. 6 Représentation schématique du mécanisme anticipatoire intervenant au cours de l'exercice à libre allure (issu de Tucker, 2009).

Ainsi, lorsque la perception instantanée de l'effort (*i.e.* « conscious RPE ») est supérieure à la valeur suggérée par le référentiel (*i.e.* « template RPE »), alors l'intensité de l'exercice est réduite volontairement par le sujet (Tucker, 2009). Cette proposition théorique s'inspire de l'hypothèse de « téléoanticipation » selon laquelle la régulation efférente de l'activité musculaire par le cerveau anticipe la durée potentielle de l'exercice à partir des informations somatosensorielles afférentes (Ulmer, 1996). Une telle aptitude chez l'individu serait prouvée, selon ces auteurs, par la proportionnalité entre vitesse d'élévation de la perception de l'effort et durée de l'exercice lors du maintien d'une intensité fixe (Noakes, 2004 ; Crewe et al., 2008).

Des zones d'ombres subsistent autour de cette proposition théorique de Timothy D. Noakes. En particulier, la description du processus d'anticipation ou de calcul de la variation optimale de la perception de l'effort n'est pas associée à une structure anatomique clairement définie (Marcora, 2008b). Si plusieurs aires cérébrales telles que le cortex insulaire, le cortex cingulaire antérieur ou les zones latérales et ventromédiales du cortex seraient potentiellement impliquées (Noakes, 2012 ; Robertson et Marino, 2016), pour autant rien ne définit à l'heure actuelle si et comment les interactions entre ces aires régissent la « boîte noire ».

1.4.5. Le flush model

En dépit des multiples propositions disponibles dans la littérature, les différents modèles théoriques explicatifs de la régulation de l'allure ont pour limite commune et majeure de ne pas tenir compte des spécificités inhérentes à chaque discipline sportive. Parmi ces disciplines, la pratique de l'ultra-marathon (*i.e.* épreuves de course à pied de 50 km minimum) se caractérise par la diminution progressive de l'allure et de la fréquence cardiaque au cours du temps (Utter et al., 2003). Parce que de telles régulations sont la possible conséquence d'une fatigue latente au cours de l'effort, Guillaume Millet (2011) s'est d'abord intéressé, à travers une revue de littérature exhaustive, à ses multiples origines. Cette revue nous apprend tout d'abord que la diminution progressive de l'allure ne peut être raisonnablement associée, de manière systématique, à une altération parallèle des mécanismes centraux et périphériques de production de force musculaire. Certes, courir sur de très longues distances engage une série de processus inflammatoires, nerveux et cérébraux qui peuvent largement affecter la capacité de l'athlète à produire une force musculaire optimale. Affirmer que ces adaptations influencent directement la régulation de l'allure pendant la course implique toutefois de franchir un pas qu'aucune étude approfondie des réponses neuromusculaires lors de telles épreuves n'a pu franchir jusqu'à

présent. Au contraire, le faible pourcentage de force maximale généré par les muscles locomoteurs lors d'un exercice de course à pied de très longue durée suppose que de telles sollicitations ne sont pas en mesure d'affecter, de manière inéluctable, les mécanismes centraux ou périphériques de production musculaire (Marcora et al., 2008a).

Dans ce contexte, l'auteur propose une hypothèse alternative largement inspirée du modèle théorique du gouverneur central. Ainsi, la diminution progressive de l'allure aurait pour but de conserver, tout au long de l'épreuve, une perception de l'effort inférieure à un seuil limite au-delà duquel il ne serait plus possible de poursuivre la course. Ce processus permettrait ainsi de préserver, dans le temps, un relatif équilibre homéostatique de l'organisme. Partant de cette hypothèse, Guillaume Millet a proposé un modèle original spécifique à l'ultra-marathon et illustré par le fonctionnement de la chasse d'eau (*i.e. flush*, en anglais) d'une cuvette de toilettes. Le mécanisme de fonctionnement de la chasse d'eau est décrit autour de quatre éléments clés : le flotteur, qui représente le seuil de RPE *(i)*, monte ou descend à l'intérieur de la chasse en fonction du débit de remplissage *(ii)* et du débit d'évacuation d'eau *(iii)* jusqu'à pouvoir atteindre un seuil limite que l'auteur nommera « capacité de réserve ».

Le débit de remplissage de la cuvette est fonction de l'allure de déplacement ou de la puissance soutenue. Ainsi, plus l'allure est élevée, plus les intensités des signaux afférents (issus des récepteurs périphériques sensoriels) et des signaux efférents (générés par le cortex moteur) seront importantes, et plus la perception de la difficulté de l'effort sera élevée. Dans le contexte de l'ultra-marathon, des adaptations neuromusculaires spécifiques liés, par exemple, à une inhibition d'origine spinale impliqueraient une action compensatrice de la commande motrice centrale afin de produire le même niveau de force (Millet et al., 2000), avec pour conséquence la distorsion de l'effort perçu. En parallèle, plusieurs facteurs dont l'effet sur la performance peut être délétère (*e.g.* fatigue mentale, privation de sommeil) ou bénéfique (*e.g.* consommation d'amphétamines, stratégies de refroidissement) impliquent un niveau de remplissage initial plus ou moins important de la cuvette. De même, pendant l'exercice, l'application de stratégies psychologiques, nutritionnelles (*e.g.* rinçage buccal à partir d'une solution sucrée ou mentholée) ou autres (*e.g.* écoute de musique) entraîne le maintien ou la baisse du niveau de remplissage de la cuvette par évacuation de l'eau. Enfin, la capacité de réserve correspond à un seuil au-delà duquel l'athlète sera proche d'interrompre l'exercice. Ce seuil sera néanmoins sensible à une modification des processus sensoriels relevant de la pharmacologie (*e.g.* amphétamines) ou du scénario de course (*e.g.* accélération de fin d'épreuve), potentiellement associée à un risque accru de désordres physiologiques ou mécaniques du corps.

Largement inspiré du modèle du gouverneur central, le « *flush model* » relativise toutefois l'hypothèse d'une quelconque intervention de la « boîte noire ». Ainsi, un éventuel référentiel d'allure optimale ne serait, au mieux, que le résultat d'un long processus d'apprentissage et de mémorisation (Lambert et al., 2004). L'existence même de ce référentiel serait potentiellement exclue, mettant ainsi entre parenthèses la zone d'ombre majeure de la proposition théorique de Timothy D. Noakes. En revanche, ce modèle semble entretenir la confusion quant aux origines neurophysiologiques de la perception de l'effort, par le rôle accordé aux afférences sensorielles dans le « débit de remplissage de la cuvette » (voir parties 1.3.2. et 1.3.3.). D'autre part, il conforte bel et bien l'idée selon laquelle l'athlète ne dépasse que très rarement un seuil physiologique « critique » d'effort. Le dépassement de ce seuil serait, selon ce modèle, la conséquence d'un surcroît de motivation (*nous définirons plus loin la notion de « motivation » dans la partie 1.5.3.*). Les réponses issues de ce paramètre psychologique sont ainsi décrites comme binaires et relatives à l'équilibre entre inconfort global (ou difficulté de l'effort… la différence n'est pas clairement exprimée ici ?) ressenti pendant l'effort et récompense potentielle issue de l'accomplissement de l'exercice (Kayser, 2003). A l'inverse, et de manière plus générale, l'abandon prématuré et inexpliqué d'un exercice sous-maximal prolongé ne fait l'objet d'aucune réelle explication par la théorie du gouverneur central.

1.4.6. L'hypothèse psychobiologique

En opposition au modèle du gouverneur central, l'hypothèse psychobiologique considère que la régulation de l'allure est d'abord le résultat de décisions (positives ou négatives) pleinement conscientes de l'athlète au cours de l'épreuve. En d'autres termes, la réduction de l'allure (voire l'abandon de l'épreuve) s'expliquerait par un désengagement volontaire du sujet (Marcora, 2008b).

La régulation de l'intensité relève de facteurs cognitifs et motivationnels parmi lesquels, en premier lieu, la perception de l'effort (Pageaux, 2014). En d'autres termes, les ajustements volontaires de l'allure ont pour but de maintenir des réponses perceptives adéquates tout au long de l'épreuve face aux réponses physiologiques inhérentes à l'exercice. Ainsi, certaines manipulations pharmacologiques (*e.g.* amphétamines) et/ou nutritionnelles (*e.g.* caféine) limitent la difficulté perçue de l'effort et incitent l'athlète à soutenir volontairement une intensité plus élevée (Swart et al., 2009 ; De Morree et al., 2014). A l'inverse, l'apparition de la fatigue physique (de Morree et Marcora, 2013) ou mentale (Pageaux et al., 2015) génère une

distorsion de la perception de l'effort indépendante d'autres facteurs liés, par exemple, à la fatigue neuromusculaire.

L'étude approfondie des effets de la fatigue mentale sur la performance sportive soutient pleinement l'idée selon laquelle nos choix propres influencent, avant tout, la régulation de l'intensité d'un exercice. La fatigue mentale est définie comme un état caractérisé par une sensation subjective de fatigue et un manque d'énergie, qui survient généralement à l'issue de tâches cognitives complexes et/ou prolongées (Boksem and Tops, 2008). Au-delà des effets délétères sur les fonctions cognitives de l'individu, l'altération de la performance en endurance relative à la fatigue mentale a été récemment démontrée par plusieurs travaux, en premier lieu desquels l'étude princeps publiée par Samuele Marcora et ses collaborateurs (2009b). La réalisation préalable d'une tâche de mémorisation et d'attention fatigante (*i.e.* AX Continuous Performance Task ou AX-CPT) pendant 90 min a induit, comparativement à une tâche préalable de visionnage d'un film sans aucune demande cognitive, une diminution de 15 % du temps de maintien d'un exercice sous-maximal (*i.e.* 80% de la puissance maximale) sur ergocycle. Alors que les paramètres physiologiques mesurés pendant l'exercice n'ont présenté aucune différence entre les deux conditions, seule la perception de l'effort s'est montrée supérieure suite à la tâche préalable mentalement fatigante. Ce résultat a pu être corroboré, par la suite, lors d'exercices de contre-la-montre (Pageaux et al., 2014) ou bien à RPE fixe (Brownsberger et al., 2013). La capacité de production de force ne serait, à l'inverse, aucunement altérée par la fatigue mentale et donc susceptible d'intervenir sur la baisse de performance en endurance (Pageaux et al., 2015).

Outre l'intensité des réponses subjectives lors de l'effort, le niveau d'engagement de subjectives dépend également de la « motivation potentielle » de celui-ci à produire l'exercice (*voir partie 1.5.3. pour la définition*). La décision de l'individu de se désengager de l'exercice serait la conséquence d'une distorsion du rapport entre le coût induit par des réponses affectives négatives de douleur et/ou l'inconfort et le bénéfice susceptible de motiver la réalisation de l'exercice (Brehm and Self, 1989). En d'autres termes, lorsque la motivation dite « potentielle » du sujet est moindre, ce dernier se désengage précocement de l'exercice et le seuil de perception de l'effort atteint, à cet instant, est plus faible qu'à l'accoutumée pour une tâche similaire (*e.g.* désengagement à RPE-15 au lieu de RPE-17).

Trois autres facteurs interviennent dans la prise de décision de l'athlète au cours de l'exercice : *(i)* la distance ou le temps total de l'épreuve, *(ii)* la distance ou le temps restant et *(iii)* l'expérience préalable de l'individu en termes de pratique.

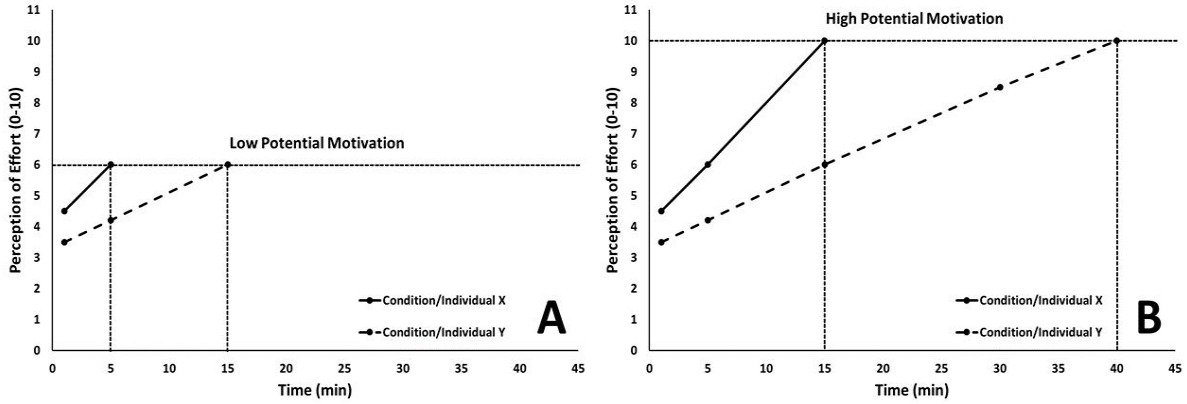


Fig. 7 Description de l'interaction entre perception de l'effort et motivation potentielle selon le modèle psychobiologique. Ce schéma matérialise la variation du seuil de RPE maximal que peut tolérer le sujet, selon sa condition physique (*i.e.* individu X *vs.* individu Y), dans le cas d'une motivation faible (A) ou élevée (B) (issu du compte Tweeter de Samuele Marcora).

Leur rôle est secondaire, en effet leur intervention se cantonne à des choix stratégiques spécifiques tels qu'une accélération de l'allure en fin d'épreuve.

Du point de vue neurophysiologique, le modèle psychobiologique suggère que les décharges corollaires soient le signal prédominant de la perception de l'effort. Les afférences sensorielles, bien qu'elles jouent un rôle secondaire dans la régulation de l'allure (voir partie 2.4.), n'interviendraient pas dans la régulation des signaux nerveux efférents envoyés vers les muscles. L'idée de « pleine conscience » de l'activation musculaire, et donc l'importance attribuée aux facteurs psychologiques de la performance sportive, constitue évidemment une différence majeure avec l'ensemble des modèles théoriques de régulation de l'allure cités auparavant. Au niveau cérébral, si des investigations supplémentaires sont nécessaires pour mieux comprendre les mécanismes sous-jacents (*i.e.* accumulation d'adénosine intracérébrale ; Martin et al., 2018), les neurones du cortex cingulaire antérieur semblent néanmoins jouer un rôle central par leur implication dans la construction des réponses comportementales et motivationnelles (Chudasama et al. 2013).

1.5. Rôle joué par les facteurs émotionnels et affectifs

1.5.1. Les caractéristiques psychologiques de l'athlète

Nous avons pu voir, lors de la partie précédente, que la plupart des modèles théoriques descriptifs du processus de régulation de l'allure considèrent les réponses perceptives à l'effort comme essentiellement dérivées de l'état physiologique de l'organisme. Seul le modèle

psychobiologique de Samuele Marcora précise le rôle joué par l'état psychologique de l'athlète dans la construction des choix décisionnels entrepris pendant l'épreuve. Au-delà des constats empiriques généralement établis par les athlètes et les entraîneurs, la recherche s'est chargée de définir dans quelle mesure les caractéristiques psychologiques du sujet d'une part, et l'évolution de ces mêmes caractéristiques au cours de l'exercice d'autre part, vont régir par le biais de réponses émotionnelles la régulation instantanée de l'allure (Venhorst et al., 2017).

Par le passé, ces caractéristiques ont été recensées et catégorisées par Noble et Robertson (1996) à l'intérieur de leur modèle explicatif global. Tout d'abord, les médiateurs dits « affectifs » sont liés aux émotions et humeurs et sous-jacents aux traits de personnalité du sujet. Par exemple, un individu anxieux, dépressif ou névrotique percevra une même intensité d'exercice comme plus pénible qu'un autre individu au profil psychologique plus stable. Inversement, les réponses émotionnelles associées à la douleur ou à l'inconfort sont plus faibles chez un individu défini comme « extraverti » (Morgan, 1973). Les médiateurs « affectifs » jouent ainsi un rôle-clé dans la construction du sentiment d'efficacité personnelle à réaliser une tâche physique (McAuley and Blissmer, 2000).

Les médiateurs « perceptifs » décrivent le processus à travers lequel les entrées sensorielles sont régulées. Ils sont également liés à la personnalité de l'individu. Sont ainsi distingués, de ce point de vue, des sujets « augmenteurs » sensoriels (en d'autres termes, des sujets pour lesquels une réponse perceptive à un même état physiologique sera amplifiée) et d'autres dits « réducteurs » (cette même réponse perceptive sera minorée). Les médiateurs « sociaux et situationnels » décrivent les interactions directes et indirectes entre l'individu et d'autres personnes, par exemple les adversaires lors d'une épreuve de compétition ou bien l'expérimentateur lors d'un protocole standardisé en laboratoire (Boutcher et al., 1988).

Enfin, les médiateurs « cognitifs » caractérisent la stratégie attentionnelle choisie par l'athlète, ou bien les éléments sur lesquels ce dernier oriente sa concentration et son attention tout au long de l'épreuve. De ce point de vue sont principalement distinguées les stratégies d'association (*i.e.* focalisée sur les sensations corporelles) et de dissociation (*i.e.* focalisée sur des pensées extérieures). Leurs portées respectives sur la perception de l'effort et la performance sont ainsi opposées. Une attention focalisée sur les sensations corporelles tendrait par exemple à exacerber négativement les réponses perceptives (Stanley et al., 2007). Le caractère approprié des choix stratégiques sur le plan attentionnel dépend également du contexte d'exercice et du niveau d'expérience de l'athlète (Brick et al., 2016).

1.5.2. Les réponses émotionnelles, entre physiologie et psychologie

Le modèle psychobiologique de Marcora pose en creux la question de l'interrelation entre les caractéristiques psychologiques de l'individu et les réponses physiologiques inhérentes à l'exercice. Or, l'amplitude de ces dernières dépend, avant tout, de l'intensité produite par l'athlète. Ainsi, la théorie du « mode-duel » (Ekkekakis et al., 2005) définit l'interaction des entre messages sensoriels et état psychologique dans la construction des réponses affectives à l'exercice. L'intensité de l'exercice est considérée comme le facteur clé en fonction duquel prédomine sur l'affect les réponses physiologiques ou psychologiques (Pandolf, 1982). Par exemple, le rôle des afférences sensorielles serait prédominant lors de la production d'intensités supérieures au seuil ventilatoire, réduisant ainsi la variabilité interindividuelle des performances. Inversement, les caractéristiques psychologiques de l'individu sont considérées comme le déterminant majeur de la régulation d'intensités inférieures ou proches du premier seuil ventilatoire. De manière générale, le lien entre les réponses sensorielles issues de l'intéroception et les réponses affectives sous-jacentes est certes fort, mais également complexe et multiple (Herbert et al., 2007). Pour rappel, l'affect est défini comme un état neurophysiologique primitif accessible par la conscience et dont la nature et l'intensité sont susceptibles de varier dans le temps.

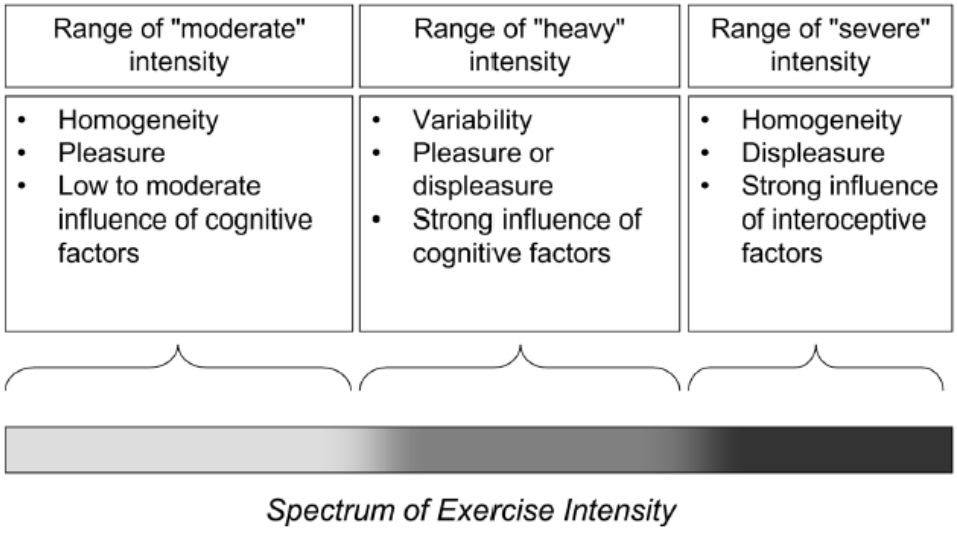


Fig. 7 Présentation du rapport entre intensité de l'exercice et réponses affectives selon l'hypothèse du « mode duel » (issu de Ekkekakis et al., 2005).

Le rôle joué par l'affect dans le comportement a été mis en évidence par les travaux de Michel Cabanac, dans la lignée des théories dites « hédoniques » selon lesquelles l'initiation d'un comportement par l'individu a pour but premier de maximiser le plaisir et/ou limiter le

déplaisir ressenti (Cabanac, 1992). Or, dans le contexte de l'exercice physique, la dérégulation de l'équilibre homéostatique serait une source importante de distorsion affective. Par exemple, le suivi de marqueurs affectifs chez des sujets en état d'hyperthermie corporelle montre une évolution positive lorsque le stimulus renvoie à un équilibrage du confort thermique perçu (Cabanac et al., 1972 ; Attia, 1984). On peut, à l'inverse, considérer que les réponses affectives négatives à un exercice soient de plus en plus importantes à mesure que l'effort puisse être subjectivement perçu comme difficile.

1.5.3. Les interactions entre affect et motivation

Nous avons vu, précédemment, que la motivation de l'individu à maintenir la production d'un exercice semble intimement liée aux réponses affectives que génère ce dernier. Tout d'abord, la motivation définit les comportements d'engagement ou de désengagement des sujets lors d'activités physiques ou cognitives (Wilmore, 1968). La dégradation des réponses motivationnelles est ainsi considérée comme un élément médiateur de l'interaction entre fatigue et douleur lors de l'effort chez les personnes souffrant de douleurs chroniques (Van Damme et al., 2018). Les réponses motivationnelles, par exemple lors de la production une tâche physique, sont augmentées par des renforcements positifs que l'on qualifie d'extrinsèques ou d'intrinsèques. Les renforcements « extrinsèques » sont d'origine pécuniaire (*i.e.* prime ou récompense ; Skorski et al., 2017) ou sportive (*i.e.* présence d'un adversaire, enjeu général ; Hulleman et al., 2007), alors que les renforcements « intrinsèques » sont issus des sensations internes perçues pendant l'effort (*i.e.* en général, ces sensations sont d'origine physiologique).

L'évolution récente du champ de connaissances autour des neurosciences, relative au développement des techniques d'exploration, a contribué au décryptage partiel des mécanismes cérébraux à l'origine des réponses affectives et émotionnelles de l'individu, et par ricochet à l'évocation d'un lien avec les réponses motivationnelles. Le cortex insulaire et le cortex cingulaire antérieur seraient principalement impliqués dans la régulation des réponses affectives à l'effort en tant qu'éléments à part entière du système limbique (voir partie 1.3.1.). Leur action collective génère des changements comportementaux destinés à limiter ou atténuer la perception de phénomènes somatiques, tels que la douleur ou l'inconfort (Damasio et al., 2000). Ces deux aires sont en liaison bidirectionnelle avec le cortex préfrontal ventromédian. Ce dernier joue un rôle majeur dans la régulation et l'inhibition de réactions émotionnelles négatives par sa connexion avec les substances grises périaqueducales et l'hypothalamus (Ongur and Price, 2000 ; Barbas et al., 2003). Il participe également, avec le cortex cingulaire

antérieur, au système de régulation de la récompense à l'origine de réponses motivationnelles spécifiques (Haber and Knutson, 2010). Le fonctionnement de cette structure complexe dépend à la fois des interactions entre le cortex préfrontal ventromédian et l'aire-clé du processus motivationnel (*i.e.* striatum ventral ; Cauda et al., 2011).

En résumé, les proximités neurophysiologiques entre mécanismes de régulation de l'affect et de la motivation soulignent l'interdépendance de ces deux facteurs dans les comportements et les prises de décision pendant l'effort. L'inconfort que ce dernier génère aura ainsi un effet plus ou moins palpable sur la performance selon le désir et la motivation de l'athlète à réaliser le meilleur résultat possible (Noakes, 2012). Partant de ce constat, Bertrand Baron et ses collaborateurs (2011) ont suggéré que la motivation d'un athlète à soutenir un effort important est avant tout dépendante de l'écart entre la charge affective instantanée de l'effort en cours et le seuil maximal de tolérance que l'athlète s'est préalablement fixé de ce point de vue.

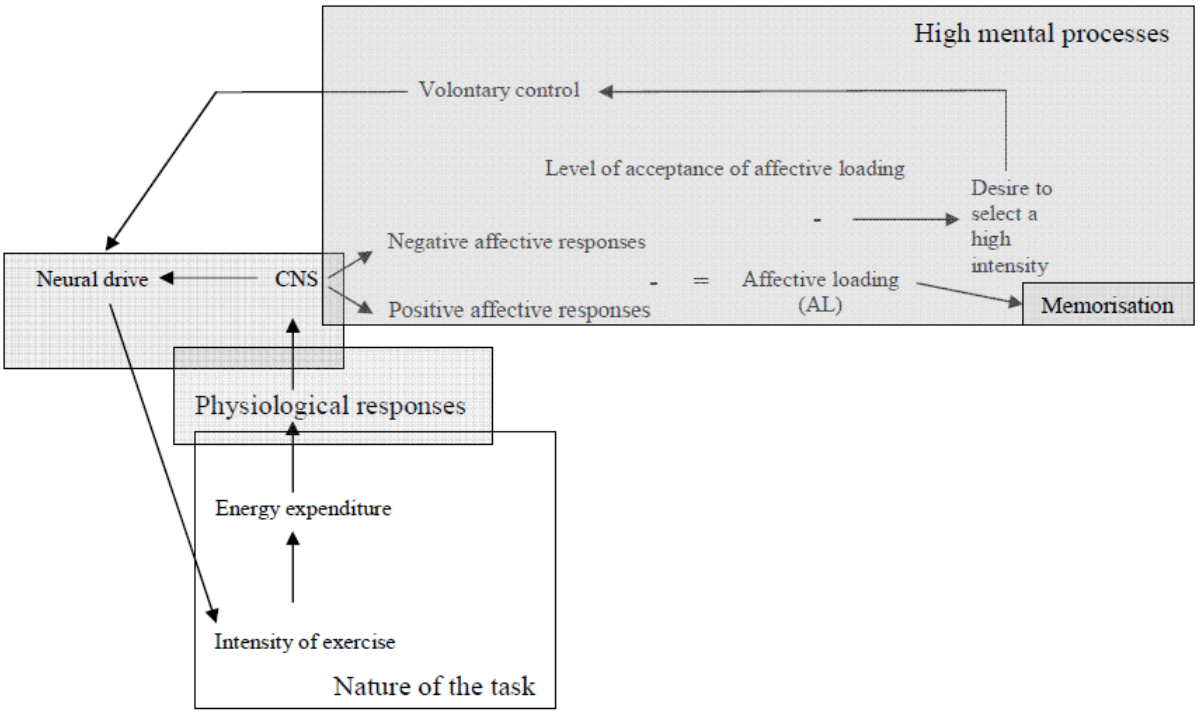


Fig. 8 Schématisation de l'interrelation entre la nature de la tâche, les réponses physiologiques, les processus psychologiques et l'ajustement de l'activité du système nerveux central sur les stratégies d'allure lors d'un exercice libre (issu de Baron et al., 2009).

POINTS-CLES DU CHAPITRE 1

- L'effort est une mobilisation volontaire et consciente de forces physiques ou psychologiques en vue de lutter face à une contrainte à subir, ou de produire une tâche à accomplir.

- La perception de l'effort est l'expérience consciente de la difficulté, de la pénibilité associée à la tâche produite ou à la contrainte subie. Ce paramètre joue un rôle clé dans la régulation de l'exercice au cours de l'exercice à libre allure.

- L'hypothèse du rôle joué par les afférences périphériques dans la perception de l'effort est contestée. Ce phénomène serait davantage le résultat d'un processus nerveux efférent issu de la commande motrice centrale (*i.e.* décharges corollaires). Les afférences périphériques influenceraient, par les sensations que leur interprétation génère, les réponses émotionnelles et affectives lors de l'exercice.

- La motivation du sujet à soutenir un effort dépendrait des réponses émotionnelles et affectives lors de l'exercice. Selon le modèle psychobiologique de la performance en endurance, la motivation potentielle détermine le degré d'engagement du sujet pendant l'exercice, autrement dit le seuil limite de perception de l'effort qu'il serait capable de tolérer.

2. L'EXERCICE A PERCEPTION D'EFFORT FIXE

2.1. Généralités

Si le contrôle de la perception de l'effort pendant l'exercice est une méthode répandue à tous les niveaux de pratique physique et sportive, la production de l'allure à partir de ce même marqueur subjectif est moins exploitée (Eston et al., 1987).

L'application de ce mode d'exercice suppose que l'individu est apte à établir une relation cohérente entre production réelle et estimation de l'intensité subjective (Dunbar et al., 1992 ; Higgins et al., 2013). Sur le plan pratique, les praticiens hospitaliers ont été les premiers à s'intéresser à de tels protocoles d'exercice, par exemple lors de la mise en place de programmes de réadaptation à l'effort destinés à des patients à la suite d'un accident cardiovasculaire (Smutok et al., 1980). Inversement, les sciences du sport ne s'intéressent que depuis peu à son application en contexte d'exercice aigu (Tucker et al., 2006) ou chronique (Céline et al., 2011 ; Parfitt et al., 2012). Le besoin d'approfondir les connaissances quant aux effets de facteurs environnementaux (Schlader et al., 2011 ; Ravanelli et al., 2014 ; Friesen et al., 2017), biochimiques (Swart et al., 2009 ; Browne and Renfree, 2013) ou cognitifs (Brownsberger et al., 2013) sur la performance en endurance a conduit à l'application du mode d'exercice « à RPE fixe » comme support de recherche.

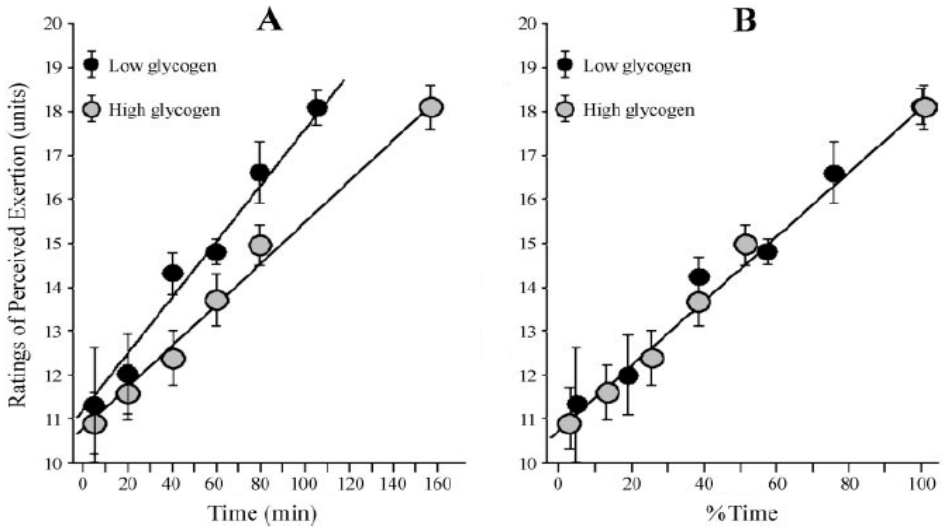


Fig. 9 Relation entre perception de l'effort (RPE) et temps exprimé de manière absolue (A) ou relative à la durée totale d'un exercice à intensité fixe (B), démontrant la théorie dite du « temps scalaire » (issu de Noakes, 2004).

La régulation de l'intensité de l'exercice à partir de la perception de l'effort se caractérise par *(i)* le choix d'une allure ou d'une puissance initiale en rapport avec le seuil de RPE produit, et *(ii)* la régression linéaire et progressive de l'allure ou de la puissance dans le temps pour le maintien du seuil de RPE. La relation entre RPE et puissance peut ainsi être interprétée comme l'inversion de la relation linéaire et positive entre RPE et temps observée lors du maintien jusqu'à épuisement d'une puissance fixe (Noakes, 2004). La pénibilité de l'effort se caractérise en effet par la vitesse de variation de RPE (*i.e.* proportionnelle à la durée de maintien de l'intensité fixe) selon la théorie du « temps scalaire » (Droit-Volet and Wearden, 2003). Plus RPE augmente rapidement dans le temps et plus l'exercice est exigeant donc susceptible de provoquer prématurément l'épuisement du sujet. Cet épuisement sera associé au ressenti d'un seuil de difficulté extrême (*e.g.* RPE-19 ou RPE-20 sur l'échelle 6-20 de Borg ; Garcin and Billat, 2001).

La reproductibilité des corrélations vérifiées entre RPE et réponses physiologiques lors d'épreuves incrémentées a permis de valider partiellement ce modèle (Garcin et al., 2003). Aujourd'hui, et bien que l'application d'exercices à perception d'effort fixe soit considérée comme valide dans le champ des sciences du sport (Eston et al., 2015), certaines zones d'ombres tendent à persister. Tout d'abord, aucune donnée scientifique n'est en mesure de vérifier la reproductibilité de la vitesse de diminution linéaire de l'intensité lors de la production d'un seuil de perception d'effort sur une durée prolongée. Ensuite, l'absence de consensus sur la notion de « perception de l'effort » (Abbiss et al., 2015 ; Pageaux, 2016) laisse une porte ouverte à certains biais méthodologiques inhérents à la mise en place de tels protocoles, par la possible hétérogénéité des consignes transmises au sujet. De manière plus générale, et en dépit de propositions claires, aucun cadre méthodologique fiable et reproductible n'est appliqué lors de la production de tels exercices. L'objectif du chapitre qui suit sera, après avoir établi une vue d'ensemble, de faire des propositions concrètes.

2.2. Méthodologie de l'exercice à perception d'effort fixe

2.2.1. Définir une intensité subjective optimale selon l'objectif

Etablir la méthodologie d'un protocole de recherche en sciences du sport implique de déterminer une intensité d'exercice optimale, en rapport à l'objectif initial de l'étude ou de la session. Par exemple, l'étude des mécanismes neurophysiologiques sous-jacents à la fatigue nécessite que l'exercice soit suffisamment intense et/ou long pour les activer avant son issue. Ainsi, la mise en place d'un exercice à RPE fixe requiert de définir un seuil d'intensité

subjective « optimal », auquel il sera possible d'observer un effet des facteurs expérimentaux appliqués sur la régression linéaire de la puissance soutenue (Hartley et al., 2012).

De manière générale, la faible quantité d'informations communiquées par la plupart des travaux antérieurs cités (*i.e.* valeurs moyennes de puissance maximale aérobie – PMA – et/ou de consommation maximale d'oxygène – $\dot{V}O_{2max}$ – de la population incluse) ne permet pas d'établir un quelconque référentiel entre intensité subjective et réelle. Toutefois, un seuil minimal de RPE-15 semble être requis dans le but de générer des adaptations ventilatoires et métaboliques significatives (Gaesser and Poole, 1996). Par exemple, le choix d'une intensité subjective qualifiée de « difficile à très difficile » (*i.e.* RPE-16 ; Tucker et al., 2006 ; Swart et al., 2009) implique le développement d'intensités initiales de l'ordre de 70 %PMA, puis leur diminution progressive dans le temps jusqu'à atteindre environ 50 %PMA à l'arrêt de l'exercice. La vitesse de diminution de la puissance est de l'ordre de 1 à 2 $W.min^{-1}$ pour une durée de maintien minimale de 60 min. Inversement, l'étude de Cochrane (2015b) a montré que la production d'un effort de durée similaire à intensité « modérée » (*i.e.* RPE 12-13) n'implique pas de variation significative dans le temps de $\dot{V}O2$, et ce en dépit d'un équilibre constant entre production et recyclage des ions lactate. En d'autres termes, le maintien d'une telle intensité subjective d'exercice s'accompagne d'une pente de régression nulle de la puissance développée.

A l'échelle individuelle, les réponses physiques et physiologiques propres à chaque seuil de RPE présentent une variabilité importante quel que soit le niveau d'homogénéité des caractéristiques générale de la population étudiée. Dans ce contexte, il a été proposé de déterminer, pour chaque individu, un seuil dit de « capacité de travail à RPE fixe » ou correspondant à la valeur de puissance la plus élevée que peut maintenir le sujet sans subir une quelconque distorsion de RPE (Mielke et al., 2008). Ce seuil est estimé à partir d'un modèle mathématique impliquant le calcul des coefficients de variation linéaire de RPE lors du maintien de paliers sous-maximaux de puissance (De Vries et al., 1982). La méthodologie proposée a été par la suite simplifiée, pour être réduite à la production de quatre blocs distincts de 8 min à des puissances fixes entre 65 et 80 %PMA (Cochrane et al., 2015b).

Ce seuil de travail correspondrait approximativement à la puissance développée au premier seuil ventilatoire lors d'une épreuve d'effort de type triangulaire (Cochrane-Snyman et al., 2016). L'hétérogénéité des réponses neuromusculaires à intensité modérée (RPE 14 ± 1) et élevée (RPE 16 ± 1) soutient toutefois l'hypothèse d'une spécificité individuelle des réponses perceptives à l'échelle individuelle.

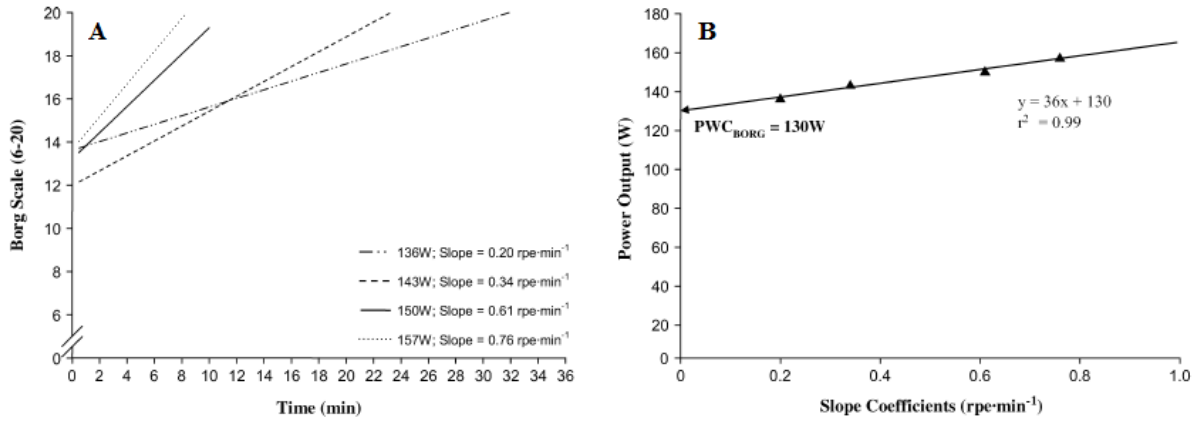


Fig. 10 Méthode de détermination du seuil de capacité de travail à RPE fixe (B), à partir des relations entre RPE et temps lors du maintien de quatre seuils de puissance fixe (A) pendant un exercice de pédalage (issu de Mielke et al., 2008).

2.2.2. Définir une procédure d'apprentissage efficace

L'aptitude du sujet à contrôler et réguler, de manière fiable et reproductible, la production d'un seuil de perception de l'effort conditionne son inclusion ou non à un éventuel protocole expérimental (Robertson et al., 2004). Pour autant, il apparaît que cet aspect est rarement pris en compte par les expérimentateurs.

Dans l'absolu, ces derniers ont pour rôle de transmettre et répéter, à chaque sujet et préalablement avant chaque session, les éléments nécessaires à l'acquisition d'une maîtrise minimale de l'échelle subjective de référence (Coquart et al., 2012 ; Eston et al., 2015). Le sujet est alors informé de la manière la plus précise possible, par voie orale ou écrite, du concept, des objectifs et attentes issues de l'usage de la perception de l'effort ou encore de l'échelle d'estimation exploitée lors des différentes sessions (Abbiss et al., 2015 ; Pageaux, 2016). Les questions posées au sujet et le descriptif des cotations sont adaptés aux indices suivis, au mode de locomotion utilisé et à la population associée au protocole. Par exemple, au cours d'un exercice de pédalage sur ergocycle, la cotation minimale « 6 » lors d'une évaluation indifférenciée via l'échelle RPE 6-20 de Borg représente « un effort nul, au repos » alors que la cotation maximale « 20 » représente « le niveau d'effort le plus dur jamais expérimenté, par exemple à la fin d'une épreuve incrémentée ».

D'autre part, l'application de procédures spécifiques « d'ancrage » lors des visites pré-expérimentales limite l'influence de l'effet d'apprentissage sur la régulation de l'intensité à RPE fixe. La méthode d'ancrage dite « par mémoire » requiert de fixer les sensations globales perçues respectivement au repos et lors de l'effort le plus intense jamais réalisé au cours de son expérience passée, afin de les associer aux cotations minimales et maximales de l'échelle

subjective appliquée (*e.g.* RPE-6 et RPE-20 sur l'échelle 6-20 de Borg). La méthode d'ancrage par « exercice » induit la production, par exemple lors d'une épreuve maximale incrémentée classique ou régulée à partir de RPE, de la gamme complète des paliers d'effort décrits par l'échelle subjective appliquée (Eston et al., 2012). Lors de protocoles avec production de RPE, la combinaison des méthodes d'ancrage par « mémoire » et par « exercice » permet de renforcer les ancrages perceptifs chez les sujets peu familiarisés à l'usage d'outils subjectifs. Néanmoins, aucune étude n'a jusqu'à présent démontré leur impact significatif sur cet aspect.

Ces procédures d'ancrage classiques peuvent être complétées voire suppléées, dans certains cas, par la production répétée et sur de courtes périodes de multiples niveaux intermédiaires de RPE (Lander et al., 2009 ; Higgins et al., 2013). Le calcul du coefficient de variation de la puissance moyenne produite lors des deux séquences successives à RPE équivalente permet alors de vérifier l'aptitude du sujet à évaluer de manière fiable l'intensité subjective d'un effort (Soriano-Maldonado et al., 2013). Par exemple, Brownsberger et ses collaborateurs (2013) ont proposé à leurs sujets de reproduire, lors de la visite d'inclusion, trois séquences d'effort de courte durée à RPE constante (*i.e.* RPE 7, RPE 13 et RPE 18). A l'issue de ce protocole, des coefficients de variation de 8 %, 5 % et 4 % ont été respectivement observés. La mise en place systématique d'un protocole d'échauffement avec augmentation progressive du seuil de RPE participe également au renforcement de ces ancrages. Une étude menée chez des patients à risque cardiovasculaire montre que l'application d'une telle procédure (*i.e.* 2 min à RPE-11 puis 2 min à RPE-13) prévient le phénomène dit de « overshoot », ou de sur-adaptation de la fréquence cardiaque (FC) consécutif au maintien d'une intensité trop élevée par rapport au seuil de RPE cible (Weiser et al., 2007).

2.3. Concept et limites du « RPE clamp protocol »

Au-delà des simples aspects méthodologiques, la compréhension des phénomènes liés au choix puis à la régulation de la puissance à RPE fixe pose également plusieurs questions. L'étude approfondie des modèles théoriques de régulation de l'allure, considérant pour la plupart RPE comme un paramètre central, serait l'une des possibles opportunités de trouver les réponses recherchées. Et parmi les propositions théoriques formulées, le « gouverneur central » considère la vitesse de variation de RPE comme l'expression d'un système subconscient apte à prévenir d'éventuels déséquilibres homéostatiques majeurs (voir partie 1.4.2. ; Saint Clair Gibson et al. 2006).

Dans le but de vérifier l'hypothèse du mécanisme « anticipatoire » (Ulmer, 1996), les auteurs ont demandé aux sujets de maintenir tout au long de l'exercice un même seuil de RPE par l'ajustement permanent de la puissance développée (*i.e.* clamp-RPE protocol ; Tucker et al., 2006). Tout comme une épreuve à libre allure, la production d'un seuil de RPE défini impliquerait *(i)* l'intervention de boucles afférentes et efférentes dans la régulation de l'allure, *(ii)* le maintien d'une capacité de « réserve » d'unités motrices non sollicitées. Les résultats issus de cette étude pionnière semblent valider, selon les auteurs, l'hypothèse « anticipatoire ». Le maintien d'une intensité subjective « élevée à très élevée » (RPE-16) lors d'une tâche de pédalage reproduite dans trois conditions ambiantes distinctes montre *(i)* des puissances initiales (*i.e.* 0-3 min d'exercice) similaires dans les trois conditions, et *(ii)* une régression linéaire de puissance plus rapide en ambiance chaude (2,35 W.min^{-1} à 35 °C *vs.* 1,63 et 1,61 W.min^{-1} à 15 et 25 °C, respectivement). Ces ajustements de la puissance en ambiance chaude sont associés à une interruption précoce de l'exercice (34,0 min à 35 °C *vs.* 50,2 et 48,6 min à 15 et 25 °C, respectivement). Dans le même temps, l'accumulation initiale (*i.e.* 0-4 min d'exercice) de chaleur intracorporelle conduit les auteurs à supposer que ce phénomène soit à l'origine de la diminution accélérée de la puissance à RPE fixe. La température centrale (T_{CO}) ne présente en effet aucune différence majeure avec les deux autres conditions ambiantes. Ces résultats seraient donc l'expression d'un processus subconscient d'anticipation dont le rôle est de prévenir une hyperthermie excessive (Saint Clair Gibson et al., 2003).

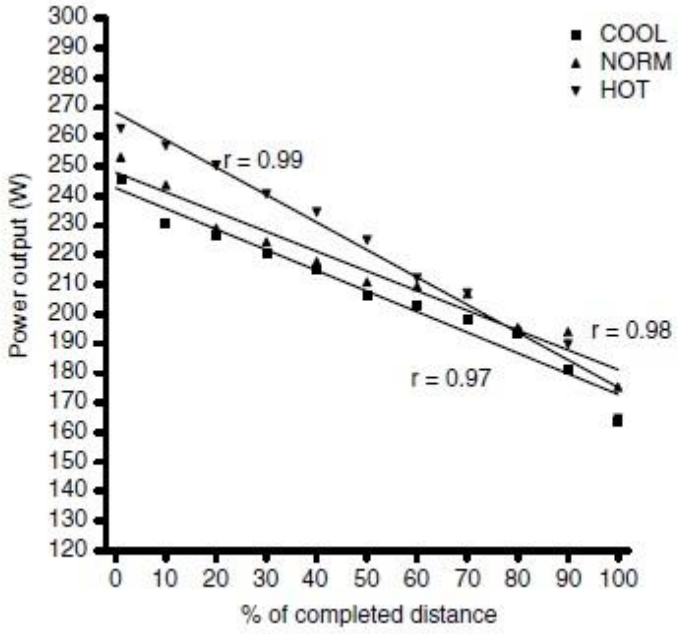


Fig. 11 Variation moyenne de la puissance développée au cours d'un exercice à RPE-16 reproduit en ambiance froide (COOL ; 15 °C), tempérée (NORM ; 25 °C) et chaude (HOT ; 35 °C) (issu de Tucker et al., 2006).

Toutefois, la méthode d'estimation de l'accumulation de chaleur appliquée lors de cette étude princeps s'avère insuffisamment fiable dans un contexte d'exercice physique (*i.e.* modèle thermométrique à deux compartiments ; Jay et Kenny, 2009). La reproduction de ce protocole expérimental présente d'ailleurs, de ce point de vue, des résultats différents lorsque le stockage

de chaleur par l'organisme est contrôlé par calorimétrie indirecte (Ravanelli et al., 2014) ou bien directe (Friesen et al., 2017). De manière générale, l'hypothèse « anticipatoire » de la régulation de l'allure soulève de multiples contradictions.

En premier lieu, l'absence totale d'objectifs de performance (*e.g.* temps et/ou distance totale) et de feedbacks (*e.g.* temps et/ou distance restante) inhérente à la production d'un exercice à RPE fixe ne permet pas, pour l'individu, la construction et la mémorisation d'un schéma optimal de performance et de régulation de l'effort (Lambert et al. 2004). L'influence de l'expérience du sujet ou des caractéristiques de l'épreuve est alors strictement négligée lors d'une telle modalité d'exercice. En second lieu, il est clairement établi que l'exercice à RPE fixe ne génère aucune perturbation physiologique majeure, par exemple d'origine neuromusculaire, susceptible d'activer un éventuel mécanisme subconscient de protection de l'organisme (Cochrane-Snyman et al., 2016). En effet, la réduction progressive de l'intensité génère une contrainte physiologique inférieure, à travail fourni équivalent, à une épreuve sollicitant le maintien d'une puissance fixe (Lander et al., 2009). La réduction progressive du nombre d'unités motrices actives des muscles du quadriceps, observée via la mesure de l'activité électromoygraphique (EMG) lors de la production de RPE-16, tend à valider ce constat (Tucker et al., 2006 ; Swart et al., 2009). Lors d'un exercice de pédalage à effort subjectif « modéré », le maintien de la valeur médiane du spectre de fréquence EMG (Cochrane et al., 2015b) laisse supposer que la vitesse de conduction du potentiel d'action, dépendante elle-même du profil des unités motrices recrutées, n'a pas été affectée par l'exercice musculaire (Beck et al., 2007). Ces résultats suggèrent que la régulation consciente de l'allure à RPE fixe préserve, tout au long de l'exercice, le maintien d'une réserve musculaire essentiellement constituée des unités motrices de grande taille (Saint Clair Gibson and Noakes, 2004).

Enfin, la manipulation extérieure des messages sensoriels périphériques ne serait pas en mesure d'affecter directement la régulation de la puissance ou de l'allure lors de la production initiale d'un seuil de RPE, rejetant l'hypothèse d'une quelconque intervention des afférences nerveuses musculaires pourtant défendue par le modèle du « gouverneur central ». Ainsi, et en dépit de valeurs préexercice de pH sanguin plus élevées et d'une amélioration concomitante de l'efficience musculaire (Bundle et al., 2006), la modification préalable de l'équilibre acido-basique par absorption de bicarbonate de sodium ($NaHCO_3$) ne présente aucun effet sur la puissance initialement développée à RPE-16 (Browne and Renfree, 2013). La production de force moyenne observée à de telles intensités subjectives (*i.e.* inférieur à 50 %MVC; Swart et al., 2009) peut toutefois expliquer l'absence d'un éventuel effet ergogénique de $NaHCO_3$ (Robertson et al., 1986). De plus, la variabilité de cet effet s'avère importante et dépendante du

type d'épreuve mis en place et des caractéristiques des sujets sollicités (McNaughton et al., 2016). Des études complémentaires peuvent être, dès lors, nécessaires à la validation du constat issu de l'étude de Browne et Renfree (Northgraves et al., 2014).

A la lumière de ces éléments, nous pourrions considérer que la régulation de la puissance ou de l'allure à perception d'effort fixe ne peut être fermement considérée, en l'état, comme l'expression d'un processus complexe et subconscient d'anticipation. Une étude plus récente vient toutefois contredire notre raisonnement. Farra et ses collaborateurs (2017) ont ainsi appliqué sur leurs sujets, lors d'une tâche de pédalage à RPE-15, différentes vitesses de diminution de la saturation pulsée en oxygène (*i.e.* de 98 % à 70 % de SpO2, en 5 min, 15 min ou 25 min). En réponse, la diminution de puissance dans le temps (*i.e.* observée entre la première et la dernière minute de chaque essai) serait plus marquée à mesure que la désaturation soit rapide. De plus, les réponses similaires des marqueurs de l'oxygénation musculaire et cérébrale contrôlés par spectroscopie infrarouge laisserait supposer que les réponses physiques sont indépendantes d'une éventuelle fatigue neuromusculaire ou cérébrale. Si l'hypothèse d'une éventuelle régulation subconsciente est plausible, toutefois l'absence de contrôle de variables biochimiques ou psychophysiologiques limite le champ global de réflexion. Il n'est pas à exclure, par exemple, que la condition d'hypoxie à laquelle les sujets ont été exposés et l'inconfort ventilatoire sous-jacent ait pu conduire en réponse à une réduction volontaire de la puissance à RPE fixe (Christian et al., 2014).

2.4. Le rôle des facteurs affectifs et motivationnels

D'après notre suggestion, l'hypothèse selon laquelle la capacité de l'individu à anticiper un éventuel désordre physiologique expliquerait le choix puis la régulation progressive de la puissance à RPE fixe serait en partie caduque. Parmi les arguments défendus, les messages sensoriels afférents issus des muscles, des organes vitaux ou des récepteurs thermosensibles n'auraient pas d'influence sur le choix de l'intensité au début d'une telle épreuve. Cet argument s'appuie, au-delà de quelques études pertinentes sur le sujet (Browne and Renfree, 2013), sur l'hypothèse neurophysiologique du rôle prédominant joué par la commande motrice centrale dans la construction de l'image subjective de l'effort (*voir partie 1.3.3.*).

Néanmoins, ces mêmes messages sensoriels afférents pourraient influencer, de manière indirecte, la vitesse de régression progressive de l'intensité au cours du temps (Cochrane et al., 2015a). En effet, il est possible que leur interprétation par le cerveau soit conditionnée par les adaptations neurochimiques de ce dernier pendant l'exercice, tout particulièrement par l'activité

des neurotransmetteurs monoamines que sont la sérotonine, la dopamine ou la noradrénaline. La compréhension des réponses neurochimiques à l'exercice passe, entre autres, par des manipulations pharmacologiques préalables telles que l'administration de stimulants (*i.e.* amphétamines). Ceux-ci favorisent ou restreignent alors la concentration de neurotransmetteurs dont l'action sur la production et la transmission de signaux neuronaux est susceptible d'influencer la régulation volontaire de l'allure (Roelands and Meeusen, 2010). Par exemple, le méthylphénidate est une amphétamine inhibitrice du recaptage de la dopamine dont la consommation préalable favorise l'activité dopaminergique. Ainsi, à la suite de sa consommation par ingestion, les sujets développent lors d'un contre-la-montre une performance physique moyenne plus élevée et associée à des valeurs terminales de T_{CO} proches de 40 °C, tandis que la valeur de perception de l'effort ne subit aucune distorsion majeure (Roelands et al., 2008). Le renforcement artificiel de l'activité dopaminergique permettrait donc de tolérer un seuil de stress physiologique que l'on peut qualifier de critique car susceptible de mettre en danger l'intégrité physiologique de l'organisme (Roelands et al., 2013).

Par la suite, Jeroen Swart et ses collaborateurs (2009) ont proposé un protocole expérimental similaire lors de la production d'un effort « difficile à très difficile » (*i.e.* RPE-16). Dans ce contexte, alors que des valeurs identiques de puissance initiale ont été vérifiées dans les deux conditions expérimentales (*i.e.* en début d'épreuve, méthylphénidate 305 W *vs.* placebo 303 W), la diminution ralentie de la puissance dans le temps (1,02 *vs.* 1,31 $W.min^{-1}$) et le temps de maintien plus long (88,0 *vs.* 68,3 min) manifestent de l'effet ergogénique de ce stimulant. D'un point de vue physiologique, les mesures cardiorespiratoires et thermiques montrent que le sujet tolère, à même seuil de RPE, une sollicitation plus élevée suite à l'ingestion de méthylphénidate (Roelands and Meeusen, 2010). A l'inverse, aucun élément ne laisse supposer un quelconque effet de l'optimisation de l'activité dopaminergique sur les composantes centrales et périphériques de la force (Klass et al., 2012).

Si l'on s'en tient à l'hypothèse du mécanisme d'anticipation pour expliquer ces résultats, la distorsion de la perception de l'effort sous-jacente à l'administration d'amphétamines est un moyen plus ou moins artificiel d'outrepasser le référentiel optimal « subconscient » censé protéger l'organisme de déséquilibres majeurs (Roelands et al., 2008 ; Tucker et al., 2009). Si l'on tient uniquement compte de la réalité de la pratique sportive, de multiples facteurs sont susceptibles de moduler, faiblement ou modérément, les réponses neurochimiques à l'exercice (*e.g.* alimentation ; pour revue : Briguglio et al., 2018) et ainsi modifier le rapport de l'athlète à sa performance physique et son investissement. De plus, la prolongation de la durée de maintien de l'exercice à RPE-16 (Swart et al., 2009) pourrait être la conséquence d'une

optimisation des aspects motivationnels et attentionnels par la consommation préalable de méthylphénidate (Kollins et al., 1998 ; Roelands et al., 2008). S'appuyant sur ces éléments, nous supposons que la régulation de la puissance à RPE fixe ne résulte pas de l'activation d'un mécanisme subconscient d'anticipation, mais d'une action pleinement volontaire et dépendante de la capacité affective de l'individu à tolérer la contrainte sous-jacente à l'exercice. En d'autres termes, la réduction progressive de la puissance serait un comportement initié dans le but de limiter la distorsion négative des réponses affectives.

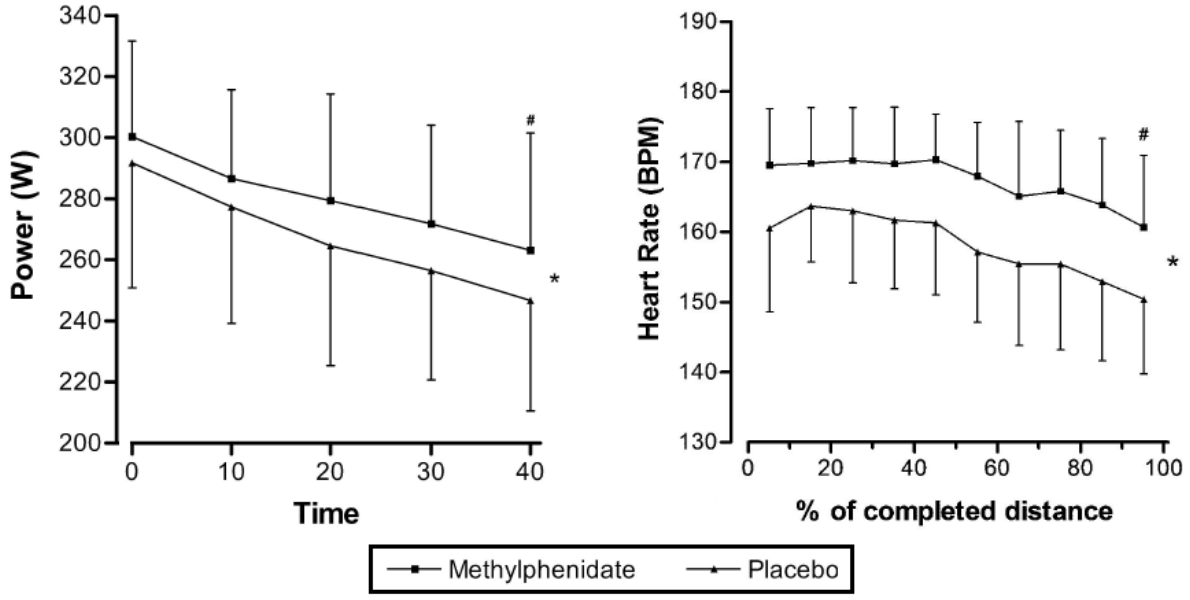


Fig. 12 Variation moyenne de la puissance (à gauche) et de FC (à droite) au cours d'un exercice de pédalage à RPE-16 reproduit après consommation de méthylphénidate et après ingestion d'une substance « placebo » (issu de Swart et al., 2009).

L'application de l'exercice à RPE fixe serait, par conséquent, un moyen pertinent d'évaluer le niveau de tolérance psychophysiologique d'un sujet à des phénomènes somatiques inhérents à l'exercice (*i.e.* inconfort). Une étude récente a ainsi démontré une corrélation positive entre la performance lors d'une épreuve de contre-la-montre de 16,1 km et la puissance produite lors du maintien de RPE-16 (Astokorki and Mauger, 2016).

Dans ce contexte, les messages sensoriels afférents joueraient un rôle-clé par leur influence indirecte sur la motivation du sujet à maintenir l'intensité subjective la plus élevée possible manière indirecte, au travers des réponses affectives sous-jacentes qu'ils génèrent (voir partie 1.5.). A ce stade, une distinction des réponses motivationnelles au cours de l'exercice à libre allure et à RPE fixe est nécessaire pour discuter de ce postulat. Lors d'épreuves-types de compétition, le bénéfice psychologique associé à d'éventuels renforcements « extrinsèques »

de la motivation peut être suffisamment important pour contrebalancer la contrainte affective induite par la sollicitation physiologique pendant l'exercice. Il en est de même concernant la connaissance de la distance ou de la durée restante, à l'origine du phénomène dit de « end-spurt » en fin d'exercice (Pageaux, 2014). Ce surcroît motivationnel génère des ajustements comportementaux tels que la production d'une puissance ou d'une allure supérieure à sa référence personnelle lors d'un exercice (Cabanac, 1992). Inversement, le caractère non-compétitif et standardisé de l'exercice à RPE fixe suggère que seuls les bénéfices dits « intrinsèques », ou relatifs aux sensations perçues, peuvent influencer les aspects motivationnels. En d'autres termes, la vitesse de régression linéaire de la puissance soutenue à RPE fixe serait le reflet de l'amplitude des réponses affectives issues de la perception thermique (Schlader et al., 2011) ou de l'activité métabolique (Browne and Renfree, 2013 ; Farra et al., 2017). La dégradation du plaisir et de la motivation à poursuivre l'exercice dans le temps impliquerait alors de réduire, progressivement et volontairement dans le temps, l'intensité réelle de l'exercice dans le but de maintenir le seuil de perception de l'effort initialement produit. Ce constat pourrait expliquer les différences observées, du point de vue de la cinétique d'évolution de la puissance à RPE fixe, entre les seuils respectivement inférieurs et supérieurs au premier seuil ventilatoire. La production d'intensités faibles ou modérées (RPE 11-13), et associée à des réponses affectives positives (Dishman, 1994 ; Ekkekakis et al. 2011), ne voit ainsi pas ou peu de variation réelles de la puissance développée dans le temps (Cochrane et al., 2015b).

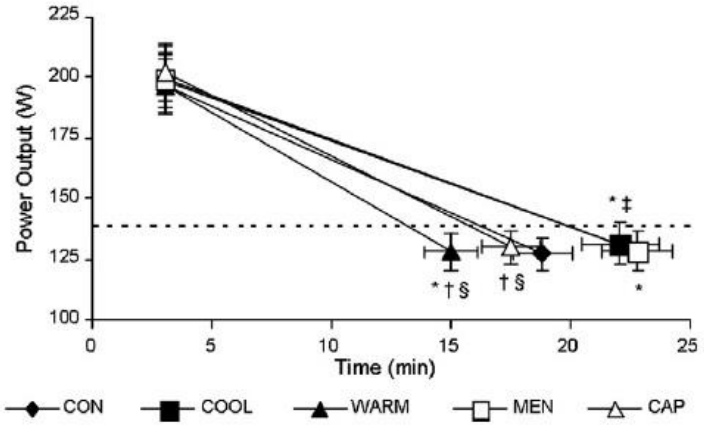


Fig. 13 Expression de la puissance moyenne au cours des 3 premières et des 3 dernières minutes d'un exercice à RPE-16 reproduit avec ventilation d'air frais de face (COOL), avec ventilation d'air chaud de face (WARM), après application d'une solution mentholée (MEN) ou de capsaïcine (CAP) sur le visage (issu de Schlader et al., 2011).

2.5. Perspectives dans le cadre de l'entraînement

Nous avons vu que la modalité de régulation de l'allure à partir d'un seuil de RPE présente un intérêt dans le contexte de l'exercice aigu. Dans un contexte d'exercice chronique,

la mise en place de protocoles d'entraînement basés sur des sessions de même profil présente un intérêt pour les sujets non entraînés ou en phase de réhabilitation physique, par exemple les personnes obèses (Coquart et al., 2012). Nous souhaiterions toutefois nous intéresser, dans ce chapitre, aux effets de tels entraînements sur la performance physique et/ou les adaptations physiologiques sous-jacentes de sujets actifs voire entraînés.

Parmi les quelques travaux référencés, une étude comparative a suivi deux groupes distincts de jeunes femmes actives pendant six semaines, à raison de trois sessions de pratique hebdomadaires à intensité variable et régulée à partir de seuils de FC ou de RPE (Céline et al., 2006). Les deux groupes ont, en moyenne, amélioré de façon similaire leur $\dot{V}O_2$ pic (*i.e.* 10,1 et 9,0 % pour les groupes « FC » et « RPE », respectivement) à puissance maximale aérobie. Dans le même temps, le groupe contrôle n'a obtenu aucune amélioration significative de performance en dépit du maintien de son activité physique habituelle. Un constat similaire a pu être établi à la suite d'un protocole d'entraînement de huit semaines au cours duquel les sujets ont répété des sessions de 30 minutes à intensité subjective modérée (Parfitt et al., 2012). Si les améliorations de $\dot{V}O_{2max}$ (17,3 % en moyenne) et de $\dot{V}O_2$ au seuil ventilatoire ont été significatives pour le groupe entraîné, l'absence d'un groupe contrôle avec suivi d'un protocole d'entraînement habituel restreint néanmoins la portée de ces résultats. De plus, le niveau de performance physique initial du groupe expérimental s'avère largement inférieur à celui du groupe contrôle, ce qui peut ainsi favoriser des adaptations physiologiques plus marquées.

En parallèle d'améliorations notables de la performance, la production de seuils de RPE au cours de protocoles d'entraînement présente de réels avantages sur le plan pratique (Ekkekakis, 2009). En effet, la réponse aux stimuli générés par un tel protocole d'entraînement (*e.g.* amélioration de la puissance moyenne développée au seuil de RPE) constitue une méthode d'évaluation simple et peu onéreuse de l'efficacité du protocole et participe au maintien d'une sollicitation physiologique constante dans le temps. De plus, la régression linéaire et progressive de l'intensité lors d'un exercice à RPE fixe préserve les composantes musculaires des effets délétères d'une fatigue périphérique importante et susceptible de retarder la récupération post-session d'entraînement.

Du point de vue des réponses affectives et motivationnelles, une telle modalité d'entraînement a pour intérêt majeur de renforcer l'adhésion de sujets non entraînés à une activité régulière (Coquart et al., 2008). En marge d'un contexte médical parfois pesant, l'application de méthodes en autogestion peut être bénéfique sur le plan psychologique car il modifie le rapport que peut avoir l'individu face au caractère potentiellement éprouvant et inconfortable de l'activité physique. Le libre choix d'intensités dites « préférentielles »,

généralement proches du premier seuil ventilatoire chez des sujets non entraînés (Parfitt et al., 2006), renforce positivement les réponses affectives à l'exercice du fait des sentiments d'autonomie et de compétence associés (Deci and Ryan, 2008) et préserve d'une distorsion des réponses affectives (Lind et al., 2005). Ces mêmes réponses sont en effet maintenues dans le temps après huit semaines d'entraînement, en parallèle d'une amélioration des performances aérobies (Parfitt et al., 2012). La moindre fatigue périphérique et l'absence de perception de douleur renforce la motivation associée à la production de l'effort, et favorise à court terme l'adhérence au protocole (Lind et al., 2008).

La question de la pertinence de tels protocoles d'entraînement appliqués chez l'athlète entraîné, par exemple lors de protocoles de réadaptation à l'effort après blessure, mérite donc d'être traitée. Plusieurs scénarios d'application sont envisageables. Tout d'abord, le maintien de sollicitations physiologiques intenses par la production de seuils très élevés de RPE lors de sessions intermittentes (*i.e.* RPE-17 à RPE-19 selon l'échelle RPE 6-20 ; Ciolac et al., 2015) est une solution susceptible d'être appliquée lors du cycle de pré-compétition (*i.e.* affûtage ; Le Meur et al., 2012). Cette étape qui précède généralement toute épreuve sportive majeure dans les sports d'endurance est associée à une diminution significative du volume couplée à la conservation des intensités de compétition. Une telle suggestion est également valable lors de cycles de préparation en environnement dit « extrême » (*i.e.* chaleur saisonnière, altitude), ces derniers étant susceptibles de générer une surcharge fonctionnelle relative à la production de hautes intensités (voir partie 3.4.2. ; Schmit et al., 2017). Dans ce contexte, la régulation des différents seuils d'intensité à partir de RPE serait potentiellement plus à même de préserver les paramètres affectifs et motivationnels de l'athlète au fur et à mesure du cycle.

En dépit de ces opportunités, plusieurs questions se posent parmi lesquelles, en premier lieu, le choix des intensités subjectives optimales à soutenir chez l'athlète entraîné. Si, lors de sessions d'entraînement « libres », les intensités préférentielles choisies par ces derniers sont sans doute supérieures à celles produites par des sujets inactifs en raison de leurs aptitudes physiologiques, pour autant les valeurs concomitantes de RPE retranscrites par les deux groupes seront sans doute similaires (Dishman, 1994). Cependant, l'amplitude plus importante des réponses affectives observées, à même intensité, chez des sujets entraînés suggère que leur aptitude à tolérer émotionnellement un effort est supérieure à la moyenne (Bixby and Lochbaum, 2006). Inversement, la production répétée dans le temps de sessions d'entraînement à RPE-15 a pu accélérer la dégradation des réponses motivationnelles de sujets non entraînés, avec pour conséquence une perte des améliorations de performance sous-jacentes à l'entrainement après six mois (Parfitt et al., 2015).

POINTS-CLES DU CHAPITRE 2

- La production et le maintien d'un seuil de perception de l'effort (*i.e.* exercice à RPE fixe) constitue un mode d'exercice valide et reproductible.

- L'application d'un cadre méthodologique strict est nécessaire à l'application de ce mode d'exercice, en particulier dans l'assimilation des échelles de perception et l'ancrage des sensations perçues.

- En contexte aigu, l'étude de facteurs expérimentaux (*i.e.* environnementaux, biochimiques) requiert l'application, au minimum, d'un seuil de RPE-15. Ces seuils peuvent être individualisés par l'estimation de la « capacité de travail à RPE fixe ».

- En contexte chronique, les intensités préférentielles soutenues par des sujets peu actifs (*i.e.* RPE 12-13) sont proches du premier seuil ventilatoire et préservent les réponses affectives sous-jacentes. Il est possible que des sujets entraînés soient en mesurer de tolérer, d'un point de vue psychologique, des intensités plus élevées.

- Le choix initial de la puissance à RPE fixe serait directement lié à la perception de l'effort. Par la suite, la vitesse de régression linéaire de la puissance ne serait pas le reflet d'un mécanisme « anticipatoire » mais l'expression de la tolérance affective et émotionnelle de l'effort soutenu. Les afférences sensorielles influenceraient, par leur effet sur les réponses affectives et émotionnelles, la vitesse de diminution de la puissance soutenue à RPE fixe.

3. CHALEUR ET PERFORMANCE

3.1. Chaleur et performance sportive

3.1.1. Sur épreuves de courtes durées

De multiples études se sont intéressées aux effets de la chaleur ambiante sur la performance sportive en traitant la question au cours de protocoles standardisés en laboratoire. Cependant, et afin de bien comprendre l'impact réel – sur le terrain – des conditions environnementales, il est nécessaire d'évaluer à partir d'un suivi longitudinal l'amplitude de la variation de performance soutenue lors d'événements sportifs rapprochés dans le temps. De tels travaux ont été ainsi réalisés à partir de la base de données issue de sept championnats du monde d'athlétisme consécutifs sur la période 1999-2011, compilée par l'IAAF (International Association of Athletics Federation) puis présentée dans la littérature (Guy et al., 2014).

Les données issues de ces travaux sont présentées dans la graphique ci-dessous *(voir figure 15)*. Nous observons à l'intérieur de ce graphique le pourcentage de variation entre performances moyennes observées respectivement lors des épreuves se tenant en environnement chaud (*i.e.* ≥ 25 °C) et tempéré (*i.e.* < 25 °C). Ce seuil limite de température est considéré comme suffisant pour induire, en dessous de celui-ci, un confort thermique relatif lors de l'épreuve.

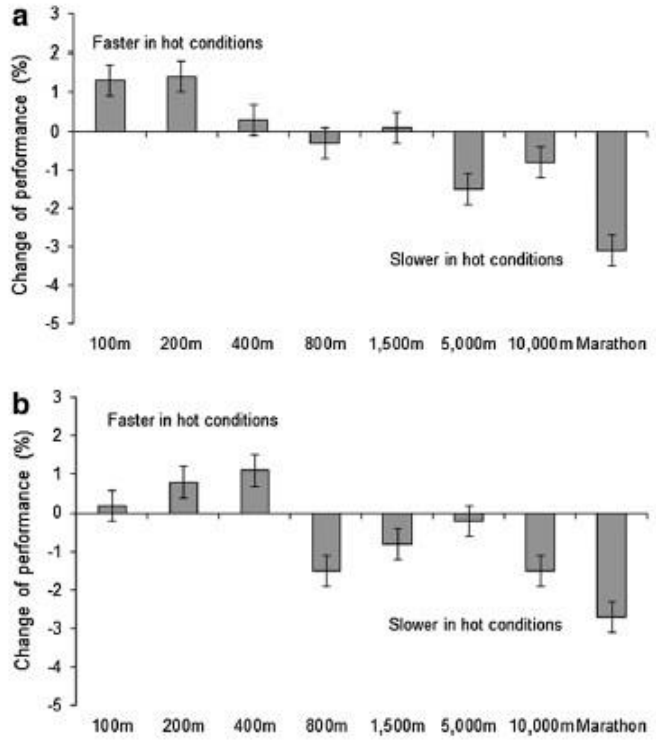


Fig. 14 Graphique comparatif représentant les pourcentages de variation, pour chaque distance en athlétisme (*i.e.* 100m au marathon), entre les performances en ambiance tempérée et chaude chez les hommes (a) et chez les femmes (b) (Issu de Guy et al., 2014).

Sans surprise, les données manifestent de l'effet positif de la chaleur sur la performance moyenne lors des épreuves de courte durée que sont le 100m, le 200m et le 400m. De manière générale, la chaleur ambiante participe à la production de niveaux de puissance musculaire supérieurs sur de très courtes périodes. Ainsi dans un contexte similaire et standardisé, la puissance moyenne soutenue au

cours d'une épreuve maximale de 30s est plus importante à 35 °C vs. 22 °C (903 vs. 851 W ; Lacerda et al., 2006). Le gain de performance est le résultat probable d'une élévation de la température des tissus musculaires, favorisée notamment par le stockage plus important de chaleur dans un tel environnement – ainsi Sargeant (1987) suggère une augmentation de la puissance musculaire de 4 % par degré d'élévation de la température intramusculaire. L'origine de ces adaptations est, en premier lieu, l'aptitude à pouvoir former un plus grand nombre de ponts d'actine-myosine à partir d'un signal nerveux de même intensité. En second lieu, le turn-over de la phosphocréatine (PCr) serait accéléré à mesure que la température des tissus est importante. L'intérêt d'augmenter cette variable dans le but de renforcer la capacité de performance avant une compétition justifie l'intérêt globalement porté aux méthodes dites d'échauffement (ou « warm-up »).

3.1.2. Sur épreuves de longue durée : l'exemple du marathon

A l'inverse de ce que l'on observe sur des épreuves de courte durée, il est clairement établi que la performance lors d'une épreuve telle que le marathon (i.e. 42,195 km de course à pied) se dégrade à mesure que la température ambiante s'élève. Ainsi elle devient, à partir de 10-15 °C, le principal facteur environnemental susceptible de générer un allongement du temps nécessaire au parcours de la distance (Ely et al., 2007) ou un nombre d'abandons plus important (Vihma, 2010). L'exigence de la pratique du marathon (*i.e.* maintien d'une allure de l'ordre de 70-90 %PMA sur une durée minimale supérieure à deux heures) est associée à un risque élevé d'hyperthermie sévère voire de coups de chaleur (Pryor et al., 2015). Ces mêmes risques peuvent être amplifiés par l'humidité absolue de l'air, le rayonnement solaire ou la couverture nuageuse, alors que la présence de vent ou de faibles précipitations pluvieuses atténuent de manière significative la contrainte thermique exercée (Ely et al., 2007 ; Vihma, 2010). De plus, l'incidence potentielle de la température ambiante sur les effets de la pollution de l'air, à la fois sur la performance et la santé de l'individu, ne seront pas négligeables au cours de telles épreuves se déroulant généralement en zone urbaine (Giles and Koehle, 2014).

Dans ce contexte, une étude récente a proposé une comparaison exhaustive des performances globales produites lors de deux éditions successives (2007 et 2008) du Marathon de Londres (El Helou et al., 2012). Les auteurs ont vérifié une diminution de 0,03% de la vitesse de déplacement par degré supplémentaire de température ambiante. Par exemple lors de l'édition 2007 (*i.e.* température ambiante moyenne de 19,1 °C), le temps moyen de parcours était de 17 % supérieur à celui observé en moyenne lors des éditions antérieures (*i.e.*

température ambiante moyenne), alors que 73 hospitalisations dont six pour cas de déshydratation aggravée ont été recensées. L'année suivante, la température ambiante inférieure aux valeurs habituelles (*i.e.* 9,9 °C) a permis de réduire de 20% le nombre d'interventions des services de secours, par rapport aux statistiques globales des années précédentes.

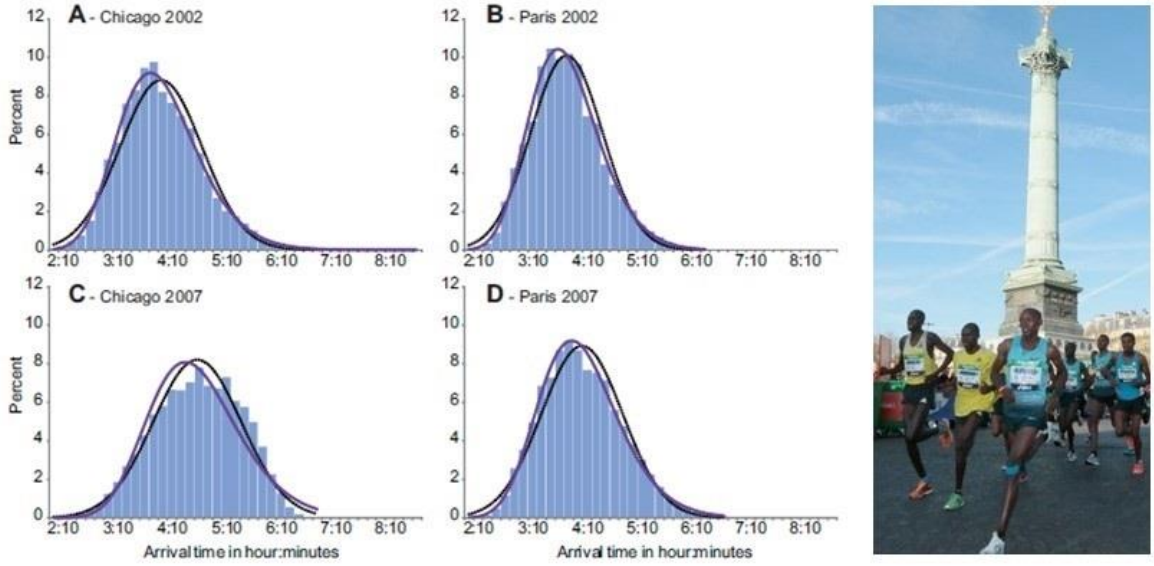


Fig. 15 Distribution graphique des performances chez les participants de sexe masculin aux marathons de Chicago 2002 (T = 5,4 °C ; A) et 2007 (T = 25 °C ; C), et de Paris 2002 (T = 7,6 °C ; B) et 2007 (T = 17,4 °C ; D) (Issu de El Helou et al., 2012).

L'effet délétère de la chaleur sur la performance en marathon s'amplifie à mesure que le niveau d'expertise et de pratique de l'athlète est moindre. L'étude de Vihma (2010) présente une forte corrélation (r = 0,73) entre température ambiante et performance chez les coureurs terminant au-delà de la 1 000^{e} place. A l'inverse, aucune tendance significative n'est observée, de ce point de vue, pour les coureurs classés aux trois premières places de chaque édition. De même, le passage de la température ambiante de 10 °C à 25 °C provoque une élévation du chrono final de 23 minutes pour un coureur dont la performance est de l'ordre de 4 heures, contre 5 minutes pour un coureur de catégorie « élite ». Deux principales explications sont avancées pour expliquer cette relation. D'une part, la durée d'exposition à la chaleur est réduite pour les coureurs d'élite, ce qui limite la quantité totale de chaleur absorbée par le corps. D'autre part, les coureurs les plus lents effectuent généralement leur parcours à l'intérieur d'un peloton. De ce fait, la réduction de l'air circulant limite leur capacité à mieux dissiper la chaleur, à l'inverse des coureurs les plus rapides qui se déplacent en solitaire. Ces mêmes coureurs disposent également de l'avantage de ne pas subir, lors de telles épreuves dont le départ est

généralement fixé tôt le matin, le réchauffement progressif des températures ambiantes au cours de la matinée. Les dispositions morphologiques, physiologiques et psychologiques respectives peuvent enfin expliquer les différences observées du point de vue de l'effet de la chaleur sur la performance (Marino, 2004).

Un autre point intéressant concerne les stratégies d'allure appliquées en fonction de la température ambiante. Dans ce contexte particulier, une stratégie optimale consiste à maintenir un équilibre entre dépense énergétique et puissance développée dans le but de limiter l'élévation de la température centrale (T_{CO}) et ainsi repousser toute dégradation irréversible, à court terme, de l'homéostasie (Tucker, 2009). Ainsi, alors que les coureurs les plus performants tendent à adopter une stratégie constante, les coureurs de moindre niveau adoptent une allure plus rapide au cours des cinq premiers kilomètres avant de ralentir progressivement jusqu'à la ligne d'arrivée (Ely et al., 2008).

3.1.3. Sur épreuves de longue durée : en conditions standardisées

Les différentes observations issues de la pratique sportive en conditions écologiques ont initié une série d'études sur les effets de l'ambiance thermique, que ce soit en laboratoire ou sur le terrain. Ces travaux en conditions standardisées ont impliqué le choix d'une tâche de pédalage comme mode de locomotion (Tatterson et al., 2000 ; Tucker et al., 2004 ; Abbiss et al., 2010 ; Périard et al., 2011b ; Peiffer and Abbiss, 2011). Ainsi, la puissance moyenne développée en ambiance chaude a été de 6,0 à 13,4 % inférieure à celle observée en ambiance tempérée. Ces résultats confirment donc le large consensus autour d'une dégradation de la performance, en réponse à une exposition à la chaleur, lors d'une épreuve de contre-la-montre (pour revue : voir Davies et al., 2016).

L'effet délétère de la chaleur pendant l'effort ne semble toutefois intervenir qu'à partir d'un certain délai. Ainsi, l'évolution de l'intensité développée au cours des 10-15 premières minutes suit des tendances similaires et indépendantes de la condition ambiante appliquée en dépit de distorsions perceptives en environnement chaud, probablement liées à l'élévation de la température cutanée (Tucker et al., 2004). Une plus grande variabilité des performances est également observée à mesure que la température ambiante monte (Davies et al., 2016). L'une des principales explications est l'incapacité à adopter une stratégie d'allure optimale dans ce contexte. En effet, les sujets inexpérimentés sont susceptibles de sous-estimer l'impact réel de l'environnement et donc de démarrer l'exercice de manière trop "agressive" (Castle et al., 2012).

Cela se traduit notamment par des ajustements compensatoires importants, voire exagérés, de la puissance en milieu d'épreuve.

Toutefois, d'éventuelles distorsions de la performance dues à la chaleur impliquent que l'exercice soit prolongé. Ainsi, l'étude du rapport durée-intensité montre que l'effet délétère de températures ambiantes élevées se réduit à mesure que la durée ou la distance à parcourir se raccourcit. Par exemple, un déficit de puissance significatif de 11 W relatif à la température ambiante (*i.e.* -3,8 % par rapport à la performance produite en ambiance tempérée) est constaté lors d'un contre-la-montre de 4 km d'une durée effective de 6 à 7 min (Altareki et al., 2009). Les mesures de T_{CO} ont révélé un état d'hyperthermie modérée chez les sujets en fin d'épreuve (*i.e.* en moyenne, 38,1 °C). La stratégie d'allure appliquée en ambiance chaude aurait ainsi pour but, passé les premiers kilomètres d'effort, de ralentir l'élévation de T_{CO} notamment par la réduction progressive de la production de chaleur métabolique (Marino et al., 2004).

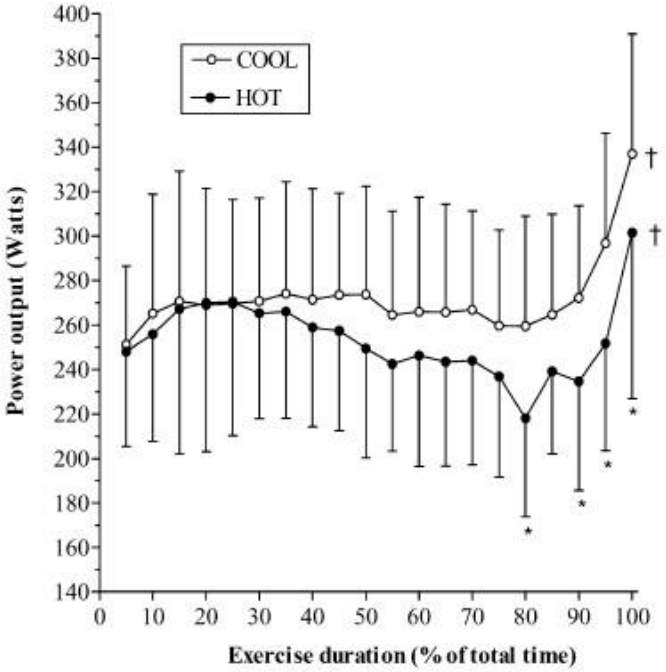


Fig. 16 Evolution moyenne de la puissance développée au cours d'un exercice de contre-la-montre sur ergcycle de 20 km reproduit en ambiance tempérée (20 °C ; COOL) et chaude (35 °C ; HOT) (issu de Tucker et al., 2004).

Enfin, il est à noter que tous ces résultats n'ont pu vérifier d'éventuelles corrélations entre amplitude de température (*i.e.* condition ambiante tempérée *vs.* chaude) et écart de performance. L'hétérogénéité des amplitudes thermiques entre les conditions appliquées lors des différents protocoles (*i.e.* de l'ordre de 9 à 24 °C) s'avère effectivement importante. D'autre part, l'altération de la performance semble significative à partir d'un seuil de température ambiante (*i.e.* supérieur à 32 °C) susceptible de générer un état de stress thermique dit « non compensable ». Pour rappel, le sujet est décrit dans cet état dès lors que i) la dissipation de chaleur engagée par les mécanismes autonomes de thermorégulation ne permet pas de compenser la production ou l'absorption de chaleur par le corps pendant l'exercice, et ii) l'hyperthermie corporelle est constatée. Ce phénomène est généralement associé, à court voire

très court terme, à une réduction significative de l'allure dans un but de limiter l'altération des réponses physiologiques. Pour confirmer ces propos, une étude comparative lors d'un exercice contre-la-montre de 40 kilomètres réalisé à des températures ambiantes de 22 °C, 27 °C et 32 °C montre un effet significatif de l'ambiance thermique sur la puissance moyenne développée à partir de 32 °C (*i.e.* 309 W en moyenne, contre 329 W en moyenne à 17 °C ; Peiffer et al., 2011). En d'autres termes, la dégradation de la performance relative à la chaleur devient significative dès lors qu'un écart de température suffisamment important peut être vérifié.

3.2. Mécanismes autonomes liés à la chaleur

3.2.1. Les échanges de chaleur

Le transfert de chaleur caractérise le déplacement d'une quantité d'énergie thermique d'un milieu vers un autre et dépend du gradient thermique entre les deux milieux concernés (*i.e.* la chaleur est transférée de l'élément le plus chaud vers l'élément le plus froid). Chez l'homme, ces transferts de chaleur s'effectuent *(i)* de l'homme vers l'environnement, on parle alors de transferts externes liés à la thermolyse ou à la dissipation de chaleur, et *(ii)* à l'intérieur du corps humain entre deux couches de tissus par exemple (*i.e.* transferts internes).

Quatre modes d'échanges de chaleur s'appliquent ici. La conduction s'effectue par contact entre deux solides sans déplacement de matière. La convection s'opère entre un solide (*e.g.* l'homme) et un fluide (*e.g.* l'air ambiant). La radiation est un mode d'échange de chaleur qui s'observe à partir d'ondes électromagnétiques entre deux corps sans vis-à-vis. Enfin, l'évaporation s'effectue par condensation de chaleur dans l'air sous forme de vapeur d'eau. La densité du flux thermique généré est proportionnelle au gradient de température entre les deux surfaces en contact (*i.e.* selon la loi de Fourier, 1807) pour la conduction ; au gradient de température entre le solide (*e.g.* température cutanée) et le fluide (*e.g.* température de l'air ambiant) pour la convection ; au différentiel entre les rayonnements émis (*e.g.* par la peau) et reçus en provenance du milieu extérieur (*e.g.* par le soleil) selon la loi dite de Stefan-Bolzmann (1879-1884) pour la radiation ; au gradient de pression partielle en vapeur d'eau entre la surface corporelle et l'air ambiant pour l'évaporation. Chez l'homme, en dehors du processus de sudation susceptible de s'activer lorsque la température ambiante est élevée (voir partie 3.2.2.), la perspiration (*i.e.* phénomène de diffusion passive de vapeur d'eau par les glandes sudorales) et l'expiration via les voies respiratoires d'un air chargé en eau (*i.e.* environ 8% de la quantité totale quotidienne de chaleur dissipée) sont les deux voies majeures d'évaporation de chaleur au repos.

Dans des conditions ambiantes tempérées (*i.e.* environ 20 °C et 50 % HR) et chez un homme nu au repos, 85 à 87% des échanges thermiques se font par l'intermédiaire de la peau soit 60% par rayonnement, 22-25% par évaporation, 12-15% par convection et 3% par conduction (Guyton and Hall, 2000). En situation d'exercice et/ou en ambiance chaude, les mécanismes « autonomes » (*i.e.* vasodilatation cutanée, sudation) et/ou l'adoption de comportements appropriés (*e.g.* diminuer l'allure de déplacement) permettent de compenser partiellement l'accélération du stockage de chaleur. Par exemple, la dissipation de chaleur par rayonnement est indirectement accélérée par l'augmentation du débit sanguin périphérique.

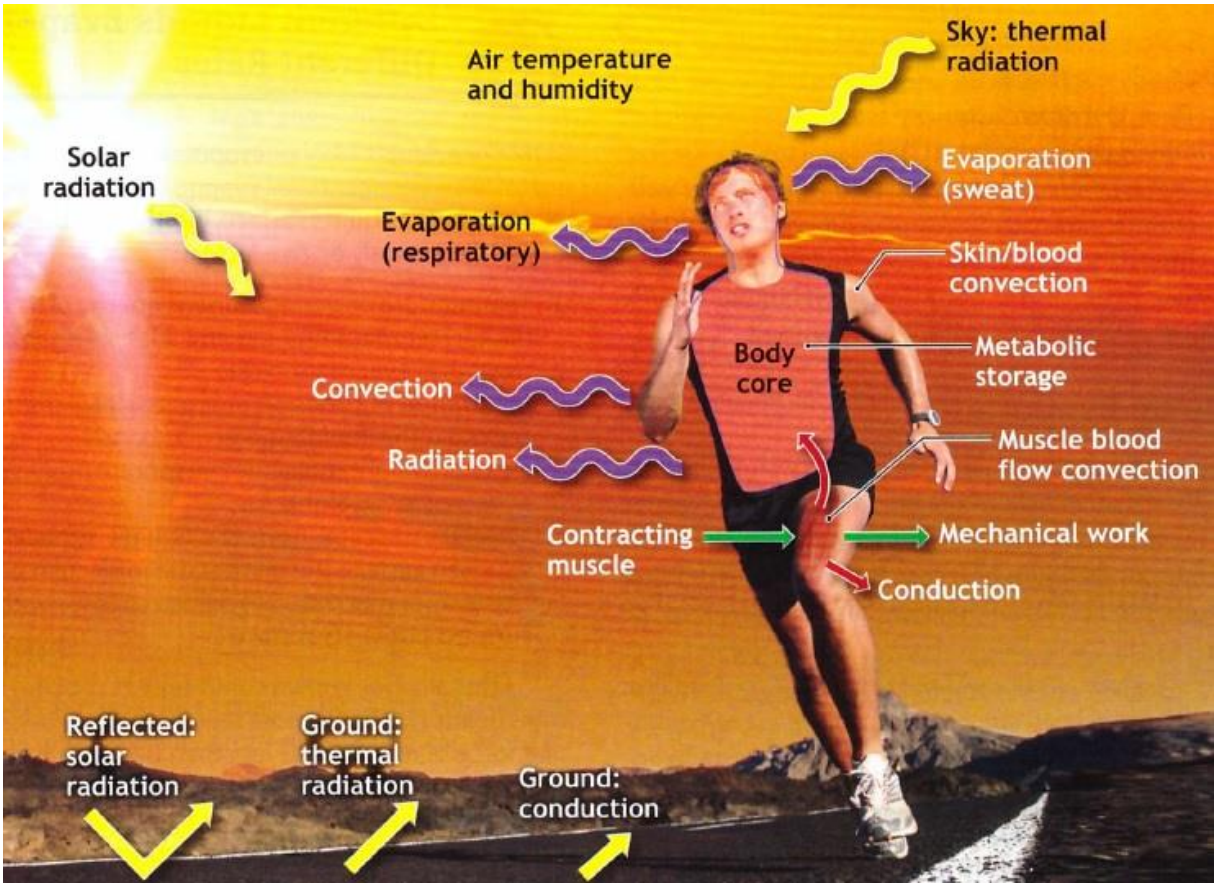


Fig. 17 Description des différences sources d'échange de chaleur entre l'homme et son environnement proche au cours de l'exercice (issu de Exercise Physiology : Nutrition, Energy and Human Performance, 8th Edition, W.D. McArdle et al., 2015).

Les conditions environnementales, le mouvement du sujet ou la tenue vestimentaire de ce dernier sont également à prendre en compte. Ainsi, les échanges par convection et par rayonnement sont sensiblement équivalents en environnement clos (*i.e.* gymnase, salle), alors que les échanges par conduction sont généralement négligés. Selon le mouvement, la dissipation de chaleur par convection sera réduite selon que le sujet reste statique ou se déplace

à vitesse lente. Concernant la tenue vestimentaire, le port de vêtements amples peut créer une accumulation d'air entre les différentes couches et générer une isolation « artificielle » entre la peau et l'environnement. De même, un textile dont la capacité d'absorption est importante (*e.g.* vêtements en coton léger) permet l'évaporation de la sueur et le maintien de la température cutanée. A l'inverse, des vêtements dits « non respirants » favorisent l'accumulation de sueur à la surface de la peau et l'obstruction des glandes sudorales. Enfin, les textiles de couleur foncée limitent l'absorption de chaleur par rayonnement.

Les échanges dans le milieu interne se font *i)* par conduction entre les différentes couches superposées de cellules des tissus corporels (*e.g.* des muscles profonds vers les muscles superficiels, puis de ces derniers vers la peau) afin de favoriser la vasodilatation cutanée et donc l'afflux sanguin, et *ii)* par convection entre les membres et le « noyau thermique » (*i.e.* organes profonds du corps humain) ou entre les membres eux-mêmes, par l'intermédiaire des flux sanguins. Outre l'importance de leur amplitude, le rôle des échanges internes de chaleur par convection est crucial dans le but de réguler la température corporelle. En effet, la circulation des flux sanguins participent à l'extension ou la réduction du noyau thermique selon les variations de sa propre température. En ambiance froide, la vasoconstriction des parties superficielles et distales du corps favorise le stockage de chaleur au niveau du tronc réduisant le noyau thermique. A l'inverse, lorsque le stockage augmente en ambiance chaude et/ou en situation d'exercice, la vasodilatation au niveau des membres et de la peau favorise l'extension du noyau vers le corps entier et par conséquent le ralentissement de l'élévation de T_{CO} (Aschoff and Wever, 1958).

3.2.2. Thermorégulation autonome de l'organisme

Les échanges de chaleur au niveau de la peau et des muscles respiratoires se font de manière passive (*e.g.* perspiration) ou active (*e.g.* vasodilatation cutanée, sudation). Lors de l'exposition à des températures chaudes et/ou en situation d'exercice, le déclenchement des mécanismes dits « actifs » ou « autonomes » a pour but de réguler et prévenir l'élévation de la température au-delà des limites de normothermie (*i.e.* entre 37 et 38 °C).

L'élévation de la perfusion sanguine périphérique qui résulte de la vasodilatation des vaisseaux et capillaires cutanés augmente la conductivité thermique de la peau et favorise le transfert de chaleur par convection et rayonnement. Le débit sanguin cutané est de 250 à 500 $ml.min^{-1}$ au repos et peut atteindre des valeurs dépassant 7 $l.min^{-1}$ (*i.e.* 15 à 25 % du débit cardiaque total) au cours d'un exercice supramaximal (Hardy et al., 1938).

Si les mécanismes sous-jacents de la régulation du tonus vasomoteur ne sont pas totalement identifiés, la régulation du tonus vasomoteur semble pilotée par un ensemble de stimulation d'origine cholinergique (Charkoudian, 2010). D'autres mécanismes autonomes spécifiques thermiques et non-thermiques influencent cette régulation, par exemple l'élévation de la concentration en ATP plasmatique (Kalsi and González-Alonso, 2012). Au repos, l'exposition locale à une source de chaleur induit une élévation du flux sanguin périphérique cutané (Pearson et al., 2011) alors que la réponse des mécanismes vasomoteurs locaux est atténuée au niveau de la zone exposée (Takahashi et al., 2011). A l'échelle du corps entier (voir partie 3.3.2. pour plus de détails), la même exposition génère des adaptations cardiovasculaires spécifiques telles qu'une diminution du retour veineux et du volume d'éjection systolique (Wilson and Crandall, 2011).

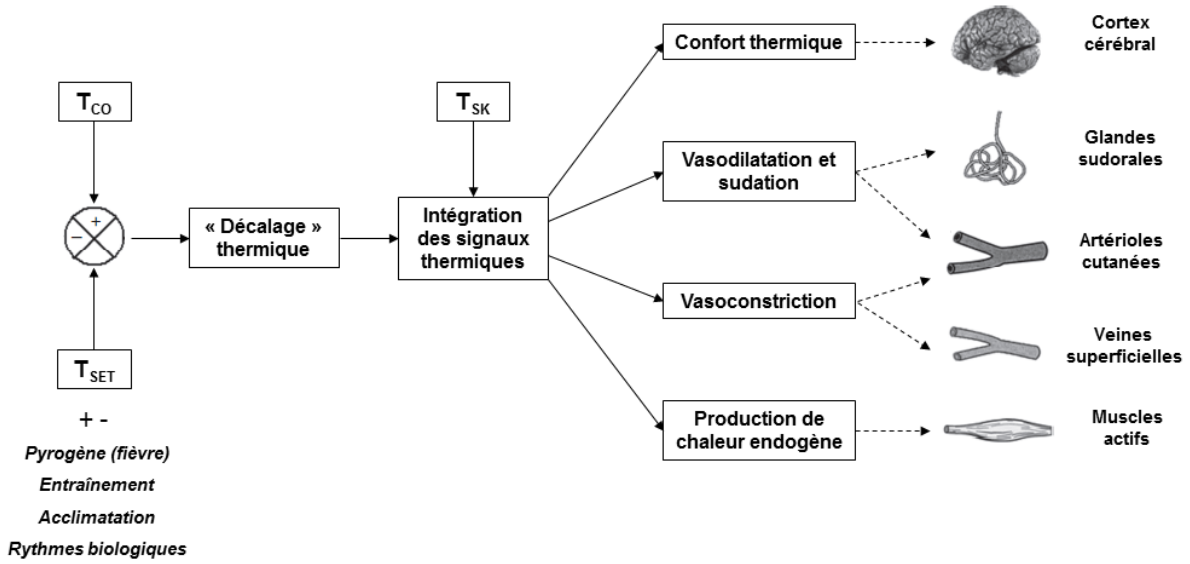


Fig. 18 Diagramme schématique représentant le fonctionnement des mécanismes autonomes de thermorégulation. T_{SET} = seuil thermique de déclenchement ; T_{CO} = température centrale ; T_{SK} = température cutanée (Issu de Sawka and Young, 2006).

Au cours de l'exercice à faible intensité, l'ambiance thermique et la température cutanée vont principalement influencer les réponses hémodynamiques cutanées. La thermorégulation prédomine après quelques minutes sur les réflexes vasoconstricteurs sympathiques activés dès le début de l'exercice dans le but de rediriger les flux sanguins cutanés, rénaux et splanchniques vers les muscles sollicités (Kellogg et al., 1990). A l'inverse, lors d'un exercice à haute intensité, l'exercice décale le seuil de T_{CO} à partir duquel la vasodilatation cutanée est activée (Kellogg et al., 1990). Dans ce contexte, la voie évaporatoire prend également le relais au profit de la voie convective (pour revue : voir Shibasaki and Crandall, 2010). Par exemple, l'ischémie

résultant d'une action musculaire intense est susceptible de « potentialiser » la réponse sudorale (Kacin et al., 2005).

A propos de la sudation, la prépondérance des échanges de chaleur par évaporation au cours de l'exercice (*voir partie 3.2.1.*) témoigne du rôle-clé alors joué par ce mécanisme autonome. De même que pour le tonus vasomoteur, la sécrétion de sueur est déclenchée lors de l'atteinte d'un seuil de T_{CO} potentiellement ajusté en fonction de la variation de la température cutanée (Nadel et al., 1971). L'activation, en réponse, des glandes sudorales précède la sécrétion d'une solution saline hypotonique (*i.e.* 0,2 à 0,4 % de chlorure de sodium ou NaCl) dont le débit augmente progressivement. Le débit sudoral lors de l'exercice peut alors atteindre jusqu'à 30 $ml.min^{-1}$ pour une dissipation de chaleur de l'ordre de 18 $kcal.min^{-1}$, ce qui représente une dissipation de chaleur d'environ 580 kcal pour un litre d'eau éliminé. Il est à noter que la mise en action de ces glandes n'est ni simultanée ni uniforme sur l'ensemble de la surface du corps. D'un point de vue spatial, le front est d'abord concerné, suivi dans l'ordre des bras, des mains, des cuisses, des pieds, du dos et de l'abdomen. De manière générale, l'évaporation de sueur permet indirectement, par le refroidissement cutané, d'élever l'amplitude du flux de dissipation de la chaleur transportée par la masse sanguine périphérique vers l'environnement et d'augmenter ainsi leur capacité d'absorption de chaleur à leur retour dans les voies circulatoires internes. D'autre part, l'élévation du gradient de température entre les centres corporels et la peau participe à réduire la perfusion sanguine au niveau cutané (Kenney et al., 2014).

En dehors des variations de T_{CO}, de multiples signaux sensoriels non-thermiques tels que la stimulation des récepteurs musculaires, elle-même sous-jacente à l'intensité de l'exercice, sont susceptibles d'influencer les réponses sudorales pendant l'exercice (Van Beaumont and Bullard, 1966). D'autre part, la capacité autonome de régulation de la température corporelle est limitée par des facteurs d'origine physiologique. Ainsi, la densité et la distribution des glandes sudorales ne sont identiques ni à l'échelle du corps entier, ni d'un individu à un autre (Kuno, 1956). L'âge contribue également à l'altération progressive des fonctions vasomotrices et sudorales (Kenney and Munce, 2003). Du point de vue anthropométrique, la masse et la composition corporelle influencent directement la production et le stockage de chaleur pendant l'exercice (pour revue : Cramer and Jay, 2016). Par exemple, la couche adipeuse sous-cutanée modifie, par son caractère isolant, la capacité de dissipation de chaleur du fait de la moindre conductivité thermique de la graisse par rapport aux tissus musculaires (*i.e.* 2,5 $J.g^{-1}.°C^{-1}$ *vs.* 3,6 $J.g^{-1}.°C^{-1}$; Stolwijk, 1971).

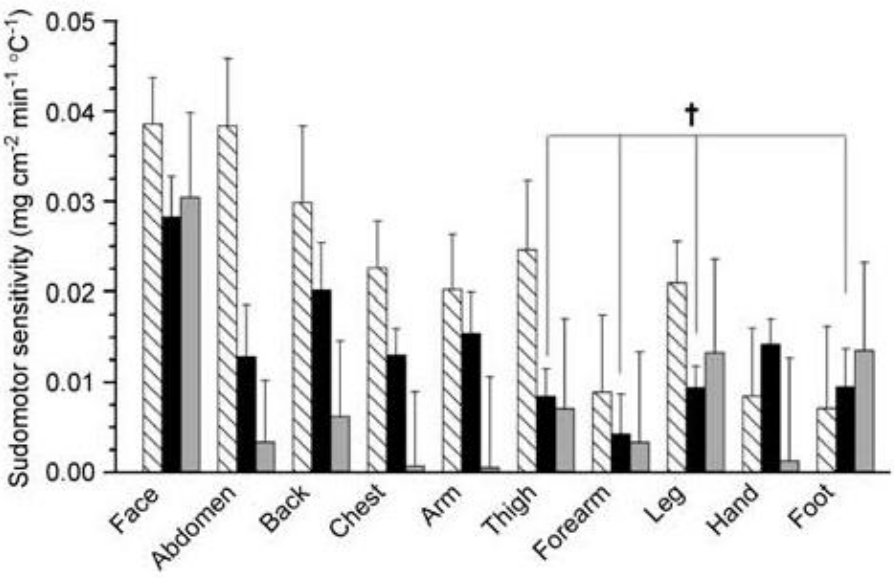


Fig. 19 Expression de la sensibilité locale de l'activité sudomotrice à des variations transitoires et artificielles de la température cutanée : élévation de 4 °C (barres hachurées) ; diminution de 4 °C (barres grises) ; diminution de 11 °C (barres noires). La sensibilité sudomotrice est exprimée ici par la variation du débit sudoral en réponse à l'exposition thermique (issu de Cotter and Taylor, 2005).

La capacité de dissipation est également plus importante, à même masse corporelle égale, pour une surface corporelle plus étendue. Enfin, la dissipation de chaleur par voie évaporatoire est d'autant moins efficace que le taux d'humidité est élevé et/ou que l'ambiance thermique est chaude. En effet, la pression de vapeur d'eau exercée va favoriser l'accumulation d'eau et de minéraux autour de l'ouverture des glandes sudorales (Candas et al., 1980).

3.2.3. Mécanismes neurophysiologiques de la thermorégulation

La capacité de l'homme à réguler de manière fine sa propre température corporelle a contribué à la survie puis au développement de son espèce y compris dans des milieux environnementaux hostiles. D'un point de vue anatomique, cette aptitude à préserver, par voie consciente et subconsciente, un état stable de la température corporelle est le fait d'un système complexe composé de multiples récepteurs sensibles et interconnectés au cerveau.

Les thermorécepteurs périphériques, répartis sur la totalité de la surface du corps mais aussi dans l'œsophage, les viscères abdominaux ou encore les veines de diamètre important, sont sensibles à des variations de température locale de l'ordre de 0,01 °C. Parmi les différents types de thermorécepteurs cutanés, ceux sensibles au chaud se situent entre 0,3 et 0,6 mm de profondeur à l'intérieur du derme, contre 0,15 à 0,17 mm de profondeur pour ceux sensibles au froid (Bazett and McGlone, 1930). Le visage est l'une des zones corporelles les plus influentes

en raison de la densité importante de récepteurs thermosensibles (*i.e.* de 5,5 à 19 par cm² et de 1 à 1,7 par cm² au froid et au chaud respectivement ; Hensel, 1982). D'un point de vue anatomique, les thermorécepteurs cutanés prennent la forme de terminaisons nerveuses encapsulées (*i.e.* fibres non-myélinisées C). Les canaux dits « récepteurs à potentiel transitoire » ou TRP présents dans ces récepteurs ont pour rôle de capter, parmi d'autres signaux physiologiques, le stimulus thermique cutané (Vassort and Fauconnier, 2008). Les canaux TRPV dits Vanilloïde (TRPV 1-3), sensibles à des composés chimiques tels que la capsaïcine (*i.e.* élément actif du piment), sont particulièrement suivis alors que les canaux TRPM dits Mélastatine (TRPM-2, TRPM-4 et TRPM-5) jouent un rôle-clé lorsque la température cutanée locale se situe entre 32 et 42°C (Togashi et al., 2006).

Les informations sensorielles issues, entre autres, des thermorécepteurs cutanés sont intégrées à différents niveaux de l'axe neuronal. La littérature récente décrit ainsi l'existence de deux circuits thermo-afférents distincts, l'un pour le contrôle de l'homéostasie et l'autre pour la discrimination sensorielle de l'environnement thermique (pour revue : Filingeri, 2016)). Le circuit neuronal dit « spino-réticulo-hypothalamique » intervient sur la régulation de la température corporelle par l'activation des mécanismes autonomes de thermorégulation via l'aire pré-optique de l'hypothalamus (pour revue : Romanovsky, 2006). La régulation de T_{CO} dépend de l'action coordonnée des aires pré-optiques antérieure et postérieure, qui interviennent respectivement sur la dissipation et sur la production de chaleur (*i.e.* en réponse à un refroidissement corporel significatif). La transcription des signaux nerveux sensoriels issus des thermorécepteurs périphériques et centraux (*i.e.* sensibles aux variations de la température cérébrale) régule le déclenchement de la vasodilatation cutanée et/ou de la sudation par l'aire pré-optique antérieure de l'hypothalamus. Le signal efférent alors généré est ensuite envoyé vers les ganglions sympathiques dans la partie intermédiolatérale de la colonne vertébrale, via les noyaux dorso-médial et para-ventriculaire de l'hypothalamus puis, au niveau médullaire, via les noyaux du raphé. En fin de circuit, les fibres C non-myélinisées postganglionnaires innervent les glandes sudorales et les vaisseaux sanguins périphériques.

Le circuit spino-thalamo-cortical intervient quant à lui dans la discrimination de la sensation thermique et, indirectement, dans la construction des comportements face à une forte contrainte environnementale (pour revue : Filingeri, 2016). Contrairement à la thermorégulation autonome, les récepteurs périphériques cutanés constituent le principal émetteur sensoriel afférent pour la thermorégulation consciente (voir partie 3.3.6).

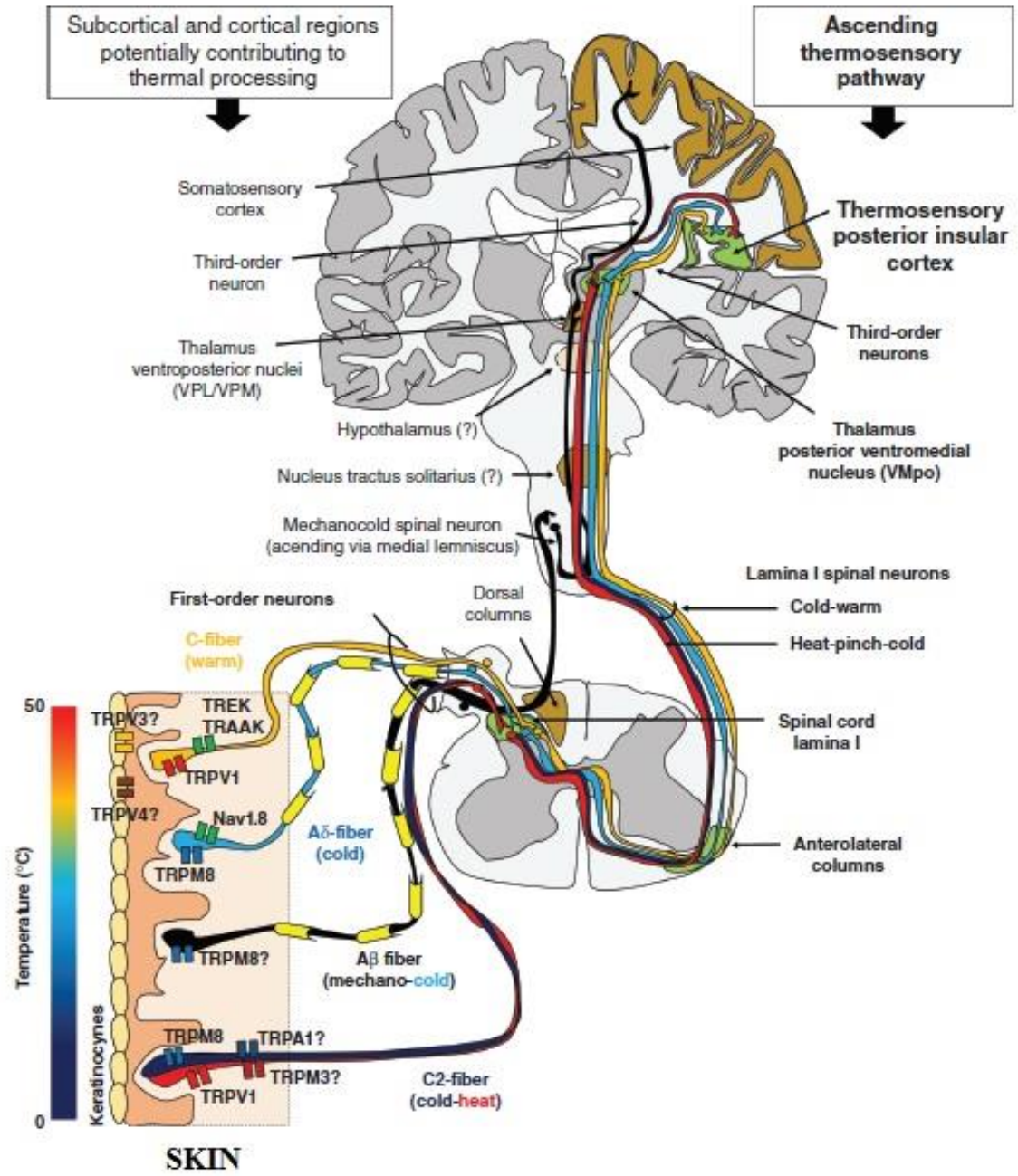


Fig. 20 Représentation schématique des circuits neurophysiologiques complets à l'origine de la sensation thermique (issu de Filingeri et al., 2016).

Les informations sensorielles issues des récepteurs thermosensibles cutanés se projettent d'abord vers des neurones situés dans la lame dite « lamina I », soit dans la partie dorsale de la moelle épinière (Craig et al., 2001). Ces neurones centralisent une partie importante des informations d'origine thermique et nociceptives susceptibles d'être dirigées vers le tronc cérébral, via le faisceau spinothalamique et les noyaux ventromédians de l'hypothalamus (Craig and Dostrosky, 2001). Au niveau cortical, la bordure dorsale de l'aire postérieure du cortex insulaire constitue la zone spécifique aux processus cérébraux de discrimination thermique, et

aux réponses affectives sous-jacente (Dostrovsky and Craig, 1996). La corrélation observée entre l'intensité du stimulus thermique d'origine cutanée et l'activité des neurones de l'aire postérieure du cortex insulaire justifie pleinement l'attribution d'un rôle-clé à cette zone cérébrale dans la thermorégulation volontaire du corps (Craig et al., 2000).

La construction des réponses sensorielles et affectives à la chaleur semble également dépendre d'interactions avec d'autres zones cérébrales, telles que les aires primaires et secondaires du cortex somatosensoriel, le gyrus cingulaire postérieur et le cortex cingulaire antérieur (Becerra et al., 1999 ; Damasio and Carvalho, 2013). Une coordination de type antagoniste avec certaines aires subcorticales du système limbique, en particulier les noyaux du tractus solitaire et parabrachial, participe également à la structuration complexe des expériences thermosensorielles chez l'homme (Craig, 2009).

3.3. Adaptations psychophysiologiques à l'hyperthermie

3.3.1. Généralités

De multiples phénomènes d'origine physiologique sont à l'origine de la diminution de la performance physique inhérente à l'élévation de la température corporelle (pour revue : Nybo et al., 2014). Les réponses homéostatiques sous-jacentes à la chaleur résultent, directement ou indirectement, des variations respectives des températures cutanées, musculaires et centrales. Dans un passé récent, l'élévation de T_{CO} a été considérée comme le facteur majeur à l'origine de la baisse des performances (Nybo and Nielsen, 2001a). Le concept de « seuil critique » de T_{CO} a été alors proposé, à partir d'observations réalisées chez certains mammifères, pour expliquer l'interruption prématurée d'un exercice à intensité fixe en ambiance chaude (Caputa et al., 1986),. Ce seuil, généralement défini autour de 40 °C, se traduirait pour le sujet par un début d'incapacité à maintenir une production individuellement usuelle de force musculaire maximale (Nielsen et al., 1993 ; Gonzalez-Alonso et al., 1999). Ce mécanisme est alors défini comme un levier de « neuroprotection » permettant d'éviter, par régulation subconsciente de l'activité métabolique, l'occurrence d'une hyperthermie sévère aux effets particulièrement délétères pour le système nerveux central (Nybo and Secher, 2004).

Ce concept a été depuis remis en cause par de multiples études. En particulier, les travaux de Brett R. Ely (2010) ont démontré que la performance lors d'un exercice de course à pied de 8 kilomètres à libre allure n'est pas systématiquement dégradée lorsque les sujets (*i.e.* 12 parmi les 24 sujets inclus) atteignent ou dépassent des valeurs de T_{CO} proches de 40 °C. De

plus, la plupart des sujets a été en mesure d'accélérer au cours des 600 derniers mètres de l'épreuve en dépit de températures centrales comprises entre 39,4 et 40,9 °C.

Ces résultats suggèrent donc que la régulation de la performance au cours d'une épreuve à libre allure n'est pas le résultat d'un seul mécanisme de « neuroprotection » mais d'un phénomène plus complexe imbriquant, de manière plus ou moins coordonnée, plusieurs sous-systèmes physiologiques et psychologiques (Nybo et al., 2014).

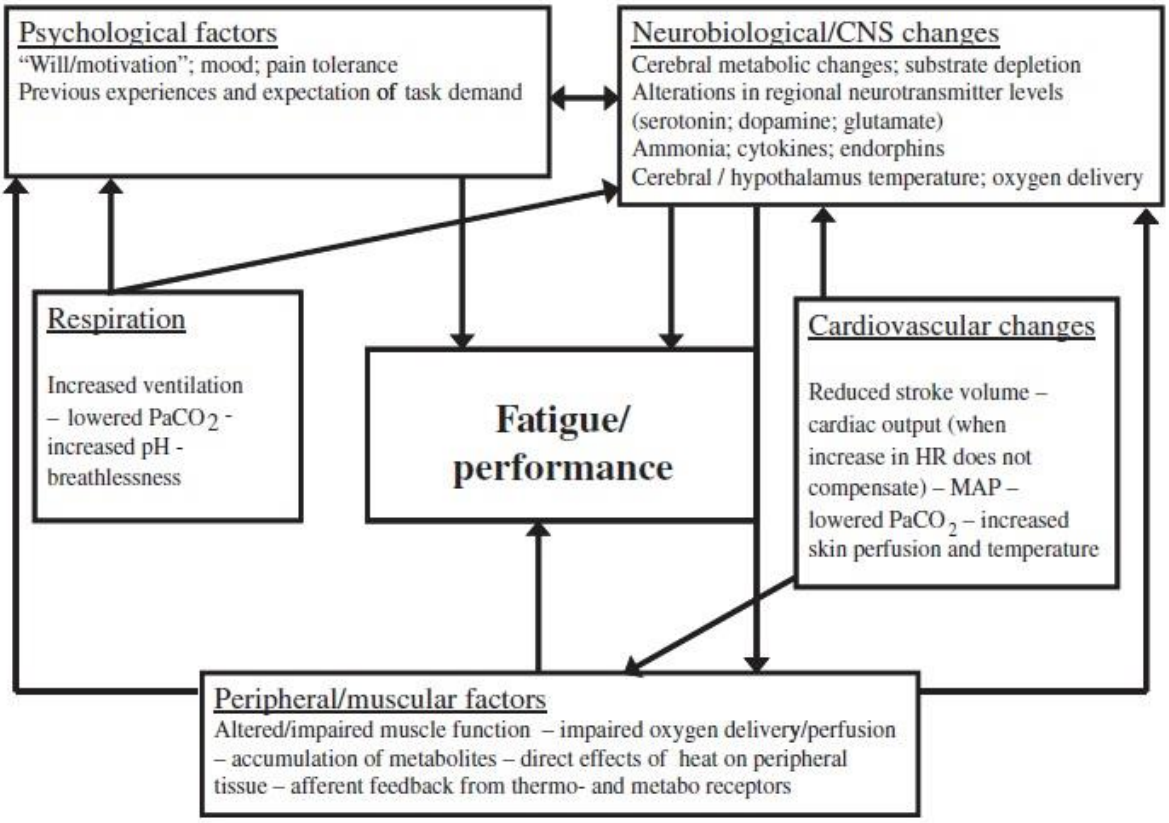


Fig. 21 Représentation schématique du processus complexe associé à la regulation de la fatigue et de la performance en ambiance chaude, integrant les fonctions cardiovasculaires, respiratoires, nerveuses et périphériques (issu de Nybo et al. 2014).

L'élévation de la température corporelle « challenge » ainsi de manière significative les fonctions cardiorespiratoires, énergétiques et perceptives de l'organisme avec pour effet, entre autres, une distorsion de la difficulté subjective et perçue de l'effort produit (Crewe et al., 2008). Nous avons vu précédemment que ce paramètre joue un rôle clé dans la régulation de l'intensité au cours de l'exercice à libre allure (voir partie 1.4.). L'optimisation de la performance physique en ambiance chaude passe donc par la compréhension des mécanismes sous-jacents à la distorsion de la difficulté subjective au cours du temps. Parmi les fonctions « challengées » par la chaleur, nous verrons d'une part que les adaptations neuromusculaires directement ou indirectement relatives à l'hyperthermie corporelle ne sont pas systématiquement engagées dans la réduction de la performance à libre allure.

Nous nous attarderons d'autre part sur le rôle de la perception thermique. Son importance semble considérée dans la plupart des modèles théorisant la régulation de l'allure, en particulier le modèle dit psychobiologique (voir partie 1.4.4.). Selon ce postulat, l'inconfort thermique pendant l'exercice serait à l'origine du désengagement progressif de l'individu (Cotter et al., 2001). En d'autres termes, l'inconfort thermique ne serait pas la cause de l'éventuelle distorsion de la perception de l'effort, mais plutôt d'une moindre tolérance émotionnelle à des efforts subjectivement considérés comme « difficiles ». Toutefois, de larges zones d'ombre subsistent en ce qui concerne son influence réelle sur la perception de l'effort et la prise de décisions pendant l'exercice (Flouris and Schlader, 2015).

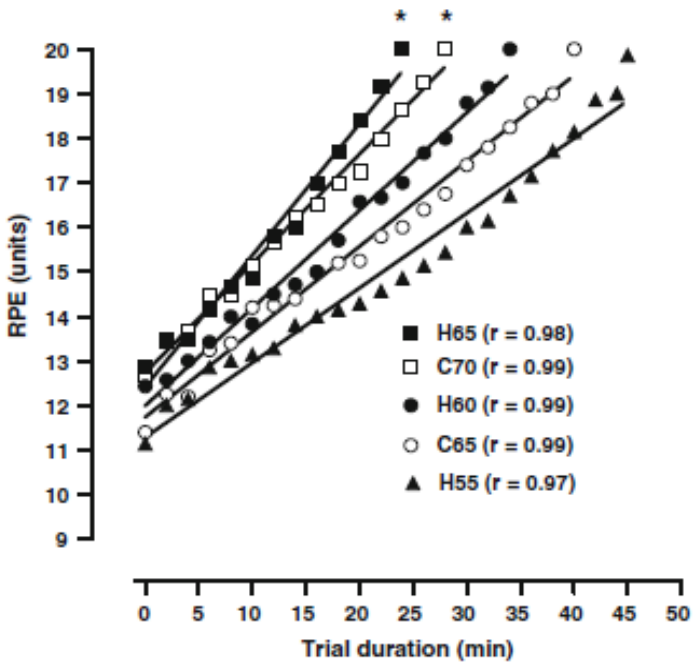


Fig. 22 Evolution moyenne de la perception de l'effort (RPE) sur la durée d'un exercice à intensité fixe (*i.e.* entre 55 et 70 %PMA) reproduit en ambiance tempérée (15 °C ; C) ou chaude (35 °C ; H) (Issu de Crewe et al., 2008).

3.3.2. Adaptations cardio-vasculaires et hémodynamiques

Face à l'élévation de la température ambiante, l'activation des mécanismes autonomes de thermorégulation, et en particulier la vasodilatation des vaisseaux cutanés, contribue largement à modifier la répartition des flux sanguins à travers le corps. Or, les impacts de ce phénomène concernent directement les réponses cardiovasculaires et à plus forte raison pendant l'exercice. Nous avons préalablement vu que, lors d'une exposition du corps entier à la chaleur, la diminution sous-jacente du retour veineux précédait une baisse significative du volume d'éjection systolique (voir partie 3.2.2.). En effet, la plus grande compliance du réseau veineux et l'allongement du délai de transit du sang dans le circuit vasculaire périphérique (*i.e.* en raison de la plus grande quantité de sang circulant alors par ce réseau) contribue à la diminution du remplissage diastolique (Rowell et al., 1971). La conséquence de la baisse du volume d'éjection systolique est l'élévation compensatoire de la fréquence cardiaque nécessaire au maintien d'un

débit optimal : est alors décrit le phénomène dit de « stress cardiovasculaire » (pour revue : Sawka et al., 2011).

Le « stress cardiovasculaire » est donc le résultat d'altérations cardiaques et vasculaires. La première hypothèse considère que le moindre étirement des fibres du myocarde sous-jacent à la diminution du remplissage ventriculaire entraînerait, selon le mécanisme dit de Frank-Starling, une accélération compensatoire de FC (Warburton et al., 2002). Toutefois, plusieurs éléments sont susceptibles de remettre en cause cette version. Entre autres, les variations de la perfusion sanguine cutanée et du volume d'éjection systolique ne sont pas concomitantes d'un point de vue temporel. Lors d'un exercice sous-maximal en ambiance chaude, la première citée tend à se stabiliser en parallèle de T_{CO} (*i.e.* après 20-30 min ; Johnson and Rowell, 1975), alors que le volume d'éjection systolique poursuivrait sa diminution. La seconde hypothèse alternative suppose une possible sur-activation du système nerveux sympathique pour expliquer l'élévation de FC. En d'autres termes, l'activation sympathique initiée par l'élévation de T_{CO} impliquerait, par la variation concomitante de FC, une réduction du temps de contraction ventriculaire à l'origine de la diminution du volume d'éjection systolique (Coyle and Gonzales-Alonso, 2001). Cette hypothèse s'appuie sur une étude ayant démontré un ralentissement de l'élévation de FC indépendant des réponses du débit sanguin cutané à la suite de l'administration de bêtabloquants avant l'exécution d'un exercice fixe de 60 min à 57 % de $\dot{V}O2_{max}$ (Fritzsche et al., 1999). Si ce constat remet en cause le lien supposé entre réponses hémodynamiques périphériques et stress cardiovasculaire, pour autant il ne serait valable que lorsque la pression diastolique ne peut pas s'adapter voire diminue, par exemple lors d'un exercice à haute intensité (González-Alonso et al., 2000). Or, la baisse du volume d'éjection systolique observée chez le sujet en hyperthermie semble être la résultante de ces deux hypothèses. Le rôle éventuel de chacun de ces mécanismes dépendrait alors, en grande partie, du seuil d'intensité soutenue pendant l'exercice (Nybo et al., 2014).

L'exercice physique amplifie le phénomène de « stress cardiovasculaire » que l'on peut observer au repos. En effet, le maintien cumulé d'une perfusion optimale des muscles sollicités pendant l'effort et des vaisseaux sanguins cutanés, tous deux nécessaires à la régulation métabolique et thermique de l'organisme, constitue un réel challenge pour le système cardiovasculaire. De plus, la difficulté de ce challenge est accentuée par l'augmentation transitoire de la pression artérielle et la diminution sous-jacente du volume plasmatique. Celle-ci est notamment affectée par la posture adoptée lors de l'exercice, de l'ordre de 7,1 % en position assise contre 2,7 % en position debout (Diaz et al., 1979). S'ajoute à cela, lorsque l'exercice est exécuté en ambiance chaude, la prépondérance de la dissipation de chaleur par

voie sudorale et l'impact des pertes hydriques sous-jacentes qui provoquent alors une hémoconcentration plus marquée. Par conséquent, lors de la production d'une intensité sous-maximale, l'amplitude de la dérive de FC s'élève à mesure que la température ambiante est plus chaude (Cheuvront et al., 2010). Lors de la production d'intensités très élevées ou d'élévations incontrôlées de T_{CO} (*i.e.* le stress thermique est alors décrit comme « non compensable »), le système cardiovasculaire peine même à assumer pleinement une perfusion optimale des muscles et de la peau et expose l'organisme à une chute de la pression artérielle. Or un tel phénomène serait l'une des causes des syncopes ou intolérances orthostatiques avec arrêt immédiat de l'exercice que l'on observe plus fréquemment en condition de chaleur (Kenefick and Sawka, 2007). Plusieurs mécanismes autonomes ou actions volontaires limitent néanmoins la baisse du volume plasmatique et ses effets délétères pendant l'exercice. Tout d'abord, la perfusion sanguine périphérique est réduite par le biais d'un « reset » de l'activité des barorécepteurs alors déclenché par l'hypothalamus (Edholm et al., 1956) qui génère, en réponse, une vasoconstriction des vaisseaux cutanés (Taylor et al., 1988). Bien que ce phénomène n'implique aucun effet délétère immédiat sur la performance, l'élévation plus rapide de T_{CO} devrait néanmoins conduire l'athlète à interrompre plus rapidement l'exercice, selon que ce dernier se prolonge ou non, du fait d'une hyperthermie excessive. Ensuite, le système endocrinien participe au contrôle des flux liquidiens. La rénine secrétée par les cellules du rein en réponse à la chute locale de pression artérielle entraîne, par l'intermédiaire de plusieurs actions, l'augmentation des résistances périphériques et la sécrétion d'aldostérone par le cortex surrénal. L'aldostérone, de même que l'hormone antidiurétique (ADH) libérée par l'hypothalamus en réponse aux variations de la pression osmotique, participent ensuite à la rétention voire à la réabsorption d'eau et permettent ainsi le maintien du volume plasmatique. Enfin, le maintien des réserves hydriques par une consommation d'eau régulière pendant l'exercice participe à la stabilisation des réponses hémodynamiques pendant l'exercice. Ainsi lors d'un exercice à faible intensité (< 50 %VO_{2max}), le volume plasmatique des sujets euhydratés a pu augmenter en moyenne de 4 %, tandis qu'une diminution de 4 % a été observée chez les sujets hypohydratés (Sawka et al., 1984). L'absorption de boissons isotoniques (*i.e.* boissons contenant la quantité approximative de glucides, d'eau et de sodium que contient le sang) serait à privilégier dans le but d'augmenter le volume sanguin pendant l'exercice tout en maintenant une pression osmotique équivalente (Candas et al., 1986). En conclusion, l'ensemble des mécanismes autonomes et actions préalablement cités contribue à limiter l'amplitude du stress cardiovasculaire au cours de l'exercice en ambiance chaude.

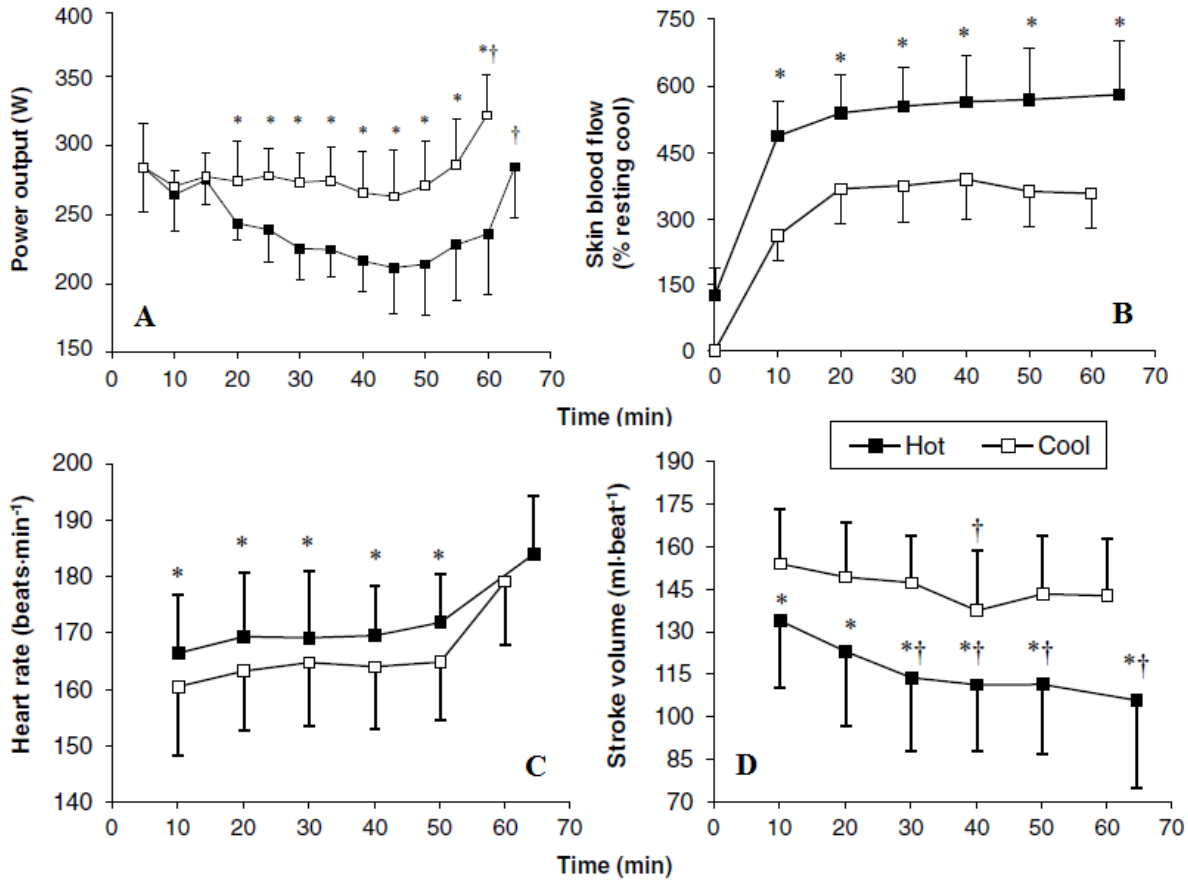


Fig. 23 Evolution moyenne respective de la puissance développée (A), de la perfusion sanguine cutanée (B), de FC (C) et du volume d'éjection systolique (D) relevés au cours d'un exercice à libre allure de 40 km reproduit en ambiance tempérée (20 °C ; COOL) et chaude (35 °C ; HOT) (Issu de Périard et al., 2011a).

Du point de vue de la performance physique, la principale conséquence du stress cardiovasculaire est la diminution du potentiel aérobie maximal de l'athlète. Ainsi, la puissance maximale aérobie atteinte lors d'une épreuve triangulaire serait affectée en moyenne de 4 à 18 %, et dans des proportions plus importantes à mesure que la température ambiante s'élève (*i.e.* -4 % à 35 °C *vs.* -18 % à 45 °C ; Arngrimsson et al., 2004). Au cours de l'exercice sous-maximal à libre allure, l'athlète soutient une intensité relative (*i.e.* pourcentage de VO_{2max}) plus importante à même allure. Les données recueillies au cours d'une épreuve simulée de contre-la-montre cycliste reproduite à 20 °C (*i.e.* puissance moyenne 280 W) et à 35 °C (*i.e.* puissance moyenne 242 W) montrent, en ambiance chaude, des valeurs plus basses de volume d'éjection systolique et concomitantes à des valeurs de FC plus élevées ainsi qu'une distorsion de RPE (Périard et al., 2011). Les corrélations entre diminutions respectives de la puissance et du volume d'éjection systolique (r^2 = 0,99) confirment ainsi l'effet délétère du stress cardiovasculaire sur la performance lors d'une telle épreuve. Les auteurs retiennent pour

explication l'élévation importante de la température cutanée pendant l'effort, plutôt que celle de T_{CO}. En effet, la diminution du gradient entre valeurs de température cutanée et centrale affecte la perfusion sanguine périphérique (Cheuvront et al., 2010) et limite le potentiel de performance aérobie du sujet (Cuddy et al., 2014)

Si la performance lors d'une épreuve à libre allure est significativement affectée par les contraintes hémodynamiques et cardiovasculaires relatives à l'exercice en ambiance chaude, un autre facteur susceptible d'affecter la performance relève des perturbations subies par le système gastro-intestinal, en particulier lors d'épreuves de longue durée. Nous avons vu précédemment (*voir partie 3.2.2.*) que l'activation sympathique initiée en début d'exercice favorise la vasoconstriction des vaisseaux irriguant les tissus rénaux et splanchniques, dans le but de rediriger les flux sanguins vers les muscles actifs. Alors que le débit sanguin splanchnique représente au repos près de 20 % du débit cardiaque, l'exercice musculaire entraîne sa diminution d'environ 80 % (Rowell, 1974). Or, la réduction drastique de la perfusion sanguine des tissus intestinaux peut affecter l'efficacité de la barrière épithéliale intestinale. En d'autres termes, le stress oxydatif et métabolique sous-jacent à la moindre oxydation de ces tissus constitue le point de départ d'un endommagement notable des tissus intestinaux et provoquer une hyperperméabilité intestinale (Hall et al., 2001). La conséquence de ce phénomène est l'apparition de réponses inflammatoires systémiques. Par exemple, la pénétration de bactéries à Gram négative dans la circulation sanguine et la libération d'endotoxines qui en résulte peuvent induire, entre autres, l'activation des leucocytes (*i.e.* neutrophiles, lymphocytes, granulocytes, monocytes) ou encore la libération de cytokines (*i.e.* interleukine-6) dans le milieu sanguin (Selkirk et al., 2008). L'hyperperméabilité intestinale est également liée à des complications qui apparaissent sous de multiples formes chez l'athlète lors d'épreuves d'endurance prolongées : douleurs et contractions, diarrhées, hémorragies intestinales, nausées (Gisolfi, 2000). Celles-ci entraînent notamment une altération significative de l'inconfort intestinal, préalable à une dégradation des réponses émotionnelles et motivationnelles à l'exercice. Concernant à présent le rôle de la condition ambiante, tous ces dysfonctionnements relatifs à l'exercice voient leurs effets amplifiés par l'élévation, même modérée, de T_{CO} ou encore la déshydratation, dans le cas d'un renouvellement insuffisant des réserves hydriques. Ainsi, des valeurs comprises entre 38,2 et 39,6 °C sont concomitantes à l'élévation, chez des sujets euhydratés, de la perméabilité intestinale lors d'un exercice d'une intensité de 70 %VO2max (Dokladny et al., 2016). Dans ce contexte, les réponses inflammatoires sous-jacentes pourraient notamment dans des cas extrêmes favoriser l'apparition de syndromes relatifs aux coups de chaleur (Sawka et al., 2011).

3.3.3. Adaptations métaboliques

Les contraintes physiologiques inhérentes à l'exercice prolongé en ambiance chaude modifient l'utilisation des substrats énergétiques pour la resynthèse de l'ATP (pour revue : Febbraio, 2001). Par exemple, Fink et ses collaborateurs (1975) ont mis en évidence l'augmentation du rôle de la phosphocréatine (PCr) et de l'activité glycolytique dans la resynthèse de l'ATP, au détriment de la voie lipidique, lors de la production d'un exercice sous-maximal réalisé à 41 °C. De même, l'élévation du quotient respiratoire suggère que la chaleur induit une plus grande exploitation des réserves de glycogène par voie aérobie ou anaérobie (Gonzales-Alonso et al., 1999). Dans ce contexte, la plus faible entropie de la voie glycolytique présente un réel intérêt face à la nécessité de limiter la déplétion d'ATP intramusculaire et la production de chaleur endogène (Krustrup et al., 2003).

Néanmoins, l'hypothèse d'une action du stress thermique sur la glycogénolyse pendant l'exercice est en partie controversée (Young et al., 1995). En effet, si l'accumulation de lactates et l'augmentation de la glycémie sont proportionnelles pour une même activité métabolique à l'élévation de la température ambiante, une utilisation en quantité supérieure du glycogène intramusculaire n'a pas été pour autant observée. La glycogénolyse hépatique et la néoglucogenèse via le recyclage du lactate, de l'alanine ou du glycérol seraient alors en mesure de contribuer, en lieu et place, aux besoins énergétiques lors d'un exercice en ambiance chaude (Febbraio et al., 1996). De manière plus générale, de multiples facteurs d'origine thermique ou non-thermique sont à prendre en compte. Nous pouvons ainsi citer, parmi les facteurs non-thermiques, les réserves glycogéniques initiales de chaque sujet ou encore l'intensité d'exercice soutenue. Ainsi lors d'un exercice maximal, l'absence de sensibilité de la glycogénolyse à la condition ambiante s'expliquerait notamment par l'influence modérée du stress thermique sur les réponses métaboliques à très haute intensité (Maxwell et al., 1999). Lors d'un exercice prolongé, la stimulation par voie sympathique des récepteurs bêta-adrénergiques de type 2 peut agir sur la

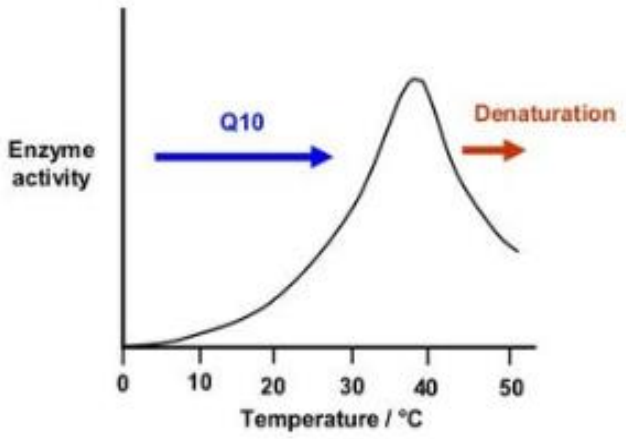


Fig. 24 Représentation graphique du mécanisme dit « effet Q10 » sur le plan métabolique

régulation du métabolisme glycolytique des fibres I en particulier (Greenhaff et al., 1991 ; Febbraio et al., 1998). L'accélération des réactions chimiques et biochimiques intracellulaires inhérente à l'élévation de la température des tissus (effet « Q10 » ; Bennett, 1984) semble également jouer ici un rôle. Si un gain de 2 °C observé pour la température intramusculaire peut entraîner une élévation de 30 à 40% de l'activité des enzymes clés du métabolisme glycolytique telle que la phosphofructokinase (PFK), il est également susceptible de perturber la fonction mitochondriale pendant l'exercice (Brooks et al., 1971). Ces altérations sont néanmoins compensées, en partie, par une plus grande extraction d'O_2 qui affecte alors la différence artério-veineuse (Gonzales-Alonso et al., 1998).

De manière plus générale, les adaptations métaboliques inhérentes à la chaleur ne constituent pas un facteur limitant la performance lors de l'exercice à libre allure. L'arrêt anticipé de l'exercice dans de telles conditions environnementales ne coïncide généralement pas avec une déplétion importante des réserves glycogéniques (Parkin et al., 1999), alors que l'accumulation de lactates post-exercice tend à être plus faible à mesure que ces mêmes conditions deviennent contraignantes (Périard et al., 2011a). Par ailleurs, si l'efficacité mitochondriale est potentiellement perturbée par l'élévation locale de température, la perfusion musculaire en oxygène est généralement préservée et suffisante pour permettre un fonctionnement optimal de la structure contractile. Ce facteur peut, en revanche, être considéré comme limitant lors de la production de hautes intensités ou chez un individu cumulant un état de déshydratation avancée à une relative hyperthermie (Gonzales-Alonso et al., 1998). Le caractère plus aléatoire de la perfusion en O_2 favoriserait alors une accumulation importante de métabolites sanguins (*e.g.* ions hydrogènes), avec pour éventuelle conséquence une stimulation des afférences métabosensibles musculaires de type III et IV.

3.3.4. Adaptations neuromusculaires

La plupart des mécanismes centraux et périphériques de la fonction neuromusculaire sont définis comme « température – dépendants ». Leur régulation affecte donc, directement ou indirectement, la performance lors d'une épreuve prolongée (pour revue : Rutkove, 2001 ; Racinais and Oksa, 2010). Outre les adaptations métaboliques, l'élévation de la température musculaire favorise une optimisation de l'activité contractile, en d'autres termes la formation d'un plus grand nombre de ponts actine-myosine pour un même signal nerveux généré par la commande motrice centrale (Mito et al., 2007). Parmi les adaptations périphériques, l'élévation de la température induit un raccourcissement des délais de contraction et de relaxation

musculaire. Plusieurs phénomènes chimiques sous-jacents en sont à l'origine, par exemple l'optimisation du mécanisme de libération – recaptage des ions calcium ou le renforcement des liaisons entre les ions calcium et les protéines de signalisation comme la parvalbumine.

La diminution du délai d'ouverture des canaux d'échange ioniques sodium-potassium permet également d'accélérer la dépolarisation de la membrane du fait d'une moindre concentration en ions sodium (Todnem et al., 1989). L'ensemble de ces réactions induit la diminution de l'amplitude de l'onde M du nerf stimulé (Racinais and Girard, 2012). Bien que l'élévation de la température musculaire optimise la relation force-vitesse lors d'une contraction maximale volontaire (Binkhorst et al., 1977), les effets sur la capacité de production de force se contrastent à mesure que l'effort musculaire se prolonge dans le temps. En effet, à mesure que la température musculaire augmente, l'accélération des adaptations métaboliques locales réduit le temps limite de maintien d'une contraction isométrique sous-maximale (Thornley et al., 2003).

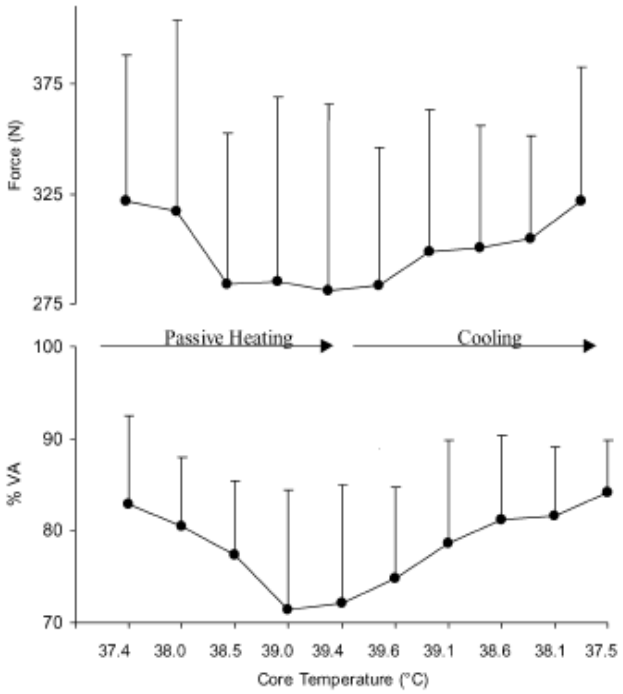


Fig. 25 Evolution moyenne respective de la force produite (en haut ; en newtons) et du pourcentage d'activation volontaire (en bas ; en %) soutenu lors d'une contraction maximale volontaire des extenseurs du genou avec variation locale de la température (issu de Morrison et al., 2004).

A l'échelle de l'articulation, l'élasticité de la structure muscle-tendon serait également influencée (Asmussen et al., 1976). Ce phénomène supposerait une réduction de la capacité de stockage d'énergie élastique lors du cycle étirement-raccourcissement du muscle. En clair, le système ne sera pas capable de restituer, pour une même énergie métabolique, une action mécanique aussi importante qu'en ambiance tempérée (Cavagna, 1977). Le seul constat réside toutefois dans le fait que la composante élastique de ce système est plus raide à mesure que sa température diminue. L'effet potentiel de la chaleur sur la compliance des tissus musculaires ne peut ainsi faire l'objet que de spéculations.

De manière générale, les adaptations musculaires périphériques jouent un rôle secondaire dans la régulation de la fatigue au cours de l'exercice dynamique prolongé. En effet,

l'élévation de la température intramusculaire n'influence pas l'amplitude et le spectre de fréquence du signal électromyographique (EMG) issu des muscles sollicités lors d'une tâche musculaire produite en ambiance chaude (Ftaiti et al., 2001). Inversement, l'élévation de T_{CO} affecte la capacité de la commande motrice centrale à produire de la force musculaire. En effet, l'activation volontaire mesurée après 50 min d'un exercice épuisant chez des sujets exposés à la chaleur était largement inférieure à celle relevée pour le groupe de sujets évoluant en ambiance neutre (*i.e.* activation volontaire 54 *vs.* 82 % ; T_{CO} de 40,0 °C *vs.* 38,0 °C en fin d'épreuve) (Nybo et Nielsen, 2001a). La moindre capacité de production de force des membres supérieurs relevée chez les sujets en hyperthermie au cours d'une tâche dite de « handgrip » de 2 min souligne le rôle joué par l'altération de la commande motrice centrale. Initialement, la diminution de l'activation volontaire induite par l'hyperthermie corporelle a été considérée comme l'expression d'un mécanisme d'ajustement compensatoire. L'optimisation des propriétés contractiles sous-jacentes à l'élévation de la température musculaire aurait alors nécessité une moindre activation de la commande motrice pour une même production de force (Todd et al., 2005). Toutefois, l'application de protocoles appliquant une variation distincte des températures locales (*i.e.* musculaires) et centrale a mis en valeur le rôle prépondérant de cette dernière dans la réduction de l'activation volontaire lors d'un exercice de contraction maximale (Morrison et al., 2004; Thomas et al,, 2005).

3.3.5. Adaptations cérébrales

La moindre capacité de production de force vérifiée chez l'homme en état d'hyperthermie est fréquemment associée à deux phénomènes physiologiques inhérents à l'exposition à la chaleur et susceptibles d'agir sur les aires cérébrales motrices : la diminution du débit sanguin cérébral et de l'augmentation de la température cérébrale.

La baisse de la perfusion sanguine au niveau cérébral pourrait ainsi entraîner un apport inadéquat en oxygène (Nybo and Rasmussen, 2007). Or une diminution de la pression en O_2 mitochondriale supérieure à 8 mmHg réduit significativement l'activation volontaire des muscles lors d'une contraction maximale (Rasmussen et al., 2010) et implique, pour des valeurs extrêmes, des phénomènes de perte partielle ou totale de conscience (Roberts, 2007). La possible réduction de la perfusion sanguine résulte de l'hypocapnie inhérente à l'hyperventilation générée par l'élévation de la température corporelle (Henry and Bainton, 1974). Ainsi lors d'un exercice sous-maximal, la diminution de 5-7 mmHg de la pression artérielle en CO_2 est associée à une réduction de 20% du débit sanguin cérébral (Nybo et al.,

2002). De plus, administrer du CO_2 chez un sujet en état d'hyperthermie modérée (*i.e.* 38,5 à 39,5 °C) permet un retour du débit sanguin cérébral vers des valeurs proches de la normale (Rasmussen et al., 2006). En parallèle, le stress cardiovasculaire résultant du moindre volume d'éjection systolique peut également influencer la régulation de la perfusion sanguine cérébrale (Nybo and Nielsen, 2001b) mais son rôle demeure secondaire. Il ne semblerait être prépondérant que dans le cas d'une hyperthermie sévère (Gonzales-Alonso, 1998).

Toutefois, la diminution du débit sanguin cérébral serait en partie compensée par une extraction plus efficiente de l'oxygène depuis le sang artériel. L'élévation puis le maintien de T_{CO} à 39,5 °C lors d'un exercice « isothermique » (*i.e.* exercice au cours duquel la régulation de l'allure a pour but de maintenir un seuil constant de T_{CO}) de 65 min génère une diminution de 18% de la perfusion sanguine cérébrale, ainsi qu'une élévation de 23% de la différence artério-veineuse en oxygène (Nybo et al., 2002). La diminution de PO_2 au niveau capillaire serait notamment compensée par un effet Q10 à l'origine d'une accélération locale de l'activité métabolique (*i.e.* élévation de 13 % de l'indice d'activité du métabolisme aérobie cérébrale, ou $CMRO_2$, lors de l'essai en hyperthermie). Dans ces conditions, la réduction du débit sanguin cérébral ne paraît pas constituer un facteur limitant de la production de force à l'inverse de l'élévation de la température cérébrale. Bien qu'il soit difficile de mesurer ce paramètre chez l'homme, plusieurs éléments semblent néanmoins conforter le rôle joué par ce phénomène dans l'apparition de la fatigue centrale (pour revue : Nybo, 2012). A ce titre, les résultats obtenus par Caputa et ses collaborateurs (1986) sont intéressants. La modulation locale de la température hypothalamique chez des chèvres par l'intermédiaire de micro-sources thermiques implantées a permis d'observer que son élévation, indépendamment du reste du corps (*i.e.* jusqu'à 42 °C), a conduit à l'arrêt anticipé de l'exercice sur tapis roulant. Il est supposé que la réduction de l'activité motrice ait, dans ce cas, pour origine des signaux inhibiteurs générés par l'aire pré-optique de l'hypothalamus en réponse à une accumulation excessive de chaleur dans le milieu cérébral (Nybo and Nielsen, 2001a).

Néanmoins, l'intégration de ces signaux par le système nerveux central appartiendrait, à l'instar d'autres sources nerveuses afférentes issues par exemple des muscles, à un processus complexe de régulation fine de la commande motrice centrale. Les facteurs sous-jacents à la diminution de la performance musculaire lors d'un exercice à libre allure sont ainsi susceptibles de varier en fonction de la durée, de l'intensité, de la contrainte thermique ou encore du niveau d'entraînement de l'individu. Ces altérations neuromusculaires peuvent donc apparaître en dépit de variations modérées de T_{CO} (*i.e.* valeurs finales comprises entre 38,5 et 39,0 °C ; Thomas et al., 2005). Elles peuvent également être relatives à d'autres mécanismes précurseurs,

par exemple une diminution drastique de l'oxygénation cérébrale résultant d'un stress cardiovasculaire accentuée par la température cutanée très élevée et/ou l'intensité de l'exercice (Wilson et al., 2006). Inversement, l'hyperthermie locale peut affecter d'autres aires cérébrales, par exemple le cortex préfrontal qui voit son activité électrocorticale (*i.e.* ondes β) diminuer à mesure que T_{CO} augmente au-delà de 38 °C (Nielsen et al., 2001).

Enfin, son influence réelle dans le processus de fatigue inhérent à la chaleur ambiante peut varier selon l'activité de libération de neurotransmetteurs tels que la dopamine ou la noradrénaline. Ainsi, l'administration de méthylphénidate (*i.e.* précurseur de la dopamine) préalable à un exercice d'intensité fixe puis variable (*i.e.* contre-la-montre) supérieur à 60 min et effectué en ambiance chaude a induit, lors de l'étape à intensité variable, une amélioration de 16 % de la puissance moyenne développée (Roelands et al., 2008). La production plus importante de chaleur sous-jacente s'est accompagnée d'une élévation post-exercice plus marquée de la T_{CO} (*i.e.* 40,0 °C vs 39,1 °C), tandis que les réponses perceptives (*i.e.* RPE et sensation thermique) n'ont pas été influencées. Ces résultats signifient qu'une éventuelle activité inhibitrice, générée par exemple par l'hypothalamus, peut être potentiellement contrecarrée par l'activité des neurotransmetteurs. De manière plus générale, la réduction de l'activation volontaire n'apparaît pas comme un facteur limitant, chez les sujets non entraînés et/ou ne tolérant pas, d'un point de vue psychologique, la contrainte thermique ambiante (Racinais and Girard, 2012).

3.3.6. Réponses perceptives

Lors d'un exercice à libre allure tel qu'un contre-la-montre cycliste, des réductions volontaires plus ou moins marquées de l'intensité sont observées à mesure que la température ambiante s'élève, et ce en dépit de variations minimales de T_{CO} (Ely et al., 2010). Nous pouvons alors en déduire que la baisse de la performance physique dans ce contexte est associée, au moins en partie, à une modification du comportement de l'individu face à la contrainte thermique exercée. En effet, la régulation de la température corporelle ne s'effectue pas uniquement au travers de mécanismes autonomes de régulation, mais également à partir d'actions volontaires : par exemple, se rafraîchir le visage, enlever une couche de vêtements ou ajuster l'intensité développée au cours d'une tâche physique ardue. Ces actions généralement coordonnées ont pour effet de limiter le stockage et/ou la production de chaleur, et ainsi ralentir l'élévation de la température corporelle. Ces comportements sont ainsi considérés comme la première « ligne de défense » du maintien de l'équilibre thermique, au repos comme à l'exercice (pour revue : Flouris and Schlader, 2015).

La réduction volontaire de l'allure au cours de l'exercice est l'expression d'une capacité sensorielle à détecter des variations de température et/ou d'humidité propres à son organisme ou à l'environnement dans lequel on évolue : la perception thermique. Celle-ci est définie à partir de ses composantes discriminatives, hédoniques et affectives. La sensation thermique correspond à l'évaluation subjective de l'intensité de la contrainte thermique perçue (Gagge et al., 1969). Le « plaisir » thermique se caractérise par l'effet de la sensation thermique perçue sur le confort ressenti. Enfin, le confort thermique est défini comme l'indifférence subjective à l'environnement thermique, en d'autres termes il exprime la capacité affective et émotionnelle à tolérer une température ressentie (Mercer, 2001).

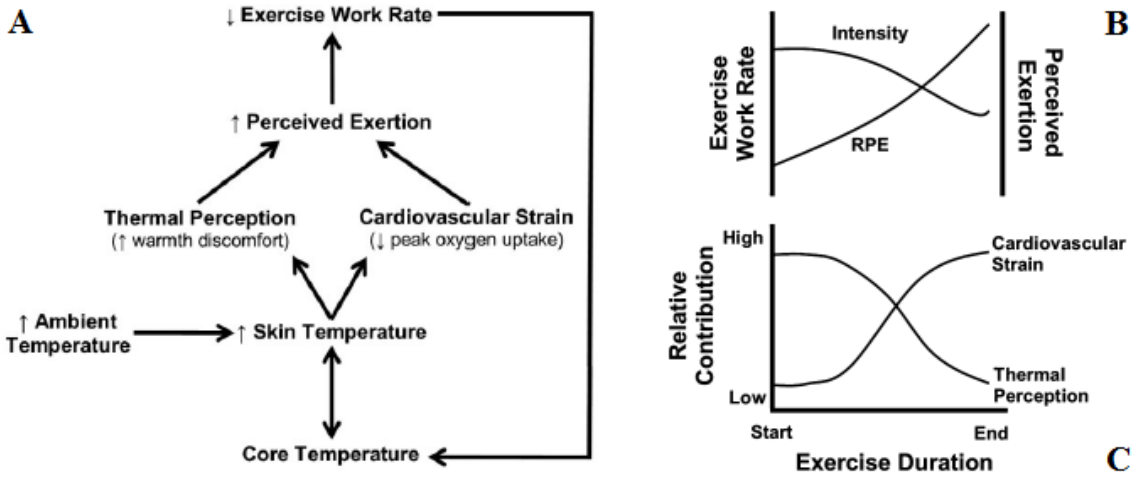


Fig. 26 A gauche, proposition de schéma représentant l'interaction entre perception thermique et stress cardiovasculaire dans la régulation de la perception de l'effort puis de l'intensité de travail pendant l'exercice à libre allure (A). A droite, représentation de l'évolution théorique de RPE et de l'intensité (B) et des contributions théoriques des fonctions cardiovasculaires et perceptives dans la régulation de l'allure, au cours de l'exercice libre et prolongé (C).

Alors que la sensation thermique perçue par l'individu est largement dictée par la variation de la température cutanée (Yao et al., 2007 ; Zhang et al., 2010), aucun consensus n'a été établi sur les interactions entre température centrale et cutanée inhérentes à la construction de la réponse émotionnelle à la chaleur pendant l'exercice. Au repos, la distorsion du confort thermique répondrait d'abord à une élévation de T_{CO} au-delà d'un seuil perçu comme « acceptable », alors que la température cutanée constituerait une variable d'ajustement (Cabanac, 1971). Pendant l'exercice, ce même phénomène serait associé à l'activité des réponses des mécanismes autonomes de thermorégulation dont le déclenchement et l'amplitude sont en grande partie dépendantes de T_{CO} (Gagge et al., 1969). Toutefois, plusieurs études montrent que la réduction de l'allure sous-jacente à la distorsion de l'effort perçu serait la

conséquence de la seule élévation de température cutanée, indépendamment du seuil de T_{CO} atteint (Ely et al., 2010). Ces résultats sont corroborés par l'accélération de la régression linéaire de puissance observée à RPE fixe, concomitante en l'absence d'hyperthermie aux variations de la température cutanée (Friesen et al., 2017).

Dans ce contexte, le rôle-clé joué par la température cutanée serait alors relatif à son influence, directe ou indirecte, sur les fonctions cardiovasculaires et perceptives que l'on considère comme essentielles dans la régulation volontaire de l'intensité de l'exercice. En effet, si la diminution de l'activation volontaire de la commande motrice centrale est susceptible d'entrer en jeu chez un individu en état d'hyperthermie (*i.e.* en fin d'épreuve ; voir parties 3.3.4. et 3.3.5.), la dégradation initiale de la performance à libre allure ne semble pas résulter de ce phénomène (Périard et al., 2011b). Toutefois, les contributions respectives du stress cardiovasculaire et de la perception thermique semblent être interdépendantes l'une de l'autre, et variables selon les caractéristiques de l'exercice en premier lieu desquelles le rapport entre durée et intensité (Flouris and Schlader, 2015). Ainsi, alors que le confort thermique relatif à l'amplitude de la sensation de chaleur jouerait un rôle prédominant en début d'épreuve, l'effet du stress cardiovasculaire sur la performance se ferait plus ou moins ressentir en fonction de la vitesse d'élévation de T_{CO} donc de l'intensité. Il serait également plus marqué à mesure que l'épreuve se prolonge à partir d'une certaine limite (*i.e.* environ 30 min ; Tucker et al., 2004 ; Altareki et al., 2009 ; Abbiss et al., 2010). Ce postulat nécessite toutefois d'être vérifié par le biais de résultats expérimentaux complémentaires. En outre, l'amplitude de la contrainte ambiante pendant l'exercice semble clairement moduler l'influence des facteurs perceptifs pendant l'exercice. L'importance des réponses comportementales dans la régulation de la production de chaleur métabolique est ainsi potentiellement moindre lors de l'exposition à une chaleur ambiante modérée (*i.e.* environ 30 °C ; Flouris and Schlader, 2015).

La perception thermique pendant l'exercice peut également être modulée, indépendamment des variations de la température centrale et cutanée, par divers facteurs d'origine thermique ou non-thermique. L'humidité cutanée générée par l'accumulation de sueur à la surface de la peau contribuerait à l'inconfort thermique, en particulier dans des conditions ambiantes chaudes (Fukuzawa and Havenith, 2009). Toutefois son impact réel serait fortement dépendant de la tenue vestimentaire de l'individu (Havenith et al., 2008). La sensation de chaleur et l'inconfort sous-jacent peuvent également être atténués, dans ces conditions, par un refroidissement local de la peau (*i.e.* visage) résultant de l'exposition à une source de ventilation ou de l'application d'une solution mentholée (Schlader et al., 2011). Les résultats de cette étude indiquent que ces changements de perception thermique influencent la production de puissance

lors d'un exercice à RPE-16, sans pour autant agir sur les cinétiques de température corporelle. La puissance de ce stimulus s'expliquerait par la très grande sensibilité thermique de cette zone en comparaison du reste du corps, en particulier lorsqu'elle est exposée à une source de chaleur (Cotter and Taylor, 2005).

Du point de vue des facteurs non-thermiques, le renforcement psychologique de l'individu par un entraînement spécifique préalable (*e.g.* relaxation, imagerie mentale…) a contribué à une amélioration de 8 % de la distance parcourue lors d'un exercice libre sur tapis roulant de 90 min sous 30 °C, alors que les valeurs de température corporelle mesurées respectivement lors des épreuves pré- et post-entraînement étaient similaires (Barwood et al., 2008). Il n'est toutefois pas à exclure qu'une possible familiarisation des sujets à l'épreuve et à son contexte environnemental soit à l'origine d'une amélioration de la performance, notamment par le biais d'ajustements de la stratégie d'allure adoptée (Schmit et al., 2016). L'effet de la fatigue d'origine physique ou mentale sur la perception thermique pendant l'exercice a été, quant à lui, peu investigué jusqu'à présent. L'état de fatigue mentale, caractérisé chez l'individu par une sensation de lassitude et d'épuisement psychologique suite à une performance cognitive intense et/ou prolongée (Boksem and Tops, 2008), est susceptible de générer une distorsion de la perception de l'effort à l'origine de la baisse de la performance lors d'une épreuve d'endurance (pour revue : Rozand and Lepers, 2016). Deux études récentes aux résultats contradictoires se sont certes intéressées aux effets d'une tâche cognitive contraignante sur la performance lors d'un exercice à intensité fixe (Otani et al., 2016) ou à libre allure (Van Cutsem et al., 2017) produit en ambiance chaude, sans toutefois s'intéresser réellement à la perception thermique.

Enfin, les réponses perceptives seraient également dépendantes des caractéristiques du sujet, en particulier le niveau d'entraînement. Ainsi, Cheung et McLellan (1998) ont démontré la relation entre tolérance à la chaleur et niveau d'entraînement par les valeurs supérieures de T_{CO} atteintes, en moyenne, par les sujets entraînés dès l'interruption volontaire d'un exercice à intensité modérée, comparativement à des sujets modérément actifs (*i.e.* 39,3 *vs.* 38,7 °C). Toutefois, le fait que T_{CO} soit considérée ici comme le paramètre limitant majeur de la performance constitue, en raison de la négligence des paramètres perceptifs, un point de discussion. Si une plus grande capacité de dissociation des contraintes physiologiques et perceptives inhérentes à la chaleur semble caractériser le sujet entraîné (Tikuisis et al., 2002), les fondements psychologiques à l'origine de ce phénomène ne sont toujours pas clairement identifiés.

POINTS-CLES DE LA PARTIE 3

- La performance lors d'une épreuve prolongée se dégrade à mesure que la température ambiante s'élève. L'effet délétère de la chaleur s'amplifie à mesure que le niveau d'expérience et le potentiel aérobie du sujet sont moindres.

- Des mécanismes autonomes » et comportementaux de régulation de la température corporelle ont pour but de compenser la plus grande production métabolique de chaleur et ainsi limiter son élévation.

- La régulation de l'allure en ambiance chaude résulte d'un phénomène complexe associant diverses fonctions physiologiques et perceptives sollicitées par les variations de la température corporelle. Ce phénomène s'exprime notamment par une distorsion de la perception de l'effort.

- Alors que l'impact d'éventuelles altérations neuromusculaires ou métaboliques liées à l'élévation de la température corporelle est à relativiser, le stress cardiovasculaire et l'altération du confort thermique liés à l'élévation de la température cutanée sont incriminés dans la dégradation de la performance lors d'un exercice à libre allure. Leur rôle respectif est évolutif et variable selon les caractéristiques de l'exercice.

- L'amplitude des réponses perceptives serait dépendante de l'expertise et du potentiel aérobie du sujet, en raison d'une plus grande capacité de dissociation des contraintes physiologiques et perceptives inhérentes à la chaleur.

4. L'ACCLIMATATION A LA CHALEUR

4.1. Généralités

Plusieurs stratégies à caractère aigu (*i.e.* stratégies de refroidissement ou « cooling » ; Bongers et al., 2015) ou chronique (*i.e.* stratégies d'acclimatation ; Périard et al., 2015) ont pour but de contrecarrer les effets délétères de la chaleur sur la performance lors de l'exercice prolongé. Les athlètes qui ne résident pas à plein temps dans une région chaude ou tropicale disposent, avec les stratégies d'acclimatation, d'outils leur permettant de se préparer au mieux à une compétition qui se déroule dans un tel environnement. Soit par une anticipation de leur déplacement sur le lieu de la compétition, soit en simulant artificiellement les conditions environnementales à l'intérieur d'une chambre climatique, voire avec une approche plus artisanale (*i.e.* immersion en eau chaude ou sauna ; Casadio et al., 2017). Bien que ces méthodes « basiques » contribuent à une meilleure tolérance psychophysiologique de la chaleur, il semble toutefois que la spécificité des adaptations respectivement liées à l'entraînement et à l'exposition répétée à la chaleur (Moran et al., 1996) implique une plus grande efficacité des protocoles d'acclimatation dits « actifs » (Périard et al., 2015). La présente analyse se limitera ainsi à une étude approfondie des méthodes et effets de cycles d'acclimatation avec exercice.

Le principe d'une stratégie d'acclimatation à la chaleur est d'induire de manière répétée, par une exposition active ou passive à des températures ambiantes chaudes (30-40 °C ; 20-60 % HR), une élévation de la température centrale (T_{CO}) au-delà d'un seuil à partir duquel les fonctions de régulation de l'organisme seront mises à contribution (Taylor and Cotter, 2006). La multitude de travaux scientifiques publiés au cours des vingt dernières années démontrent, pour la plupart, l'intérêt de telles stratégies (pour revue : Chalmers et al., 2014). Au-delà d'une amélioration significative du niveau de performance en ambiance chaude (Racinais et al., 2015), une exposition répétée peut aussi favoriser le développement du potentiel aérobie global de l'individu (Lorenzo et al., 2010). Dans ce contexte, plusieurs scénarii d'application ont été proposés, dans lesquels des cycles d'acclimatation sont mis en place lors de camps d'entraînement de présaison, de pré-compétition (*i.e.* pendant une période d'affûtage) ou pendant la saison (pour revue : Casadio et al., 2017).

Ce chapitre aura pour but d'introduire, dans un premier temps, les adaptations physiologiques et psychologiques inhérentes à un cycle d'exposition répétée à la chaleur. Dans un second temps, seront abordés les aspects liés à la planification et la mise en œuvre de telles stratégies dans le cadre de la préparation d'athlètes entraînés.

4.2. Acclimatation et adaptations psychophysiologiques

Les premiers travaux sur les effets de l'acclimatation à la chaleur ont démontré une diminution de T_{CO}, de la température cutanée, de la fréquence cardiaque (FC) en parallèle d'adaptations significatives de l'activité sudorale (Bass et al., 1955). Ces constats ont laissé d'abord supposer le rôle-clé joué par la plus grande dissipation de chaleur dans la réduction du stress thermique post-acclimatation. Plus récemment, une revue de littérature de Sawka et ses collaborateurs (2011) est venue confirmer l'importance de ces adaptations lors d'un cycle d'acclimatation. Les adaptations des diverses fonctions physiologiques lors de l'exposition répétée à la chaleur sont largement documentées dans la littérature actuelle (pour revue : Taylor, 2014).

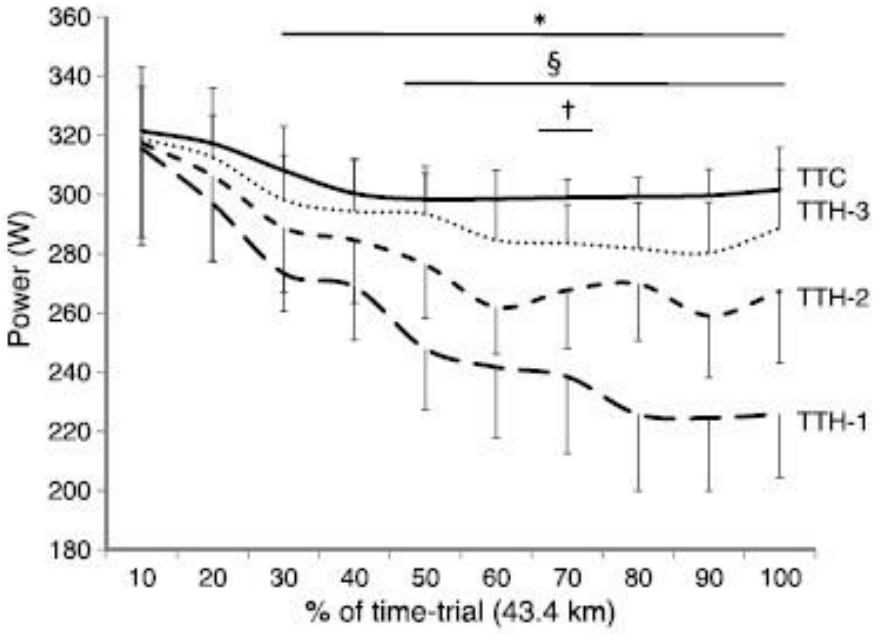


Fig. 27 Evolution de la puissance moyenne au cours d'un exercice de contre-la-montre de 43,4 km reproduit en ambiance tempérée (TTC) et en ambiance chaude après 1 jour (TTH-1), 6 jours (TTH-2) et 14 jours (TTH-3) d'exposition répétée à la chaleur (issu de Racinais et al., 2015). Une différence significative (*) est observée entre TTH-1 et TTC, inversement TTH-3 et TTC ne présente pas de différence particulière.

4.2.1. Fonction thermorégulatrice

Les cinétiques de T_{CO} mesurées au repos et pendant l'exercice sont significativement modifiées par l'exposition répétée à la chaleur. Au repos, une baisse de la température de 0,2 °C à 0,4 °C est classiquement reportée chez un sujet acclimaté (Horvath and Shelley, 1946). Cette diminution aurait pour principale origine un ralentissement de l'activité métabolique basale (Mason and Jacob, 1972), que l'on tend par exemple à observer suite à l'acclimatation

saisonnière en période estivale (Hori et al., 1995). A l'exercice, les muscles actifs au cours d'une tâche de pédalage produiraient moins de chaleur endogène du fait d'une plus grande efficience métabolique (*i.e.* proportion plus importante de l'oxydation des lipides à même intensité sous-maximale). Ce gain d'efficience serait notamment caractérisé par une diminution de la fraction de $\dot{V}O_{2max}$ à même intensité (Sawka et al., 1983a). La plus faible élévation de T_{CO} à l'exercice serait ainsi liée à une moindre production de chaleur endogène, plutôt qu'à une optimisation des mécanismes autonomes de dissipation de chaleur (Rivas et al., 2017). L'application d'un protocole d'exercice dit « isotherme », ou nécessitant le maintien de la production de chaleur métabolique tout au long de l'exercice, a permis de constater l'absence d'un quelconque changement des paramètres de l'activité sudorale à l'issue d'un cycle d'acclimatation à la chaleur de 10 jours. Le ralentissement de la cinétique de T_{CO} obtenue post-acclimatation aurait donc pour intérêt majeur de retarder le déclenchement des mécanismes autonomes de régulation thermique (Roberts et al., 1977).

Ce constat ne fait cependant pas consensus. En effet, de nombreux auteurs soutiennent l'idée que la capacité de dissipation de chaleur par voie évaporatoire, largement améliorée suite à un protocole d'acclimatation, participe grandement à la modification de la cinétique de T_{CO}. L'usage de la calorimétrie directe a permis notamment de démontrer une élévation de 11 % de la quantité de chaleur dissipée par voie sudorale lors d'un exercice isothermique réalisée à 40 °C et 20 % RH suite à quatorze jours d'entraînement d'une durée de 90 min à 50 % $\dot{V}O_{2max}$ (Poirier et al., 2015). Si le seuil thermique de déclenchement de la sudation n'est que peu modifié par l'adaptation de l'organisme à la chaleur (*i.e.* diminution de 0,1 à 0,2 °C), l'activation d'un nombre plus important de glandes sudorales et leur plus grande sensibilité aux stimulations d'origine cholinergique tend à augmenter l'activité de la fonction sudomotrice. Ces adaptations sont notamment dues à des changements morphologiques de la glande sudorale (Sato et al., 1990). En parallèle, la diminution du seuil thermique d'activation de la vasodilatation cutanée (Yamazaki and Hamasaki, 2003) favorise la hausse du gradient de pression de vapeur d'eau entre la peau et l'environnement, et permet indirectement l'évaporation d'une plus grande quantité de sueur (Taylor, 2014). Bien que l'effet de l'acclimatation sur les réponses hémodynamiques périphériques n'ait été que peu étudié jusqu'à présent, ce phénomène semblerait être la conséquence d'adaptations de la microcirculation locale, telles que le renforcement du mécanisme d'hyperpolarisation des cellules endothéliales (Lorenzo et al., 2010).

Le maintien de l'équilibre thermique ne dépend toutefois pas que de la production de sueur, mais aussi de la capacité de dissipation de chaleur par voie évaporatoire. En effet,

l'acclimatation à la chaleur favorise la réabsorption des minéraux (*i.e.* ions sodium, potassium et chloride) par les glandes sudorales (Sato, 1977) et tend à diminuer la densité de la sueur. La concentration sudorale en sodium tend, par exemple, à être divisée par 5 ou 6, favorisant ainsi son évaporation à la surface de peau en dépit d'une production beaucoup plus importante (Taylor et al., 2014). L'accélération de la libération d'aldostérone, initiée par les osmorécepteurs cérébraux et rénaux en réponse à l'élévation de la température corporelle, joue un rôle important dans ce mécanisme d'adaptation (Ladell and Shephard, 1961).

4.2.2. Fonction cardiovasculaire

Les adaptations sur le plan cardiovasculaire jouent également un rôle prédominant dans la plus grande capacité de l'individu à tolérer, d'un point de vue physiologique et perceptif, l'exposition à la chaleur pendant l'exercice. La diminution transitoire et marquée du volume sanguin en début d'exercice génère une hémodilution qui survient de manière prédominante dans le compartiment plasmatique (Barcroft et al., 1923). La répétition de ce phénomène, amplifié par l'exposition à la chaleur, entraîne après quelques jours une expansion significative du volume plasmatique. Ces adaptations sont à l'origine de l'élévation du volume sanguin total, matérialisée par la diminution des concentrations en hémoglobine et hématocrite (Bazett et al., 1940). Le volume d'eau total du corps humain peut, en effet, augmenter de 5 à 7 % après sept jours d'exposition répétée à la chaleur (Patterson et al., 2004). Si ce phénomène est susceptible de limiter la capacité de performance dans certains sports, il est toutefois largement contrebalancé par les bénéfices inhérents à la stabilisation cardiaque et thermique de l'organisme.

D'un point de vue physiologique, l'expansion du volume plasmatique peut s'expliquer en partie par une libération accrue d'aldostérone (Ladell and Shephard, 1961), d'arginine ou de vasopressine et/ou par une sensibilité rénale accentuée à ces substances, ou encore par le maintien de l'osmolarité extracellulaire résultant de la conservation de minéraux dans le milieu interne tels que le sodium (Nose et al., 1988). L'élévation post-acclimatation du volume sanguin total contribue à la stabilisation du débit cardiaque, pour des exercices de plus longue durée ou d'intensités relatives plus élevées, et à une plus grande capacité de stockage de chaleur (Wyndham et al., 1968). L'hypervolémie est considérée comme précurseur de la réduction du stress cardiovasculaire : cela se caractérise par l'élévation du volume d'éjection systolique (Sawka et al., 1983a) et/ou la diminution concomitante de la pression diastolique (Horowitz et

al., 1986). La réduction de FC, à même intensité d'exercice, est donc l'un des marqueurs clés d'une acclimatation optimale du sujet (Périard et al., 2015).

Bien que l'hypervolémie sanguine soit un prérequis pour une stabilisation de l'activité cardiaque, le refroidissement de la peau indirectement favorisé par l'élévation du débit sudoral contribue à ces adaptations par la redirection indirecte d'une quantité non négligeable des masses sanguines périphériques vers les organes et les muscles actifs (Sawka et al., 2011). L'ajustement des réponses sudorales nécessite toutefois d'être compensé par une ingestion de fluides conséquente, destinée à prévenir l'éventuelle diminution du volume plasmatique relative à une déshydratation de l'individu (Nadel et al., 1980). Cet état est susceptible d'induire une accélération dramatique de l'élévation de T_{CO} du fait, entre autres, de la perturbation des mécanismes autonomes de régulation thermique notamment sous-jacente à une hyperosmolarité plasmatique (Takamata et al., 2001). Ce phénomène peut néanmoins être partiellement enrayé par une acclimatation préalable (Périard et al., 2015)

4.2.3. Fonction perceptive

L'effet positif de l'acclimatation à la chaleur sur le confort thermique ressenti pendant l'exercice fait aujourd'hui consensus, notamment lors de cycles de courte durée (Sunderland et al., 2008 ; Charlot et al., 2017). Par exemple, le suivi par des soldats d'un protocole d'entraînement de 5 jours à intensité modérée (séquences de 8 min à 50 % $\dot{V}O2_{max}$; durée totale 32-56 min), en parallèle de leur installation dans un camp de base situé en région très chaude (*i.e.* Moyen-Orient), leur a permis de renforcer significativement le confort ressenti au repos comme pendant l'exercice dans cet environnement (Charlot et al., 2017). Ces améliorations seraient liées au ralentissement de l'élévation de T_{CO} et à une moindre sensation de chaleur concomitante, alors que le rôle exact de la température cutanée demeure plus incertain (de Dear and Brager, 2001).

Le plus grand confort ressenti participe à l'amélioration de la perception de l'effort pendant l'exercice. En parallèle, la réduction de RPE observée après un cycle d'exposition répété à la chaleur serait le reflet d'adaptations physiologiques inhérentes à l'acclimatation (Armstrong and Maresh, 1991). Cependant, ces progrès ne semblent pas garantir une amélioration systématique de la perception de l'effort à court (Fujii et al., 2012) comme à long terme (Pandolf et al., 1988), laissant ainsi subsister des zones d'ombres quant aux effets réels de l'acclimatation sur les variables perceptives. Enfin, la dissociation des réponses physiologiques et perceptives observée chez le sujet acclimaté à la chaleur (Malgoyre et al.,

2018) confère un rôle très incertain à l'optimisation post-entraînement du confort perçu. Par exemple, le gain de confort observé à l'issue d'un cycle de courte durée peut, en l'absence de progrès concomitants sur le plan physiologique (*e.g.* moindre élévation de T_{CO} ou moindre stress cardiovasculaire), conduire le sujet à développer une puissance plus soutenue mais susceptible de déséquilibrer plus largement l'homéostasie corporelle (Guy et al., 2014).

4.3. Comment s'acclimater à la chaleur ?

4.3.1. Acclimatation et durée du cycle

L'amplitude des bénéfices associés à l'acclimatation à la chaleur relèvent en premier lieu de la fréquence et/ou du nombre total de jours ou sessions au cours desquels le sujet est exposé. Définir une durée optimale lors de la construction d'un tel protocole nécessite de définir clairement deux éléments que sont *(i)* le nombre de sessions nécessaires au développement d'adaptations appropriées et *(ii)* l'objectif que se fixe l'athlète et la contrainte logistique inhérente à celui-ci.

Il est établi que 75 à 80% des adaptations physiologiques inhérentes à l'acclimatation surviennent au cours des cinq à huit premiers jours d'une exposition quotidienne à la chaleur (Pandolf, 1979 ; Shapiro et al., 1998). La diminution de FC se produit rapidement au cours des 4-5 premiers jours d'exposition, alors que la diminution de la température corporelle s'observe quant à elles après 7 jours, favorisant une optimisation rapide du confort thermique perçu. La précocité des ajustements d'origine cardiovasculaire et thermique se traduit notamment par une aptitude à développer et maintenir un pourcentage de $\dot{V}O_{2max}$ plus élevé lors d'un exercice à libre allure, ou par la diminution de la perception de l'effort à même intensité (Périard et al., 2015). Ce constat plaide donc pour l'application de cycles d'exposition répétée de courte durée (*i.e.* moins de 7 jours ; Chalmers et al., 2014). Leurs effets positifs sur la performance physique ont été validés par plusieurs études (Cotter et al., 1997 ; Garrett et al., 2011 ; Racinais et al., 2015) et leurs caractéristiques répondent pleinement aux caractéristiques inhérentes à la pratique sportive des athlètes de haut niveau. En effet, la variété des lieux et environnements des compétition en cours de saison réduit à une portion minime les phases temporelles disponibles pour une application de telles stratégies. Par conséquent, l'application de cycles d'exposition répétée de courte durée s'avère plus adaptée, notamment d'un point de vue logistique, aux contraintes relatives à la planification de l'entraînement d'un athlète entraîné.

Malgré cela, il est essentiel de ne pas perdre de vue le principe selon lequel le bénéfice inhérent à un cycle d'acclimatation à la chaleur dépend d'abord de sa durée. Si un protocole de

quelques jours ne garantit pas des adaptations optimales, à l'inverse la plupart des marqueurs majeurs de l'acclimatation à la chaleur répondent pleinement après 10 à 14 jours d'une exposition répétée (Sawka et al., 2011). Une revue de littérature a ainsi montré que l'expansion moyenne du volume plasmatique est de 7 % après 14 jours d'entraînement, contre 3,5 % après 7 jours (Guy et al., 2014). De même, une adaptation minimale de la production de sueur requiert au moins 7 jours d'exposition répétée et active à la chaleur (Cotter et al., 1997). L'amplification des adaptations relatives à la durée du cycle d'exposition est, bien sûr, associée à une progression plus importante de la performance physique lors d'un exercice prolongé. Une amélioration de 14 % du temps imparti lors d'un exercice simulé de contre-la-montre de 40 km a ainsi été observée après 14 jours d'acclimatation naturelle en milieu chaud (*i.e.* Moyen-Orient) chez des sujets entraînés mais non habitués (*i.e.* originaires d'Europe du Nord), contre seulement 10 % de cette même performance après 6 jours (Racinais et al., 2015). D'autre part, de tels niveaux d'adaptation sont nécessaires lors de la préparation d'épreuves de longue durée (*i.e.* supérieures à 2 h) au cours desquelles des valeurs extrêmes de T_{CO} peuvent être atteintes (Guy et al., 2014).

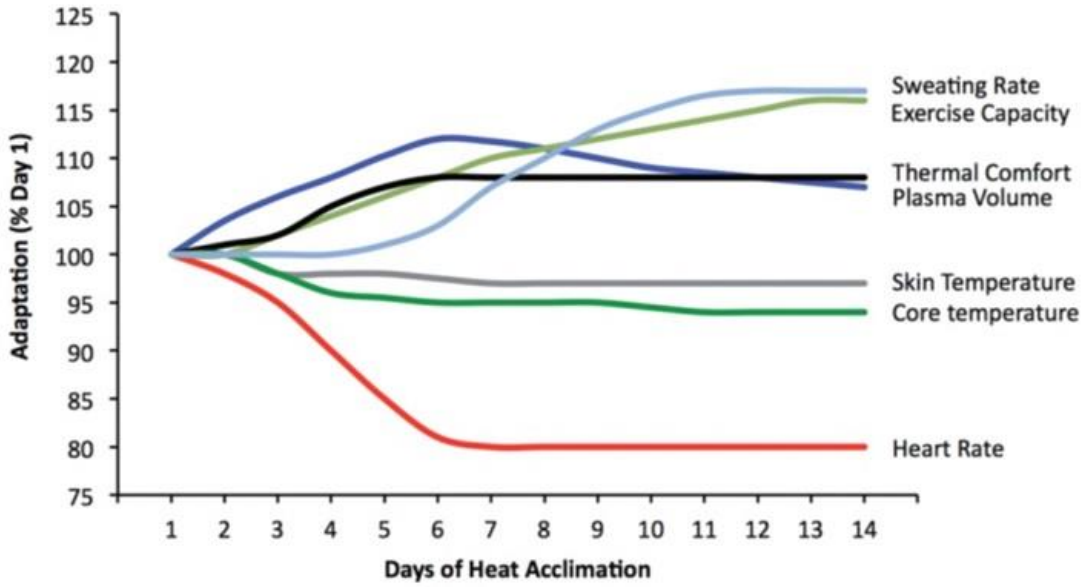


Fig. 28 Evolution de l'adaptation des diverses fonctions physiologiques et psychologiques au cours de 14 jours d'exposition répétée à la chaleur (issu de Périard et al., 2015).

Enfin, les bénéfices physiologiques issus d'une période d'acclimatation supérieure à 10 jours sont susceptibles d'être maintenus sur des périodes prolongées (*i.e.* 14 à 28 jours ; Périard et al., 2015), quand les effets d'un cycle de courte durée ne se maintiennent généralement pas au-delà d'une semaine (Garrett et al., 2011). Il est toutefois important de noter que les vitesses

d'adaptation et de dissipation des effets inhérents à l'acclimatation à la chaleur sont respectivement plus rapides et plus lentes à mesure que le sujet soit entraîné et/ou dispose d'un potentiel aérobie important (Pandolf et al., 1977), auquel cas les gains obtenus par un athlète entraîné sur une courte période seront supérieurs à la moyenne.

4.3.2. Acclimatation et mode d'entraînement

L'efficacité de la stratégie d'acclimatation dépend également du rapport entre volume et intensité appliqués pendant les sessions d'entraînement. De nombreux auteurs ont jusqu'à présent suggéré *i)* de limiter l'exposition à la chaleur à de longues séances pendant lesquelles une intensité faible à modérée (*i.e.* 50 à 60 % $\dot{V}O_{2max}$) aura été soutenue, et *ii)* de maintenir les séances à plus haute intensité dans des ambiances tempérées afin de garantir le stimulus d'entraînement recherché (Taylor and Cotter, 2006). Cette suggestion présente toutefois plusieurs limites majeures. En premier lieu, la répétition d'une même sollicitation métabolique et thermique génère, session après session, une habituation physiologique à l'origine d'une diminution sous-jacente du stimulus induit (Rowell et al., 1967). En d'autres termes, la chaleur devient progressivement « compensable » car les ajustements de la production et/ou de la dissipation de chaleur sont capables de limiter l'élévation de T_{CO}. De ce fait, les stimuli thermiques ne sont plus suffisants pour provoquer, à l'issue de la session, des réponses physiologiques sensibles chez l'individu. En second lieu, le maintien d'intensités faibles sur de longues périodes est susceptible de provoquer, en dépit du stress inhérent à l'exposition à la chaleur, un désentraînement de l'individu à plus forte raison lorsque celui-ci est expérimenté et participe à des compétitions de haut niveau. Inversement, la maximisation des effets recherchés lors de l'acclimatation nécessite le maintien récurrent du stimulus thermique (Horvath and Shelley, 1946) par une adaptation progressive de la charge métabolique relative à l'exercice ou des conditions ambiantes appliquées.

L'application de sessions dites « isothermiques » ou à hyperthermie contrôlée (*e.g.* atteinte puis maintien de T_{CO} à 38,5 °C sur la durée totale de l'exercice) génère des adaptations plus marquées sur de courtes périodes, notamment du point de vue cardiovasculaire, tout en permettant une réduction du volume global d'exposition à la chaleur (Garrett et al., 2011). Des adaptations similaires de T_{CO}, de la température cutanée, de la FC et du débit sudoral ont ainsi été observées à la suite d'un protocole à intensité fixe (*i.e.* sessions de 90 min à 50 % $\dot{V}O_{2max}$) et d'un protocole isothermique (*i.e.* sessions de 70-77 min à température « cible » 38,5 °C) soutenu pendant 5 puis 10 jours (Gibson et al., 2015). Si ce mode opératoire présente un intérêt

dans le cadre de périodes courtes de préparation, de telles applications ne correspondent pas aux modèles d'entraînement généralement appliqués sur le terrain. D'autre part, le contrôle de la charge thermique au cours de la session d'entraînement nécessite l'usage de technologies non-invasives de mesure de T_{CO}. Or celles-ci s'avèrent difficilement accessibles d'un point de vue financier, et pas toujours adaptées aux aléas de la pratique en conditions écologiques (voir Méthodologie). Le contrôle de l'intensité à partir du maintien d'un niveau constant de stress cardiovasculaire a été, par conséquent, proposé comme solution alternative (Périard et al., 2015).

La reproduction des intensités habituelles d'entraînement au cours de stages spécifiques d'acclimatation à la chaleur demeure ainsi la solution la plus adéquate, au vu des conditions de préparation et d'activité des athlètes. Elle se justifie même totalement dans les sports sollicitant la répétition d'efforts très intenses, par exemple les sports collectifs ou le tennis. En effet, deux études ont observé des améliorations spécifiques de la performance en ambiance chaude lors d'une épreuve d'effort à caractère intermittent (Sunderland et al., 2008) et lors de sprints répétés (Wingfield et al., 2016) à la suite de protocole d'acclimatation de courte durée (*i.e.* 4-5 jours) incluant un travail à hautes intensités. Surtout, les résultats obtenus par Wingfield et ses collaborateurs ont montré que les sujets acclimatés à partir d'exercices « à faible intensité » (*i.e.* 50 % $\dot{V}O_{2max}$) obtiennent de meilleures performances lors d'une épreuve de contre-la-montre de 20 km (+ 5,9 %), contrairement au groupe de sujets acclimatés « à haute intensité » (*i.e.* 75 % $\dot{V}O_{2max}$) pour lesquels ces gains post-entraînement ont été concentrés sur les épreuves à dominante anaérobie (*i.e.* contre-mouvement jump, 5 sprints répétés de 6 sec sur ergocycle…). La portée réelle de ces travaux demeure néanmoins limitée du fait de l'écart entre les intensités appliquées au cours du protocole expérimental d'une part, et les intensités réellement soutenues par exemple lors de sessions d'entraînement de type intermittent d'autre part.

Dans ce contexte, des allures proches de la vitesse ou de la puissance maximale aérobie sont répétées sur de très courtes périodes (*i.e.* généralement, entre 10 et 60 s) entrecoupées de phases de repos de durée similaires, dans le but de maintenir une sollicitation métabolique et cardiovasculaire très élevée (Dupont and Bosquet, 2007). La production de tels efforts pendant l'entraînement présente notamment l'intérêt majeur de pouvoir générer des stimuli thermiques élevés sur de très courtes périodes (*i.e.* gain de 1,8 °C lors d'une session de sprints répétés de 30 min ; Morris et al., 2000). Ainsi, la moindre durée nécessaire à une stimulation physiologique efficiente de l'organisme permet, en contrepartie, de réduire le volume d'exposition sous-jacent (Gibson et al., 2015). Dès lors, une stratégie d'acclimatation peut être proposée aussi bien en cours de préparation que lors de la dernière semaine précédant la

compétition et généralement dédiée, dans les sports d'endurance, à une large réduction du volume total d'entraînement (*i.e.* affûtage ; Le Meur et al., 2012). Il est toutefois nécessaire de veiller, lors de telles sessions d'entraînement, au stress physiologique globalement induit. En effet, il demeure probable que la contrainte thermique supplémentaire surajoutée à la charge d'entraînement habituelle puisse affecter la balance sympatho-vagale (Yamamoto et al., 2007) et solliciter fortement l'axe hypothalamo-hypophyso-surrénalien (Brenner et al., 1997). La surcharge fonctionnelle alors générée peut avoir des effets délétères sur la capacité de performance et de récupération de l'athlète, et ainsi contrecarrer l'efficacité de la stratégie d'acclimatation initialement proposée (Schmit et al., 2017). En conclusion, l'une des clés susceptibles d'optimiser la mise en place de protocoles d'acclimatation adaptés aux contraintes de l'athlète réside dans l'adaptation du volume d'entraînement ou de la construction des sessions d'entraînement, par exemple à travers le mode de régulation de l'intensité.

POINTS-CLES DE LA PARTIE 4

- Le principe d'une stratégie d'acclimatation à la chaleur est de générer, par une exposition active ou passive, des élévations répétées de la température corporelle destinées à stimuler l'adaptation des fonctions homéostatiques de l'organisme.

- La plupart des travaux scientifiques démontrent, suite à une phase d'acclimatation, une amélioration significative de la performance lors d'un exercice prolongé en ambiance chaude. D'un point de vue physiologique, ces améliorations sont le résultat potentiel du ralentissement de l'élévation de la température corporelle, de la diminution du stress cardiovasculaire, de l'élévation du débit sudoral ou de l'optimisation du confort thermique.

- Les protocoles d'acclimatation de courte durée (*i.e.* < 5 jours) génèrent des améliorations substantielles de performance. Ces progrès deviennent optimaux après 15 jours d'exposition répétée.

- Dans le cadre de la préparation d'athlètes entraînés, la reproduction des contenus d'entraînement habituels sur une période courte (*i.e.* < 7 jours) précédant la compétition s'avère la solution la plus adéquate. De plus, les sujets entraînés ont une aptitude supérieure à obtenir des progrès significatifs sur de telles périodes.

- La reproduction des intensités habituelles d'entraînement demeure une solution pertinente mais sous-utilisée. La possible surcharge fonctionnelle inhérente à la combinaison de ces intensités à la contrainte thermique nécessite toutefois certaines adaptations, parmi lesquelles une solution alternative pour réguler l'intensité.

PROBLEMATIQUE ET OBJECTIFS

Nous avons vu, à travers la présentation du cadre théorique, que la décision de moduler l'allure au cours d'une épreuve d'endurance est le fruit d'une interaction complexe entre diverses fonctions physiologiques ou psychologiques de l'organisme d'une part, et les conditions globales dans lesquelles se déroule l'épreuve d'autre part. Au cours des 25 dernières années, de nombreuses réflexions théoriques ont contribué à l'évolution des débats (Saint Clair Gibson et al., 2003 ; Marcora, 2008b ; Tucker, 2009 ; Amann and Secher, 2010 ; Noakes, 2012 ; Pageaux, 2014 ; Hureau et al., 2018). D'abord, en replaçant le cerveau au cœur de ces interactions. Puis, en considérant la régulation de l'allure comme un acte conscient initié par la perception de l'effort et la tolérance émotionnelle sous-jacente. Ainsi, plus cet équilibre global sera fragile et perturbé, et plus l'effort soutenu paraîtra difficile et intolérable à soutenir.

La chaleur est sans aucun doute l'un des facteurs susceptibles de perturber de manière significative et durable la perception de l'effort et/ou la motivation à maintenir une allure la plus élevée possible (Nybo et al., 2014 ; Flouris and Schlader, 2015). Dès lors, il semble indispensable de se préparer spécifiquement, en amont de l'épreuve, à cet environnement afin de pouvoir mieux le tolérer (Racinais et al., 2015). Parmi les stratégies possibles, une exposition à des températures ambiantes chaudes répétée plusieurs jours et dans des conditions écologiques de pratique est sans doute la solution la plus pertinente (Chalmers et al., 2014 ; Périard et al., 2015). En dépit du consensus sur la question, leur usage au quotidien dans la préparation des athlètes est loin de faire l'unanimité dans le sport de haut niveau (Casadio et al., 2016 ; Périard et al., 2017). Au-delà de la dissonance entre recommandations issues de la recherche scientifique et contraintes inhérentes au sport de haut niveau, la connaissance des adaptations fonctionnelles sous-jacentes comporte des zones d'ombre notamment sur le plan perceptif.

Ce manque de recul suggère des investigations complémentaires, en particulier sur *(i)* les moyens d'optimiser la charge d'entraînement appliquée et *(ii)* les conséquences d'un stage d'acclimatation à la chaleur sur la capacité de performance. Ces investigations ont été l'opportunité de proposer une approche méthodologique originale par l'application, dans le cadre expérimental puis en tant que modalité d'entraînement, d'un référentiel d'exercice basé sur la production d'intensités subjectives (*i.e.* exercice à RPE fixe). L'étude des réponses physiques sous-jacentes permettrait notamment une approche des paramètres affectifs et motivationnels inhérents à la régulation de l'allure.

L'objectif de cette thèse est de répondre aux inconnues relatives à la transposition de contenus habituels de préparation à des sessions en ambiance chaude soit :

- **Les moyens et méthodes d'optimisation de la charge d'entraînement**
- **L'approche de phénomènes annexes relatifs à l'entraînement et susceptibles de dégrader le niveau de performance de l'athlète entraîné**

La thèse se structure autour de trois études distinctes :

L'objectif de l'étude I a été de comparer les performances de deux solutions techniques pour le suivi de la température centrale en conditions écologiques (*i.e.* température gastro-intestinale *vs.* température frontale par capteur à annulation de flux). Elles l'ont ainsi été au repos, puis au cours d'un exercice sous-maximal reproduit en ambiance tempérée et chaude. Les résultats ouvriront notamment des perspectives destinées à améliorer le contrôle de la charge thermique pendant une session d'acclimatation à la chaleur.

Lors de l'étude II, notre intérêt s'est porté vers les possibles conséquences inhérentes à un stage d'acclimatation (*i.e.* contraintes d'ordre logistique, répétition de sessions exigeantes) sur l'état de forme global de l'athlète. La possible accumulation sous-jacente de fatigue mentale est susceptible de dégrader le niveau de performance lors des sessions d'entraînement et/ou à l'issue du cycle d'acclimatation. L'objectif était d'identifier, chez des sujets entraînés, les effets d'une fatigue mentale préalable sur la puissance produite à RPE-15 en ambiance tempérée et chaude. La distorsion de la perception de l'effort était notamment susceptible d'affecter les paramètres de sensation et de confort thermique pendant l'exercice.

Enfin, l'étude III a eu pour but de proposer une méthode alternative d'entraînement susceptible d'aider à la production de hautes intensités lors d'un cycle court d'acclimatation à la chaleur. La production d'intensités autorégulées par la perception de l'effort (*i.e.* RPE-9 à 19), sous forme de sessions continues et intermittentes, a été associée à une diminution significative du volume (*i.e.* 270 min). Les effets de ce protocole d'acclimatation ont été comparés à ceux produits par une approche plus classique (*i.e.* intensité fixe et peu variable, volume 350 min) lors de la reproduction pré-post entraînement de deux épreuves, soit un contre-la-montre de 20 km simulée et un test dit de « tolérance à la chaleur » consistant à maintenir des niveaux de RPE variable, toutes deux réalisées en ambiance chaude. Les conclusions de cette étude suggèrent notamment la mise en place d'une telle stratégie au cours de la semaine précédant la compétition (*i.e.* phase d'affûtage dans les sports d'endurance).

METHODOLOGIE

1. CARACTERISTIQUES DES POPULATIONS INCLUSES

1.1. Méthode d'évaluation des caractéristiques anthropométriques

La taille (en mètres) et la masse corporelle (en kilogrammes) de chaque sujet ont été respectivement contrôlés lors de la session d'inclusion de chaque protocole à l'aide d'une toise et d'un pèse – personne. L'indice de masse corporelle (IMC) a été ensuite calculé par le quotient de la masse par la taille au carré. Une estimation de la densité corporelle et du pourcentage de masse grasse a été réalisée à partir de la mesure des quatre plis cutanés (bicipital, tricipital, supra-illiaque et sous-scapulaire ; Durnin and Womersley, 1974) sur l'hémicorps droit par une pince de Harpenden®.

1.2. Méthode d'évaluation des caractéristiques physiologiques

Lors de chaque session d'inclusion, les sujets ont participé à une épreuve d'effort maximal de type triangulaire dans le but de déterminer individuellement PMA et/ou la consommation maximale d'oxygène ($\dot{V}O2_{max}$), la fréquence cardiaque maximale (FC_{max}) voire le premier et le second seuil ventilatoire. Les épreuves d'effort maximal ont été réalisées sur un ergocycle doté d'un capteur de puissance (Schoberer Rad Messtechnik, Jülich, Welldorf). Les sujets ont été invités à maintenir initialement une puissance de 100 W pendant 6 minutes, avant de l'augmenter de 30 W supplémentaires par intervalles de 2 minutes jusqu'à arrêt volontaire de l'exercice. Il a été demandé à chaque sujet de fournir ses pédales automatiques ainsi que son équipement personnel (*e.g.* cuissard court de cyclisme, chaussures) pour lui permettre d'évoluer dans les conditions les plus proches possibles de sa pratique. Afin de tenir compte de ses caractéristiques morphologiques, la configuration de l'ergocycle (*e.g.* distance entre selle et pédalier, distance entre bec de selle et guidon) a été systématiquement ajustée avec l'aide du sujet.

Les échanges gazeux ont été contrôlés à partir d'un analyseur télémétrique Oxycon (Oxycon, Jaeger, Germany). L'analyseur a été calibré avant chaque test par utilisation d'un gaz étalon en bouteille. La fréquence cardiaque (FC) a été contrôlée à partir d'un capteur de type Polar RS800 (Polar Electro, Kempele, Finland) interconnecté avec le moniteur de l'ergocycle. Les critères requis pour déterminer $\dot{V}O2_{max}$ sont *(i)* le contrôle d'un plateau de $\dot{V}O2$, *(ii)* une valeur de FC supérieure à 90 % de FC_{max} théorique et *(iii)* une valeur de quotient respiratoire supérieur à 1,1 (Howley et al., 1995). Si ces trois critères ont été préalablement vérifiés, alors $\dot{V}O2_{max}$ et FC_{max} ont été respectivement déterminées à partir des cinq valeurs consécutives les

plus hautes mesurées pendant le test d'effort. La puissance maximale aérobie a été déterminée à partir des trois valeurs consécutives les plus élevées au cours du dernier palier complété avant épuisement.

Les seuils ventilatoires ont été déterminés selon la méthode décrite par Beaver et al. (1986). Le premier seuil correspond au point d'inflexion cinétique de l'équivalent respiratoire en O2 ($\dot{V}E / \dot{V}O_2$), sans augmentation concomitante de l'équivalent respiratoire en CO2 ($\dot{V}E / \dot{V}CO_2$). Le second seuil correspond, quant à lui, au point d'inflexion avec augmentation concomitante de $(\dot{V}E / \dot{V}O_2$ et $(\dot{V}E / \dot{V}CO_2)$. La détermination de ces seuils a été réalisée par deux expérimentateurs indépendamment et leurs résultats ont été comparés à posteriori.

1.3. Description des populations incluses

Nous avons choisi d'orienter le recrutement vers des sujets entraînés en cyclisme et en triathlon. Les sujets inclus, de sexe masculin et âgés de 18 à 49 ans, relevaient d'un niveau de performance 3 selon la classification proposée par De Pauw et ses collaborateurs (2013), et pratiquaient au moins 5 h par semaine. Les valeurs moyennes des caractéristiques anthropométriques et physiques des sujets inclus pour chacun des protocoles ont été reportées dans le tableau 1.

Au cours de la session d'inclusion, chaque participant volontaire a rempli une fiche de renseignements médicaux permettant aux expérimentateurs de valider ou non son admissibilité. Les facteurs exclusifs retenus ont été les suivants :

- Poids inférieur à 36,5 kg
- Signalement d'une pathologie cardio – respiratoire (*e.g.* asthme), métabolique (*e g.* diabète), gastro – intestinale ou d'un cancer récent
- Signalement d'un désordre mental ou somatique à l'origine d'une altération des facultés de concentration
- Signalement d'une lésion osseuse, articulaire ou musculaire ayant entraîné un arrêt de l'entraînement d'une durée supérieure à un mois au cours des trois derniers mois,,
- Port d'un dispositif électronique intra – corporel (ex. pacemaker),
- Période suivie d'entraînement en ambiance chaude (> 30°C) de durée minimale une semaine au cours du mois précédant la session d'inclusion.

Enfin, toute planification d'une IRM dans les 5 jours qui suivent ou précèdent la session expérimentale pouvait entraîner le report de la session voire l'exclusion du sujet du protocole en cours, si les paramètres temporels définis pour le protocole ne pouvaient pas être suivis.

	ETUDE I	ETUDE II	ETUDE III
Nombre de sujets	7	11	17
Age (années)	27,3 ± 9,6	27,0 ± 8,6	35,4 ± 11,0
Taille (cm)	178 ± 10	179 ± 9	179 ± 6
Poids (kg)	69,8 ± 8,4	70,0 ± 7,7	72,9 ± 7,8
$\dot{V}O_{2max}$ ($ml.min^{-1}.kg^{-1}$)	61 ± 2	63 ± 5	*Non mesuré*
PMA absolue (W)	349 ± 58	346 ± 56	333 ± 40
PMA relative ($W.kg^{-1}$)	5,0 ± 0,4	4,9 ± 0,5	4,6 ± 0,5

Tab. 1 Description des caractéristiques anthropométriques et physiques moyennes des populations incluses aux études I, II et III.

2. PROTOCOLE D'EXERCICE DE REFERENCE

2.1. L'exercice à RPE fixe

Pour rappel, nous avons présenté lors du chapitre 2 du cadre théorique les caractéristiques et les conditions méthodologiques d'application de l'exercice à RPE fixe. A présent, nous décrirons ici les conditions dans lesquelles nous avons choisi de mettre en place ce mode d'exercice lors des protocoles expérimentaux.

Au cours de ces travaux de recherche, les sujets ont été essentiellement sollicités lors d'épreuves de durées variables (*i.e.* 5 à 30 min) impliquant la production de niveaux de RPE (*i.e.* « RPE clamp protocol »). Il a été demandé aux sujets de réguler au cours de ces exercices la puissance produite afin de maintenir constamment un même seuil de perception de l'effort, indépendamment du niveau de performance réellement soutenu, du temps restant ou des conditions environnementales.

Durant la session d'inclusion, chaque sujet a été familiarisé à ce profil d'exercice au cours d'un exercice de pédalage de 5 min à intensité subjective « difficile » (*i.e.* RPE-15 sur l'échelle 6-20 de Borg) répété deux fois. Un intervalle de récupération de 5 min a été fixé entre les deux blocs de travail. La capacité de chaque sujet à reproduire un effort régulé de manière

subjective a été déterminée par le calcul immédiat du coefficient de variation de la puissance moyenne, soutenue entre le premier et le second bloc de travail (Eston et al., 2015). Dans le cas d'un coefficient supérieur à 5 %, le sujet était sollicité lors d'un troisième bloc de travail de 5 min à même intensité subjective. Dans le cas où le coefficient de variation demeurait supérieur à 5 % suite au troisième bloc, le sujet était exclu du protocole car inapte.

Afin de prévenir toute sur- ou sous-estimation de la puissance développée (Weiser et al., 2007), un échauffement préalable de 5 min, à raison de 3 min à RPE-11 puis 2 min à RPE-15, a été systématiquement proposé à chaque sujet lors des études I et II. Au cours de l'étude III, l'épreuve dite « HST » a été construite de manière à observer une élévation progressive du seuil de RPE soutenu (*i.e.* 0-15 min : 5 min à RPE-11, 5 min à RPE-13 puis 5 min à RPE-15). Au cours de l'exercice, aucun feedback de quelque nature qu'il soit (*i.e.* temps et distance parcourue et/ou restante, valeurs instantanées ou moyenne de puissance, cadence, FC ou température corporelle) n'a été transmis au sujet, de manière à ce que la connaissance de ces informations ne puisse modifier sa perception de l'effort ou ses réponses motivationnelles (Tucker et al., 2006).

2.2. La chambre climatique

Toutes les sessions expérimentales se sont déroulées à l'intérieur d'une chambre climatique permettant de simuler un environnement chaud et sec (*i.e.* température ambiante entre 35 et 40 °C). Si certains modèles ont été spécifiquement développés pour la pratique sportive (*e.g.* Thermo Training Room), nous avons toutefois opté pour l'aménagement d'une cabine de sauna infrarouge classique (*i.e.* assemblage de panneaux modulaires en bois avec ouverture/fermeture hermétique). Les dimensions de la cabine (longueur 200 cm, largeur 200 cm, hauteur 250 cm) ont permis l'installation d'un ergocycle et offert des conditions optimales pour la simulation d'exercices de pédalage. Le chauffage de la chambre climatique est assurée par un ensemble de huit radiants infrarouges disposés de façon équidistante sur les parois intérieures, et à environ un mètre de hauteur au sol. Ces radiants sont capables d'émettre ensemble une puissance calorifique maximale et totale de 2 800 W. L'humidité et la composition de l'air est régulée à l'aide d'un système de ventilation mécanique capable d'extraire jusqu'à 120 m^3 d'air par heure, sans possibilité toutefois de moduler selon ses souhaits le taux d'humidité de la chambre climatique.

L'activation ou la désactivation des radiants infrarouges se contrôle par voie manuelle via un moniteur tactile apposé sur la paroi extérieure, ou par voie semi-automatique et

rétroactive via une sonde thermosensible fixée au plafond de la cabine. Lors des différents protocoles expérimentaux, nous avons opté pour le contrôle manuel des radiants infrarouges avec suivi visuel et instantané de l'évolution des conditions environnementales. Celles-ci ont été contrôlées à l'aide d'une station de mesure (Testo 435-2, Testo, Forbach, France) équipée d'une sonde thermo-anémométrique capable de mesurer en temps réel la température (*i.e.* degré de précision 0,01 °C), le taux d'humidité (*i.e.* degré de précision 0,01 %) et la vitesse de déplacement de l'air (*i.e.* degré de précision 0,1 $m.s^{-1}$). La sonde a été positionnée à proximité du guidon de l'ergocycle et à hauteur de tête du sujet (*i.e.* environ 1 m de hauteur par rapport au sol).

Fig. 29 A gauche, détail des dimensions au sol de la chambre climatique avec positionnement des panneaux radiants (*i.e.* triangles rouges à l'intérieur de la paroi) ; à droite, cliché pris à l'intérieur de la chambre climatique au cours d'un protocole expérimental.

Le système était connecté par voie USB à un ordinateur de type PC afin de rendre accessible les données relevées et échantillonnées par intervalle d'une seconde via le logiciel constructeur (Testo Comfort Basic x35).

3. MESURE DE LA TEMPERATURE CORPORELLE

3.1. Contrôle de la température centrale

3.1.1. Méthodes de référence

L'influence des variations de la température centrale (T_{CO}) sur la production musculaire justifie l'importance de son suivi continu au cours de l'exercice, en particulier lorsque la température ambiante s'élève. Pour rappel, la température dite centrale d'un organisme vivant correspond à la température du « noyau » corporel, en d'autres termes les organes vitaux et le cerveau. Au cours d'un exercice physique, l'amplitude de l'élévation de T_{CO} est approximativement proportionnelle à l'activité métabolique fournie par un individu dans un environnement tempéré et standardisé (Lind, 1963). Chez l'homme, T_{CO} au repos peut se fixer approximativement sur une large plage de température ambiante (*i.e.* de 13°C à 60°C). Le caractère homéotherme de l'être humain lui permet en effet de maintenir des valeurs de T_{CO} proches de 37 °C, alors que des variations à l'intérieur de l'intervalle 36-39 °C sont considérées comme normales en réponse à des activités basiques chez l'homme (*i.e.* sommeil, digestion, exercice musculaire).

La température du sang circulant par l'artère pulmonaire a été initialement proposée comme le marqueur de référence de T_{CO} (Bligh, 1957). Toutefois la procédure de mesure via l'implantation d'un cathéter à thermistance ne relève que du strict contexte médical. De multiples sites de mesure « déportée » de la température, en particulier au niveau des orifices, ont donc été proposés et étudiés (Taylor et al., 2014). Leur usage incite néanmoins à la prudence quant à d'éventuelles conclusions générales sur les adaptations physiologiques inhérentes à l'exercice. Par exemple, si l'élévation du métabolisme musculaire est à l'origine des variations de T_{CO}, pour autant sa valeur n'est en aucun cas le reflet instantané de la production de chaleur des muscles actifs. La régulation des réponses hémodynamiques est donc susceptible de modifier la distribution et les échanges de chaleur intra- et extracorporels, donc le temps de latence entre activité métabolique et réponse thermique (Saltin et al., 1998). D'autre part, il est nécessaire de tenir compte des disparités existantes entre les différents sites de mesure étant donné que chacun reflète, au moins partiellement, l'activité métabolique et les échanges de chaleur au niveau local (Taylor et al., 2014).

Dans le cadre de la recherche appliquée en physiologie de l'exercice, l'œsophage et le rectum constituent les deux points de contrôle les plus appliqués. L'œsophage constitue une zone de mesure pertinente par sa proximité avec la trachée, les bronches et certaines artères majeures (Cooper and Kenyon, 1957). La température à l'intérieur de l'œsophage est contrôlée

à partir d'une sonde thermosensible introduite par le conduit nasal ou par la trachée jusqu'à hauteur du ventricule cardiaque gauche, et reliée vers l'extérieur par un conduit filaire. Si les mesures issues de cette méthode présentent la corrélation la plus élevée avec la température mesurée à l'artère pulmonaire, la technique présente toutefois des limites au-delà du caractère invasif de la sonde utilisée. Les échanges ventilatoires et l'ingestion de liquides au cours de l'exercice constituent la principale source de variation locale de la température (Taylor et al., 2014). D'autre part, la profondeur d'insertion de la sonde thermosensible à l'intérieur de l'œsophage impacte la mesure en raison du gradient thermique dans le tractus gastro-intestinal (Caputa, 1980). Il est donc nécessaire de standardiser individuellement le protocole d'équipement du sujet (Mekjavic and Rampel, 1990).

De même, le point de mesure rectal a été considéré comme une référence en raison des faibles écarts observés avec des mesures simultanées de température de l'artère pulmonaire (*i.e.* entre 0,1 et 0,2 °C ; Fullbrook, 1993), ou encore de la stabilité relative des valeurs dans le temps. Toutefois, l'insertion d'une sonde thermosensible dans le rectum n'est pas acceptée, d'un point de vue psychologique, par tous les sujets et peut augmenter l'inconfort global perçu pendant l'exercice. D'autre part, la faible irrigation sanguine du rectum suppose que la température locale de cet organe rempli d'air présente une inertie trop importante pour être le reflet des réponses thermiques instantanées au cours de l'exercice (Mari et al., 1997). Les vaisseaux de l'artère hémorroïde au niveau desquels la température est mesurée (*i.e.* 10 à 15 cm au-delà du sphincter anal) irriguent insuffisamment le rectum pour induire des ajustements thermiques susceptibles de répondre aux variations de l'activité métabolique musculaire (Hansen and Netter, 2010). L'inertie thermique de cette zone tend même à croître à mesure que l'intensité de l'exercice et/ou la chaleur ambiante augmentent, du fait de la baisse de perfusion sanguine des viscères (Rowell et al., 1967). Par exemple, les variations de la température rectale au cours d'un exercice sinusoïdal ne représentent pas les variations dynamiques du stockage de chaleur et des réponses thermorégulatrices sous-jacentes (Todd et al., 2014). Enfin, la température rectale varie, de même que pour l'œsophage, en fonction de la profondeur d'insertion de la sonde (Caputa, 1980) alors que le gradient thermique du tractus gastro-intestinal diminue à mesure que la température ambiante s'élève (Buono et al., 2014).

3.1.2. Estimation à partir du point gastro-intestinal

Si l'estimation de T_{CO} à partir du point gastro-intestinal est une méthode appliquée de longue date (Beaumont, 1838), les récents développements technologiques en matière de

miniaturisation des capteurs électroniques et la conception de modules de recueils performants ont permis sa démocratisation en laboratoire ou sur le terrain (Byrne and Lim, 2007). La température gastro-intestinale peut être contrôlée par l'intermédiaire d'une thermistance intégrée à une capsule, ingérable par voie orale et reliée vers l'extérieur par transmission radio basse fréquence. La revue de littérature de Byrne et Lim présente un biais moyen acceptable (*i.e.* 0,1 ± 0,4 °C) entre les mesures gastro-intestinales et œsophagiennes simultanées, validant ainsi l'intérêt de cette méthode dans le contexte d'études de terrain.

Si le sujet accepte bien mieux d'un point de vue psychologique l'ingestion d'une gélule « électronique », toutefois le suivi de la température gastro-intestinale reste considéré comme invasif et sujet à risque, par exemple lors d'une exposition à des champs électromagnétiques pendant un examen par IRM. De plus, son utilisation présente des limites méthodologiques que nous avons tenu à prendre en compte dès le début du protocole. Tout d'abord, le délai entre ingestion de la gélule et début de l'exercice doit être standardisé à échelle individuelle (*i.e.* en moyenne, environ 6 heures ; Byrne and Lim, 2007) de manière à assurer la reproductibilité de la position de la gélule à l'intérieur du tractus gastro-intestinal. En effet, si le temps de transit d'une gélule à l'intérieur du tractus est de l'ordre de 24 à 28 heures (McKenzie and Osgood, 2004 ; Roach et al., 2010), sa variation peut néanmoins être importante à l'échelle intra- et interindividuelle (Goodman et al., 2009). Par exemple, les recueils issus des travaux de Roach (2010) ont relevé un écart maximal de 55 heures entre deux durées extrêmes de transit enregistrées pour un même individu ayant été suivi pendant plusieurs jours.

Ensuite, la reproductibilité de la mesure gastro-intestinale peut être affectée par la motilité du tractus gastro-intestinal et son action sur la vitesse de déplacement de la gélule (Keeling and Martin, 1987). Par exemple au cours d'un exercice, l'accentuation des réponses hémodynamiques (*i.e.* diminution de la perfusion sanguine au niveau splanchnique) ou encore les aliments ingérés avant la période de mesure peuvent accélérer ou ralentir ponctuellement le transit de la gélule (Rowell et al., 1968). La température mesurée peut également être influencée par la température des aliments et fluides ingérés si celle-ci est largement inférieure à 37 °C, et à plus forte raison lorsque la gélule se trouve dans l'estomac (Byrne and Lim, 2007). Ce point constitue en soi une limite majeure de l'usage de la gélule en conditions écologiques de compétition, notamment en conditions ambiantes chaudes. Enfin, une calibration préalable des gélules dans une série de bains d'eau à température « physiologique » (*i.e.* de 30 à 42 °C) améliore le niveau de précision de la mesure (Travers et al., 2016).

3.1.3. Estimation à partir de méthodes non invasives

L'estimation de T_{CO} à partir de méthodes non invasives constitue un enjeu de développement technologique réel pour les applications de laboratoire comme de terrain. Parmi les approches suggérées, la mesure de la température transcutanée s'appuie sur un constat : l'isolation préalable d'une surface corporelle permet de ralentir, à échelle locale, les échanges de chaleur avec l'environnement pour mieux retranscrire les réponses thermiques internes. Plusieurs prototypes de capteurs dits à « annulation de flux » ont ainsi fait l'objet de travaux de validation de la mesure de T_{CO}, avec positionnement au niveau du front et essentiellement en situation péri-opératoire chez des sujets anesthésiés (*e.g.* « Deep & Body Temperature » : Fox and Solman, 1973 ; Brain & Core Temperature : Dittmar et al., 2006; NICCT : Zeiner et al., 2010 ; 3M™ SpotOn™ : Eshraghi et al., 2014) ou en situation d'exercice (Teunissen et al., 2011 ; Janta et al., 2016). Les travaux de Teunissen et ses collaborateurs présentent ainsi, lors d'un protocole d'exercice sous-maximal en ambiance chaude (*i.e.* 35 °C ; 50 % d'humidité), une limite d'agrément acceptable (*i.e.* 0,4 °C) avec la température œsophagienne.

D'un point de vue technique, le capteur à annulation de flux est constitué de deux thermistances séparées par une couche isolante et d'un élément chauffant dans la partie supérieure. Ce dernier génère un flux de chaleur équivalent à celui mesuré entre les deux thermistances. La température cutanée locale varie et se stabilise dans le temps jusqu'à atteindre une valeur théoriquement équivalent à la température en profondeur. L'émission de chaleur dans le temps est par la suite régulée à l'aide d'une boucle de rétroaction. Concernant le positionnement du capteur, si plusieurs zones ont été envisagées pour l'estimation de T_{CO} pendant l'exercice, le front est considéré comme une position optimale du fait de la relative stabilité thermique de la zone proche (Janta et al., 2016).

La technologie « zero-heat-flow » présente cependant plusieurs limites techniques. Tout d'abord, l'élément chauffant nécessite un apport en énergie électrique. Le délai de réponse du capteur est plus long que celui d'une thermistance classique, à savoir environ 15 min avant stabilisation à 0,1°C près de la mesure, ce qui s'avère problématique en contexte d'exercice du fait des variations potentielles à court terme de T_{CO} (Matsukawa et al., 1996 ; Yamakage et al., 2002). Cependant, certaines innovations technologiques récentes (*e.g.* émission d'un flux intense de chaleur en début de mesure et ajustement des dimensions du capteur) tendent à limiter ce délai de réponse. Ensuite, le flux de chaleur émis par le capteur est susceptible d'être absorbé localement par les masses superficielles et d'élever artificiellement la température des tissus à très faible profondeur (Brajkovic and Ducharme, 2005). La mesure semble également sensible aux réponses hémodynamiques en surface (*e.g.* élévation du flux sanguin périphérique).

Fig. 30 Description du capteur à annulation de flux SpotOn (3M) exploité lors de nos protocoles expérimentaux (à gauche, schéma représentant la formation du tunnel isotherme à la surface de la peau ; à droite, cliché en situation de mesure).

3.1.4. Mesure au cours des protocoles expérimentaux

Au cours de nos travaux de recherche, nous avons opté pour *i)* un contrôle de TCO gastro-intestinale à partir d'une gélule thermosensible et *ii)* un contrôle de TCO transcutanée frontale à partir d'un capteur à annulation de flux.

Le contrôle de T_{CO} gastro-intestinal a été effectué via l'utilisation d'un système télémétrique (e-Celsius, Bodycap Medical, Caen, France) validé pour des mesures chez l'humain (Chapon et al., 2012). Afin d'assurer la reproductibilité des mesures, il a été demandé à chaque sujet d'ingérer la gélule à même heure (± 1 h) dans un délai de 6 à 12 h précédant chaque session expérimentale. Au cours des sessions, les données collectées par chaque capsule ingérable (*i.e.* longueur 17,2 mm, diamètre 8,2 mm et poids 2 g) ont été lues en temps réel via le module de recueil télémétrique spécifique. Celui-ci a été positionné en contact avec le sujet (*i.e.* fixé au niveau du bassin à l'aide d'un filet tubulaire, et protégé à l'intérieur d'une poche plastique). Les données échantillonnées par intervalles de 30 s ont été ensuite téléchargées depuis le module connecté par voie USB à un ordinateur de type PC, et à l'aide du logiciel fournisseur. L'influence de la température des liquides ingérés juste avant ou pendant l'exercice ont conduit à restreindre voire à empêcher l'hydratation des sujets à compter de 45 minutes avant le début de l'exercice de pédalage (Wilkinson et al., 2008). Les sujets ont toutefois été tenus d'absorber préalablement à leur visite un volume d'eau minimal de 500 ml afin de prévenir un éventuel risque de déshydratation. Cela étant l'efficacité de cette mesure est discutable, en effet un artefact généré par la consommation de fluides à basse température implique potentiellement un délai supérieur à 11 heures avant dissipation totale. Il leur a été

également demandé de consommer la même quantité et le même type d'aliments lors des deux repas précédant chacune des sessions expérimentales, afin de limiter l'influence du bol alimentaire sur la motilité gastrique pendant l'exercice. Enfin, l'absence d'une calibration préalable de la gélule à divers seuils de température peut constituer une limite méthodologique notable de nos différents protocoles.

Le contrôle de T_{CO} transcutanée frontale (*i.e.* lors de l'étude I) a été assuré à partir d'un système de type SpotOn (3M, Germany) composé d'un moniteur à affichage électronique et d'un capteur connecté par voie filaire. Le capteur prend la forme d'un patch autocollant de diamètre 41 mm et d'épaisseur 5 mm intégrant un double système électronique (circuit imprimé et thermocouple) imbriqué dans plusieurs couches de mousse isolante. Il a été positionné au niveau du front (*i.e.* au – dessus de l'orbite droite), après que la zone de fixation ait été préalablement dégraissée à l'aide d'alcool à 70 °C. Le système aura été activé au moins 15 minutes avant le début de chaque session expérimentale, afin de disposer d'un délai suffisant de stabilisation de la mesure. Etant donné que le moniteur d'affichage ne permet aucune mémorisation des données, les mesures continues ont été capturées lors des sessions expérimentales à l'aide d'un caméscope enregistreur positionné face à l'écran du moniteur. Les données ont été ensuite relevées sur le film d'enregistrement par intervalles de 30 s.

3.2. Contrôle de la température cutanée

3.2.1. Généralités

La température cutanée constitue un indicateur majeur de la contrainte thermique subie par le sujet en contexte de vie libre ou bien d'exercice. Le contrôle en continu de la température cutanée peut être exploité dans le but d'étudier les réponses physiologiques (*i.e.* gradient de température centrale-cutanée ; Cuddy et al., 2014) et psychophysiologiques (*i.e.* sensation et confort thermique ; Flouris and Schlader, 2015) à l'environnement dans lequel le sujet évolue.

La variation locale de la température cutanée est le reflet des échanges thermiques locaux entre le corps et l'environnement extérieur. Par conséquent, de nombreux facteurs sont susceptibles d'influencer, de manière plus ou moins importante et selon le contexte (*i.e.* repos *vs.* exercice), les variations locales de température mesurées à la surface de la peau. Ces facteurs sont principalement reliés à la production locale de chaleur, aux échanges de chaleur intracorporels (*i.e.* influencés par la vasoconstriction ou la vasodilatation) ou avec l'environnement (*i.e.* amplitude des échanges par convection en fonction du mouvement du corps), aux caractéristiques de l'individu (*e.g.* origine ethnique, adiposité sous-cutanée...) ou à

la méthodologie de mesure appliquée (*e.g.* type de capteur, mode de fixation…). La tenue vestimentaire portée par le sujet impacte également de manière significative les échanges de chaleur entre corps et environnement, en particulier par rayonnement (*i.e.* teinte du textile) et par évaporation (*i.e.* composition textile, humidité résiduelle déjà absorbée).

D'autre part, la température cutanée n'est pas uniforme sur l'ensemble de la surface corporelle. A l'inverse, la variabilité des températures de surface localement mesurées est plus ou moins importante selon l'activité métabolique corporelle et la condition ambiante. Par exemple, une amplitude de 13,4 °C est observée entre le point corporel le plus « froid » (*i.e.* auriculaire ; 21,1 °C) et le plus « chaud » (*i.e.* nuque ; 34,5 °C) alors que le sujet au repos évolue dans une température ambiante froide. Cette même amplitude tombe à moins de 3 °C (*i.e.* mollet *vs.* gorge : 34,1 *vs.* 36,8 °C) lors qu'il évolue en ambiance chaude (Arens and Zhang, 2006).

Par conséquent, l'estimation de la température cutanée à l'échelle corporelle nécessite une méthode de calcul avec intégration de plusieurs mesures simultanées localisées sur diverses zones. Ces méthodes d'estimation prennent généralement la forme de sommes pondérées des températures locales mesurées sur un nombre de sites, ce nombre variant d'une équation à une autre. Le coefficient de pondération de chaque mesure locale est en principe déterminé par la fraction de la surface corporelle totale que représente le site contrôlé. Plusieurs revues de littérature font ainsi état de l'ensemble des méthodes d'estimation suggérées au cours du temps dans le domaine de la physiologie environnementale (Choi et al., 1997). Il a été notamment proposé, à l'issue de cette revue, que la validité et la reproductibilité de l'estimation de température cutanée moyenne soit considérée comme satisfaisante dès lors qu'un minimum de sept sites, incluant le pied et la main du fait de leur extrême sensibilité aux changements thermiques, puissent être contrôlés tout au long de la phase de mesure.

Du point de vue technique, la mesure de la température cutanée pendant l'exercice s'effectue à partir de capteurs de surface en contact avec la peau, ou par l'intermédiaire d'une caméra thermique infrarouge. La méthode dite de thermographie infrarouge (Lahiri et al., 2012) présente comme atouts majeurs, d'une part, de ne pas nécessiter de manipulations préalables et chronophages sur le plan méthodologique (*e.g.* fixation des capteurs), d'autre part, de ne pas contraindre la liberté de mouvement et le confort du sujet par la présence de fils en particulier lors de certaines tâches physiques (*e.g.* course à pied). Les mesures de température cutanée par thermographique infrarouge présentent de très larges corrélations avec les valeurs issues de thermistances en contact avec la peau, que ce soit au repos (r = 0,99 ; Matsukawa et al., 2000) ou pendant l'exercice (r = 0,98 ; Buono et al., 2007), et indépendamment de la température ambiante. L'application de la thermographie infrarouge, lors d'un protocole en laboratoire,

requiert néanmoins d'appliquer un cadre méthodologique strict en particulier dans la régulation de la température ambiante et des flux d'air à l'intérieur de la pièce (Ring and Ammer, 2000).

3.2.2. Mesure au cours des protocoles expérimentaux

Au cours des études I et II, nous avons privilégié l'application de la méthode dite de Ramanathan (1964) basée sur une estimation à partir de quatre sites de mesure (*i.e.* poitrine, triceps brachial, cuisse, jambe) selon la formule suivante :

$$\boldsymbol{T_{SK}\,moyenne = 0{,}34 * T_{SK}\,(poitrine) + 0{,}15 \times T_{SK}\,(triceps\ brachial) + 0{,}33 * T_{SK}\,(cuisse) + 0{,}18 * T_{SK}\,(jambe).}$$

Si cette méthode présentait des avantages du point de vue méthodologique (*i.e.* pose d'un nombre réduit de capteurs), son niveau de précision reste néanmoins discuté et nous a amené à proposer une évolution lors de l'étude III. Nous avons ainsi opté pour la formule dite ISO standard (2004) avec intégration de huit sites distincts (*i.e.* front, poitrine, épaule, biceps brachial, triceps brachial, main, cuisse, jambe) :

$$\boldsymbol{T_{SK}\,moyenne = 0{,}07 * T_{SK}\,(front) + 0{,}175 * T_{SK}\,(épaule) + 0{,}175 * T_{SK}\,(poitrine) + 0{,}07 * T_{SK}\,(biceps\ brachial) + 0{,}07 * T_{SK}\,(triceps\ brachial) + 0{,}05 * T_{SK}\,(main) + 0{,}19 * T_{SK}\,(cuisse) + 0{,}2 * T_{SK}\,(jambe).}$$

Du point de vue technique, nous avons opté pour un suivi de la température cutanée à partir de thermistances à résistance de platine de type Pt-100 isolées (EUS VL P2, Grant Instruments, Cambridge, UK). Nous avons privilégié cette méthode à d'autres, par exemple la thermographie infrarouge. En effet, les flux d'airs générés par l'ergocycle et/ou l'usage temporaire du ventilateur pouvaient modifier de manière importante l'équilibre thermique de la chambre climatique, dont le volume était de seulement 4 à 5 m^3, et ainsi créer artificiellement une volatilité importante des mesures. D'autre part, le coût d'une caméra thermique infrarouge de haute performance s'est avéré largement supérieur à nos possibilités budgétaires.

Les thermistances à résistance de platine ont été reliées par voie filaire à un système d'acquisition de données (DMM 2700, Keithley Instruments, Cleveland, Ohio) équipé d'une carte 20 voies, et connecté à un ordinateur de type PC. Les mesures initiales de résistance (en ohms) étaient collectées en continu et temps réel (*i.e.* une donnée par intervalle de 15 s) puis récupérées en fin de protocole à partir d'un tableur Excel spécialement configuré via un logiciel

fournisseur « add-on ». Un pré-calibration des sondes à deux points a été systématiquement effectuée avant chaque protocole de manière à établir les équations linéaires nécessaires au calcul de la température à partir de la valeur de résistance initiale. Pour cela, les sondes ont été plongées d'abord dans une eau à température 20-25 °C pendant 3 min puis, après une phase de séchage, dans une eau à température 40-45 °C sur une période de même durée. La dernière minute de chaque phase d'enregistrement a été conservée en tant que référence. La température de l'eau a été contrôlée à l'aide d'un thermomètre à mercure classique (précision 0,1 °C).

Lors de la phase d'équipement du sujet, la base inférieure de chaque capteur a été fixée à la peau à l'aide d'un adhésif transparent et imperméable (Blenderm, 3M, Germany). La zone de fixation du capteur a été préalablement dégraissée à l'alcool puis séchée afin d'optimiser la conductivité thermique. Le point de fixation de chaque capteur a été ensuite renforcé à l'aide d'un filet tubulaire médical, de manière à prévenir un éventuel décollement du capteur causé par la force de traction du fil vers le bas. Le protocole de fixation du capteur est susceptible d'influencer les mesures issues de la sonde, en particulier au cours de l'exercice (Psikuta et al., 2014). Nous avons donc veillé à appliquer systématiquement le même mode opératoire à chaque expérimentation.

4. MESURE DES MARQUEURS PHYSIOLOGIQUES

4.1. Mesure de la fréquence cardiaque

La FC a été enregistrée de manière continue au cours des différentes sessions expérimentales à l'aide d'un moniteur de type Garmin (Garmin, Olathe, KS) validé pour la mesure en situation d'exercice (Gillinov et al., 2017). La connexion directe de ce dernier avec le moniteur de contrôle de l'ergocycle Wattbike permet une synchronisation des mesures de FC et des paramètres mécaniques suivis pendant l'exercice. Les données, restituées sous forme moyennée par intervalles de temps de cinq secondes, ont été récupérées après l'exercice par téléchargement depuis un ordinateur de type PC.

4.2. Contrôle des marqueurs urinaires

Le contrôle de la gravité urinaire en début de session expérimentale a eu pour but de vérifier le niveau d'hydratation préalable des sujets. Ces derniers ont donc été systématiquement invités à remettre, dès leur arrivée au laboratoire, un échantillon frais d'urine de 50 à 60 ml. Celui-ci a été ensuite analysé à l'aide d'une bandelette réactive spécifique

maintenue environ 45 s dans le liquide. Dans le cas où le changement de couleur du réactif révélait une gravité supérieure ou égale à 1,02 g par ml d'urine, alors le sujet était invité à consommer un volume d'eau supplémentaire équivalent à 0,5-0,7 % de son poids de corps.

4.3. Contrôle des marqueurs sanguins

La concentration sanguine en lactates [La-] a été contrôlée à partir d'un échantillon de sang de 5 µl, prélevé au niveau du lobe de l'oreille puis analysé immédiatement à partir du système Lactate Pro (LT-1710, Elitech, Puteaux, France). L'usage de cet appareil aura été préalablement validé dans la littérature (Bonaventura et al., 2015). La zone de prélèvement aura été d'abord nettoyée à l'alcool puis séchée avant application d'une lancette stérile. La mesure de [La-] est systématiquement répétée *(i)* avant le début de l'exercice puis *(ii)* au cours de la première minute qui suit la fin de l'exercice, ce afin de déterminer l'amplitude des variations.

Au cours de l'étude III, la concentration du taux hématocrite (HST) a été dosée à partir d'un échantillon de sang de 65 µl prélevé au niveau du lobe de l'oreille et recueilli via un capillaire héparinisé. Afin de favoriser l'afflux sanguin local lors du prélèvement, une vasodilatation du lobe de l'oreille a été préalablement provoquée par l'application d'une crème chauffante (Finalgon, Boehringer Ingelheim Intl, Germany), environ 10 min avant le prélèvement. L'échantillon a été immédiatement analysé à l'aide de l'appareil I-STAT (Abbott, Lake Bluff, IL) par injection à l'intérieur de la cartouche spécifique EC4+. Cet outil présente, d'un point de vue clinique, une excellente concordance avec des méthodes plus conventionnelles de dosage du taux hématocrite (*i.e.* spectrophotométrie, numération via microscope ; Rudolf et al., 2015). Le taux d'hémoglobine est ensuite estimé indirectement par l'appareil à partir du taux hématocrite mesuré. Le calcul de l'expansion pré-post acclimatation du volume plasmatique sanguin, marqueur dont la variation reflète le niveau d'acclimatation physiologique à la chaleur, a été estimé à partir des taux d'hémoglobine et hématocrite relevés par l'intermédiaire des formules proposées dans l'étude de Greenleaf et al. (1979).

4.4. Contrôle des marqueurs sudoraux

Au cours de l'étude III, les pertes hydriques induites par l'exercice ont été estimées à partir de la différence des masses corporelles nues relevées avant (*i.e.* à l'arrivée du sujet au laboratoire) et à la fin de l'exercice. La pesée a été effectuée à l'aide d'une balance électronique (Tanita, Tokyo, Japan) disposant d'un niveau de précision de 0,1 kg. En fin d'épreuve, la pesée a été généralement effectuée dans un délai de 3 à 4 min après arrêt de l'exercice. Le volume

d'eau total ingéré par le sujet au cours du protocole expérimental a été quantifié puis intégré au calcul des pertes hydriques totales.

Afin d'observer les éventuels effets de l'acclimatation à la chaleur sur la rétention minérale intracellulaire, la concentration sudorale en ions sodium [Na+] a été quantifiée à partir d'échantillons prélevés au cours de l'étude III. Pour recueillir ces échantillons, une compresse stérile non tissée (5 x 5 cm) a été fixée sur chaque omoplate du sujet en dessous d'un film adhésif transparent (Tegaderm, dimension 10 x 10 cm, 3M). Préalablement à leur installation, la peau a été nettoyée à l'aide d'alcool à 70 °C puis rincée à l'eau distillée avant séchage. Puis ces mêmes compresses, devenues humides en fin d'exercice, ont été prélevées à l'aide d'une pince stérilisée et déposées chacune dans une seringue stérile afin d'en extraire la sueur. Les échantillons de ± 5 mm ont été conservés à l'issue de l'exercice dans des tubes de type Eppendorf afin d'être congelés à -18°C et conservés jusqu'à exécution des analyses.

La quantification des concentrations minérales des différents échantillons de sueur a été effectuée par application de la méthode d'analyse dite de spectrométrie d'absorption en flamme, dans les locaux et par le personnel du laboratoire PROTEE (Processus de Transferts et d'Echanges dans l'Environnement) rattaché à l'UFR des Sciences de Toulon. Un spectromètre d'absorption atomique (Spectraa 800, Verian, Palo Alto, CA) a été utilisé pour ces analyses et paramétré de la manière suivante : longueur d'onde 589,6 nm ; largeur de fente 0,2 nm ; courant de la lampe 5,0 mA. Le dispositif expérimental utilisé en absorption atomique comprend une source (lampe à cathode creuse), une nébulisation et un brûleur, un monochromateur, un détecteur relié à un amplificateur et un système d'acquisition (le logiciel de traitement SpectrAA 4.1). Préalablement à chaque test, un étalon multi-élément a été établi. Des solutions standards concentrées à (1 000 +- 2) $\mu g.mL^{-1}$ et diluées à l'aide d'eau distillée dé-ionisée (Millil-Q) ont été utilisées pour établir la gamme d'étalonnage externe est réalisée par dilution de la solution stock. Les concentrations respectives ont permis d'obtenir une courbe qui reste dans le domaine linéaire. A chaque volume de 50 mL de standard de calibration, 1 mL d'acide nitrique a été ajouté afin de maintenir les éléments libres en solution. Au vue des concentrations élevées en éléments à doser la même procédure a été utilisée pour la dilution des échantillons.

5. MESURE DES MARQUEURS NEUROMUSCULAIRES

Au cours de l'étude II, la répétition de tests neuromusculaires avant et après l'exercice à RPE fixe a eu pour but d'observer l'évolution des marqueurs centraux et périphériques de la

fatigue sous-jacente à la tâche de pédalage. Il a été demandé au sujet de produire, dans l'ordre, *(i)* deux contractions maximales volontaires isométriques des extenseurs du genou (CMVi) pendant 4 s sans stimulation électrique surimposée, *(ii)* deux CMVi pendant 4 s avec application d'une stimulation supramaximale doublée (*i.e.* 100-Hz), suivies après le relâchement de la contraction par deux stimulations supramaximales doublées (*i.e.* 10-Hz puis 100-Hz) et une stimulation simple. Chacune de ces étapes a été répétée deux fois avec un temps de récupération minimum intermédiaire de 45 s. Le protocole a été systématiquement précédé d'un échauffement de 5 min, sous forme de contractions isométriques sous-maximales répétées.

Pour la réalisation de ces tests, le sujet a été installé en position assise sur un appareil de musculation classique de type « leg extenseur » adapté pour la production de contractions isométriques (*i.e.* angle tronc – cuisse de 100 ° ; angle cuisse – jambe de 90 ° ; 0 ° correspond à un angle d'extension maximal). Dans un souci de limiter les mouvements parasites du sujet lors de la contraction isométrique, le sujet a été fixé à l'appareil musculaire à hauteur de poitrine et de cheville (*i.e.* au niveau du bras articulé de l'appareil) par l'intermédiaire de sangles rigides fixées elles-mêmes à l'appareil de musculation. Il a été systématiquement demandé au sujet de conserver tout au long du test une position stable et identique en prenant appui sur la sangle avec les mains croisées et en maintenant les fesses en contact avec le siège. Les sujets ont été systématiquement encouragés par les expérimentateurs.

La technique de neurostimulation consiste à appliquer une stimulation électrique sur le nerf moteur d'un muscle lors d'une contraction maximale volontaire dans le but d'obtenir des réponses mécaniques (*i.e.* secousse musculaire ou « twitch ») et électro-physiologiques (*i.e.* onde M) associées (Place, 2004). Au cours de cette phase de contrôle, les stimulations électriques ont été délivrées par voie percutanée au niveau du nerf fémoral droit, dans le but de provoquer la contraction réflexe des muscles extenseurs du genou. Les impulsions électriques ont été délivrées par un neurostimulateur (DS7 Digitimer®, Herthfordshire, Royaume-Uni) et ont circulé via une cathode sous forme d'une électrode auto-adhésive de diamètre 10 mm positionnée au niveau de l'aine, soit entre 3 et 5 cm en dessous du ligament inguinal. Une anode sous forme d'une électrode auto-adhésive (50 x 90 mm, Dura-Stick premium, Compex Medical, Eclublens, Suisse) a été positionnée à hauteur du grand trochanter afin de compléter le circuit électrique de stimulation neuromusculaire. Un signal électrique carré d'une durée d'impulsion de 1 ms et d'un voltage maximal de 400 V a été généré par le neurostimulateur. L'intensité de stimulation supramaximale du signal électrique, modulable à partir de l'appareil, a été déterminée via une méthode d'évaluation avec augmentation progressive de l'intensité jusqu'à l'atteinte d'une stabilité des réponses électro-physiologiques (*i.e.* onde Mmax) et mécaniques

associées. 130 % de cette valeur a été systématiquement appliqué lors des sessions expérimentales, soit des valeurs d'intensité comprises entre 80 et 130 mA.

Afin de contrôler les réponses électro-physiologiques pendant le test (*i.e.* onde M ou M-wave), la méthode non-invasive dite d'électromyographie (EMG) a été appliquée dans le but de quantifier l'activité des unités motrices du vaste latéral du quadriceps droit (VL). Deux électrodes auto-adhésives (Contrôle Graphique Médical, Brie-Comte-Robert, France, Ag/AgCl, diamètre 10mm) ont été fixées sur l'axe longitudinal du muscle selon les recommandations proposées par la SENIAM (Surface Electromyography for the Non Invasive Assesment of Muscle ; Hermens et al. 2000), alors qu'une électrode de référence a été placée sur la face supérieure de la rotule droite afin d'éliminer la présence de bruits parasites. Une préparation de la peau destinée à réduire l'impédance (*i.e.* strictement inférieure à 5 kΩ) a été préalablement appliquée (*i.e.* rasage des poils, abrasion puis dégraissage par application d'alcool modifié à 70°). Les signaux EMG et mécaniques ont été recueillis par un système d'acquisition multicanaux (Biopac MP150A) et analysés à partir d'un logiciel fournisseur de type PC (Acknowledge). Les signaux EMG ont été échantillonnés à une fréquence de 2000 Hz, amplifié avec un gain de 1000 et filtré via une bande passante de 1 Hz à 5 KHz (*i.e.* taux de réjection de mode commun 110 dB, entrée d'impédance 1000 MΩ).

La force produite lors des contractions isométriques a été mesurée à l'aide d'un capteur (F501TC, 200 daN, TME, Orgeval, France) fixé entre le bras articulé et le châssis de l'appareil. La force maximale isométrique des extenseurs du genou (CMV_f) a été déterminée à partir de la valeur dite « plateau », ou soutenue sur une durée minimale de 250 ms, la plus élevée parmi les deux répétitions. Outre la réponse mécanique (*i.e.* « twitch » potentiée), la réponse périphérique basse fréquence est calculée à partir du ratio des réponses mécaniques potentiées aux stimulations électriques doublées à 10Hz et 100Hz (*i.e.* ratio 10/100). Enfin, le niveau d'activation volontaire (VAL), qui reflète le recrutement des unités motrices pendant la CMV, a été calculé à partir de la formule suivante (Allen et al., 1995) :

$$VAL = \left[1 - \frac{amplitude\ du\ doublet\ surimposé}{amplitude\ du\ doublet\ potentialisé}\right]$$

Lorsque la surimposition n'était pas appliquée au pic de force, un coefficient de correction de CMV_f a été appliqué (Strojnik and Komi, 1998) :

$$VAL = \left[1 - \frac{amplitude\ du\ doublet\ surimposé \times (Mstim - CMV)}{amplitude\ du\ doublet\ potentialisé}\right]$$

6. MESURE DES MARQUEURS PSYCHOPHYSIOLOGIQUES

6.1. Contrôle préexercice de l'état de forme du sujet

Dans un souci de reproductibilité de l'état de forme préexercice du sujet, l'état de fatigue générale et la qualité du sommeil lors de la nuit qui précède la session ont été systématiquement évalués lors de son arrivée au laboratoire par le biais d'échelles tracées sur papier (longueur 100 mm) et cotées à la main. Les sujets ont répondu aux questions suivantes :

- Q1 : Etes-vous fatigué ? (0-mm : pas du tout ; 100-mm : extrêmement)
- Q2 : Avez-vous bien dormi la nuit précédente ? (0-mm : meilleure nuit possible ; 100-mm : plus mauvaise nuit possible)

6.2. Contrôle préexercice de l'humeur

Lors de l'étude II, le questionnaire dit BRUMS (Brunel Mood Scale ; Terry et al., 2003) a été soumis aux sujets dans le but de caractériser de manière détaillée leur humeur instantanée. Le questionnaire comporte ainsi 24 items répartis en 6 thématiques distinctes : « colère », « confusion », « dépression », « fatigue », « tension » et « énergie ». Pour chaque item, le sujet doit indiquer, sur une échelle de 5 points, une note allant de 0 (« pas du tout ») à 4 (« extrêmement » en rapport avec la réalité de son humeur. Les notes des items correspondant respectivement à chacune des thématiques sont ensuite additionnées.

6.3. Contrôle de la perception de l'effort

Si la majeure partie des sessions expérimentales lors des deux protocoles ont consisté à produire et maintenir différents niveaux de RPE (voir partie 3), il a toutefois été demandé aux sujets d'estimer, au cours des épreuves TT et HST proposées lors de l'étude III, la difficulté subjective et globale de l'effort réalisé à partir de l'échelle RPE 6-20 dite de Borg en réponse à la question « Comment percevez-vous l'effort produit instantanément ? ». La question et l'échelle ont été adressées visuellement aux sujets par l'intermédiaire d'un panneau affiché face à l'ergocycle. Ces derniers ont ensuite répondu oralement à l'expérimentateur.

6.4. Contrôle de la perception thermique

Les paramètres de sensation et de confort thermique ont été contrôlés à partir d'échelles visuelles analogiques spécifiques (Gagge et al., 1969). L'expression de la sensation thermique fait suite à la question « Comment percevez-vous l'environnement thermique ? » et aura été

coté par une note comprise entre -3 (*i.e.* équivalent à « très froid ») et 3 (*i.e.* équivalent à « très chaud »). L'expression du confort thermique fait suite à la question « Vous sentez-vous à l'aise dans l'environnement thermique ressenti ? » et aura été coté par une note comprise entre 0 (*i.e.* équivalent à « confortable ») et 3 (*i.e.* équivalent à « pas du tout confortable »). Dans les deux cas, les questions et les échelles ont été adressées visuellement aux sujets par l'intermédiaire d'un panneau affiché face à l'ergocycle, ces derniers ont ensuite répondu oralement à l'expérimentateur.

6.5. Contrôle post-exercice de la charge subjective

Lors de l'étude II, le questionnaire NASA – TLX (The National Aeronautics and Space Administration Task Load Index ; Hart and Staveland, 2005) a été appliqué dans le but d'évaluer la charge de travail individuel dite subjective. Le sujet doit répondre à une série de six questions, chacune en rapport avec un item, en reportant une note sur une échelle divisée en vingt intervalles identiques alors que l'ensemble étant encadré par une description bipolaire. Les cinq binômes « item / question » retenus (*i.e.* il en existe six mais le paramètre dit de « contrainte temporelle » n'a pas soulevé notre intérêt lors du protocole en question) sont les suivants :

- Difficulté Mentale, « Quel était le niveau de difficulté mentale de la tâche ? »
- Difficulté Physique, « Quel était le niveau de difficulté physique de la tâche ? »
- Performance, « Pensez-vous avoir réussi à accomplir ce que l'on vous a demandé ? »
- Effort, « A quel point l'exercice fut – il difficile à accomplir ? »
- Frustration, « Etes-vous stressé ou découragé suite à la réalisation de la tâche ? »

PRESENTATION DES TRAVAUX EXPERIMENTAUX

ETUDE I

A COMPARATIVE STUDY OF TWO AMBULATORY CORE TEMPERATURE ASSESSMENT METHODS

G. ROUSSEY[1, 3], C. GEHIN[2], B. MASSOT[2], I. AIT ALI[3], T. BERNARD[1]

[1] Université de Toulon, LAMHESS, Toulon, France

[2] Lyon Institute of Nanotechnologies (INL), Biomedical Sensors Group, INSA-Lyon, Villeurbanne, France

[3] Cityzen Sciences, Villeurbanne, France

Ce travail a fait l'objet d'une publication dans une revue scientifique indexée :

Roussey, G., Géhin, C., Massot, B., Ali, I. A., Bernard, T. (2018). A Comparative Study of Two Ambulatory Core Temperature Assessment Methods. IRBM, 39(2), 143-150.

Objectifs. Afin de répondre au besoin d'identifier des solutions non-invasives de monitoring ambulatoire de la température centrale, l'objectif de cette étude est d'évaluer le potentiel de performance d'un capteur thermique dit « à annulation de flux » (ZHF) positionné au front, comparativement à une méthode de référence et dans différentes conditions ambiantes et physiologiques.

Méthodes. Sept sujets entraînés de sexe masculin (âge 27,3 ± 9,6 ans) ont participé à *i)* une phase de mesure de 45 min au repos (STA) et *ii)* un exercice autorégulé (*i.e.* RPE-15) de 25 min reproduit en ambiance tempérée (TMP, 22.8 °C) et chaude (HOT, 38.5 °C). Le capteur dit « à annulation de flux » (SpotOn™, 3M™, Germany) a été positionné au-dessus du lobe occipital droit puis relié à un moniteur système. La température gastro-intestinale mesurée à partir d'une gélule thermosensible (E-Celsius©, Bodycap Médical, France) ingérée 6-12 h avant le début du protocole a été considérée comme point de référence.

Résultats. L'écart observé entre TCO_{zhf} et TCO_{pill} est de l'ordre de -0,23 ± 0,13, 0,15 ± 0,30 et 0,28 ± 0,38 °C en STA, TMP et HOT, respectivement. Le calcul de la limite d'agrément à 95 % présente un biais acceptable entre les deux techniques de mesure en STA (± 0,26 °C), et non

en TMP ou en HOT (± 0,60 et ± 0,75 °C, respectivement). Le pourcentage d'échantillons présentant une différence inférieure à ± 0,5 °C entre TCO_{zhf} et TCO_{pill} demeure toutefois de 89,6 et de 80,5 % en TMP et HOT, respectivement.

Conclusion. Le capteur ZHF présente une estimation acceptable de la température mesurée à partir du point gastro-intestinal au repos seulement. Les différences plus importantes entre les valeurs issues des deux capteurs peuvent s'expliquer par des particularités propres d'un point de vue méthodologique, par exemple la proximité de la source de chaleur par rapport au capteur ZHF ou encore la variabilité de la motilité intestinale pendant l'exercice. En dépit de ce résultat, plusieurs éléments complémentaires suggèrent que l'estimation de la température centrale à partir de ce capteur peut être considérée comme pertinente pendant l'exercice. D'une part, ses performances ne semblent pas perturbées par la condition ambiante appliquée. D'autre part, il présente un délai de réponse raccourci par rapport aux variations de la température centrale, en comparaison du point gastro-intestinal. Le capteur ZHF peut être ainsi considéré comme une alternative pertinente dans le but de mesurer la température centrale en conditions écologiques et ambulatoires.

Mots-clés. Capteur à annulation de flux, non-invasif, stress thermique, température centrale, température gastro-intestinale.

ELSEVIER MASSON

Disponible en ligne sur ScienceDirect www.sciencedirect.com

Elsevier Masson France EM|consulte www.em-consulte.com

IRBM 39 (2018) 143–150

IRBM

Original Article

A Comparative Study of Two Ambulatory Core Temperature Assessment Methods

G. Roussey [a,c,*], C. Géhin [b], B. Massot [b], I. Ait Ali [c], T. Bernard [a]

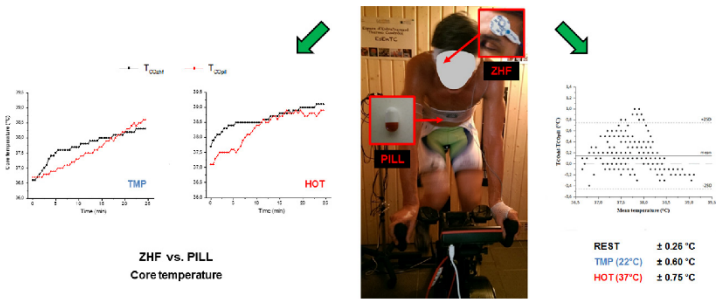
[a] *Université de Toulon, LAMHESS, Toulon, France*
[b] *Lyon Institute of Nanotechnologies (INL), Biomedical Sensors Group, INSA-Lyon, 69621 Villeurbanne Cedex, France*
[c] *Cityzen Sciences, 69100 Villeurbanne, France*

Received 4 May 2017; received in revised form 20 December 2017; accepted 22 February 2018
Available online 5 March 2018

Highlights

- ZHF sensor performance level appears as similar in both ambient conditions.
- ZHF temperature is not reliable with intestinal temperature during exercise.
- Heterogeneity of individual ZHF temperature responses is significant.
- Forehead core-to-skin gradient indicates endurance performance level in the heat.

Graphical abstract



Abstract

Background. Given the need to identify reliable non-invasive solutions for core temperature ambulatory monitoring, the purpose of this study was to evaluate the performance of zero-heat-flux (ZHF) temperature sensor on the forehead (T_{COzhf}) by comparing it with intestinal temperature (T_{COpill}) in different ambient and physiological conditions.

Methods. Seven trained male subjects were followed during a 45-min rest period (STA) and a 25-min self-regulated cycling exercise performed in neutral (TMP, 22.8 °C) and hot (HOT, 38.5 °C) ambient temperature.

Results. T_{COzhf} values differed from T_{COpill} of -0.23 ± 0.13 in STA, 0.15 ± 0.30 °C in TMP and 0.28 ± 0.38 °C in HOT. The 95% limits of agreement showed an acceptable bias between T_{COzhf} and T_{COpill} in STA (±0.26 °C), but not in TMP and HOT (±0.60 and ±0.75 °C).

Conclusion. The non-invasive ZHF sensor gave an accurate estimation of T_{COpill} in steady state but not during exercise. However, complementary results let suppose that ZHF performance is not affected by ambient conditions and could be a relevant alternative for deep body temperature measurement during whole-body heat stress.

© 2018 AGBM. Published by Elsevier Masson SAS. All rights reserved.

* Corresponding author at: LAMHESS, UFR STAPS, Université de Toulon, La Garde, 83031 Toulon Cedex 9, France.
E-mail address: gilles.roussey@gmail.com (G. Roussey).

https://doi.org/10.1016/j.irbm.2018.02.004
1959-0318/© 2018 AGBM. Published by Elsevier Masson SAS. All rights reserved.

Keywords: Core temperature; Zero-heat-flux; Gastrointestinal temperature; Non-invasive; Heat stress

1. Introduction

Continuous non-invasive monitoring of biological vital markers in sports applications has become a major challenge of technological innovations [1]. Progressive spread of heart rate chest belts in the 80's, followed by recent development of new sensors-based wearable devices, provides a relevant approach for athletes training monitoring. In parallel, major sporting events taking place in hot and dry/humid places require innovative solutions to prevent heat-related exhaustion. Further studies indeed demonstrate that aerobic performance decreases as the ambient temperature increases [2]. Core temperature (T_{CO}) values upper to 40 °C are generally associated to physiological heat stress affecting blood perfusion in brain and active muscles, and leading to an early fatigue state [3]. Maintaining a large core-to-skin gradient therefore preserves the thermoregulatory balance during a prolonged exercise. In this framework, the core-to-skin temperature gradient has recently identified as more indicative of performance in heat strain during an incremental exercise to volitional exhaustion [4]. Therefore, T_{CO} follow-up in ecological and ambulatory conditions should be shared from reliable and accurate monitoring.

Pulmonary artery and oesophageal methods have been validated as gold standard for T_{CO} measurement [5], however these assessment techniques are not tolerated in ambulatory conditions. Recent technical evolutions such as miniaturizing of sensors, telemetry and data loggers, provide an ability to estimate T_{CO} from gastrointestinal temperature (T_{COpill}) without causing discomfort. Several studies reported a very low bias (i.e. <0.1 °C) and reliable agreements (i.e. 95% limits of agreement – 95% LoA – in a level of ±0.5 °C) with oesophageal temperature for exercises taking place in warm conditions [6,7]. Heat stress-related haemodynamic responses during exercise might however put in perspective the use of this method during field-based sessions [8]. A suitable non-invasive alternative would be the transcutaneous measurement of deep-body temperature from a zero-heat-flux (ZHF) sensor. Following the first ZHF probe model designed by Fox and Solman [9], technical developments have been progressively brought by new devices [10]. Reliability was validated versus pulmonary artery blood [11] or nasopharyngeal temperature assessment [12] in preoperative general anaesthetic state. But only one study proposed forehead ZHF temperature (T_{COzhf}) measurement before, during and after a physical exercise in the heat, giving acceptable 95% limits of agreement of ±0.4 °C with oesophageal temperature [13].

Therefore, there is an actual need to explore the reliability of this method under different ambient and physiological (i.e. rest vs. exercise) conditions [14]. The purpose of this study was to determine, for healthy subjects, the degree of accuracy and reliability of T_{COzhf} for T_{COpill} estimation in rest and exercise conditions. Self-regulated exercise was reproduced in two different ambient exposures (i.e. neutral/dry vs. hot/dry temperature). We hypothesized, from using Bland and Altman's method, acceptable limits of agreement for T_{COzhf} (i.e. within ±0.5 °C) in all conditions.

2. Materials and methods

2.1. Subjects

Seven healthy and trained male subjects (age 27.3 ± 9.6 yr, height 1.78 ± 0.10 m, body weight 69.8 ± 8.4 kg, body surface 1.87 ± 0.17 m^2, maximal oxygen uptake 61.0 ± 2.5 $ml\,min^{-1}\,kg^{-1}$) were included in the current protocol. Somatic or cardio-respiratory disorders, fever in the last seven days, osteo-myo-articular injury or prior heat acclimation or acclimatization in the last month were considered as exclusion factors. All subjects were informed about constraints and risks related to the experimental protocol and gave written voluntary consent prior to the study. All experimental procedures were conformed to the Declaration of Helsinki and were approved by the local ethics committee of the University of Toulon.

2.2. Experimental protocol

In the current protocol, subjects were invited to come to the laboratory on four separate sessions. Prior written instructions were given as to drink a sufficient water volume, limit all consumption of caffeine, nicotine and alcohol for 24 hours prior to each session, and have the same diet for the two meals preceding each session. All trials started at the same hour of the day (±1 hour) in order to limit circadian rhythm effects on physiological variables and gastrointestinal transit time. Subjects completed this experimental protocol in 5 weeks with a minimum period of 72 hours between visits.

The inclusion visit allowed to take some anthropometrics measurements and to complete a familiarization with the experimental procedures. Peak power output (PPO) and maximal heart rate (HR_{max}) were determined through an incremental test (6-min warm-up at 100 W + 30 W per 2-min stage) until volitional exhaustion, using an electronically braked cycle ergometer (Schoberer Rad Messtechnik, Jülich, Welldorf, Germany).

On the three following separate sessions, subject wore a cycling short, synthetic socks, his own cycling shoes and were bare-chested. Upon his arrival at the laboratory urine density (SG) was measured, subject was thus considered as euhydrated if SG ≤1.02 g/ml. Then he was equipped of a heart rate monitor and temperature sensors.

Initial rest measurements were achieved during the first session (STA). Subjects remained for 45 min seated in front of a personal computer, in a neutral and comfortable ambient environment (22.4 ± 1.9 °C), for watching of an emotionally neutral documentary film previously chosen by the experimenters.

During the following two visits, subjects completed a self-regulated exercise reproduced in either neutral/dry (TMP; 22.8 ± 2.0 °C, 54.0 ± 8.4 %H) or hot/dry (HOT; 38.5 ± 1.5 °C, 35.8 ± 7.7 %H) ambient conditions in a randomized and counterbalanced order. The exercise was performed in a climatic chamber on an air-braked cycle ergometer (Wattbike, Wattbike LTD, Nottingham, UK) previously validated. Following a 5-min free warm-up, subjects were instructed to cycle 25-min at a PO perceived by them as a whole-body hard effort (i.e. 15 on 6–20 Borg's rating perceived exertion (RPE) scale [15]). Environmental parameters of the climatic chamber were continuously measured with a specific station (Testo, Forbach, France). No forced wind exposure and no hydration were applied during exercise trials.

2.3. Measurements

Heart rate was assessed through a belt connected to the cycle ergometer (Garmin) and collected every 5 s.

A specific and recently developed non-invasive system (SpotOn™, 3M™, Neuss, Germany) was used for T_{COzhf} measurement. In the human body, there is a natural heat flux from the body core to the skin surface as long as core temperature is greater than skin temperature. By locally insulating the skin, the temperature gradient with the body core will be progressively driven to zero. Zero-heat-flux probe has two thermistors separated by an insulating layer. The temperature differential is assessed from a differential amplifier connected to an electrical heater positioned on the skin. Error signal activates the heater from a retroactive loop in order to create a zero-gradient zone from the body core to the skin. A flexible and self-adhesive single-use probe (diameter 40 mm, 6 mm thick) was fixed on the forehead (i.e. above the right occipital lobe) of the subject. Adhesive properties of the probe, preventing air gaps with the skin to optimize thermal isolation of the measurement area, were reinforced with surgical tubular bandage all around the upper part of the head. The probe was connected via a wired connection to the monitor system. Recording was launched at least 10 min after its connection in order to enable a thermal stabilization of the measurement area. Data were checked manually every 30 s.

T_{COpill} was assessed through a pre-calibrated ingestible electronic sensor (E-Celsius©, Bodycap Medical, Caen, France; dimensions 17 × 8 mm; weight 1.7 g; accuracy ±0.1 °C) previously validated [16]. The pill was ingested 6–12 hours and at a same hour in the day (±1 hour) prior each session, in order to guarantee a good accuracy and reliability of temperature measurement [17]. Real-time data were transmitted by wireless transmission to the monitor (E-Celsius© Performance, Bodycap Medical) every 30 s.

Skin temperature was continuously monitored over the right occipital lobe (T_{SKfo}) and the left part of the chest from insulated Pt-100 temperature probes (Grant Instruments Ltd, Cambridge, UK; length 18 mm; accuracy ±0.3 °C). This non-invasive assessment method was preferred over other suitable alternatives such as infrared thermography [18] above all for economic and practical reasons, such as measurement conditions within the climatic chamber. A 2-points calibration protocol (in water at 20–22 °C and 45–50 °C) was systematically applied before each experimental session. Sensors were fixed on the skin with a surgical tape (Blenderm, 3M, Germany) at least 15 cm from any heat-producing equipment. Data were collected every 15 s through an acquisition system (DMM 2700, Keithley Instruments) and averaged by 30-s periods.

The core-to-skin temperature gradient (T_{CO}–T_{SK}) names the calculated difference between T_{COzhf} and T_{SKfo}. Data were calculated post-session by 30-s time intervals.

2.4. Statistical analysis

Approximate normal distribution were systematically checked. Degrees of freedom were adjusted using the Greenhouse–Geisser correction when violations of sphericity were present.

Analysis of bias and agreement between T_{COzhf} and T_{COpill} in respective STA, TMP and HOT conditions were achieved through all data recorded during each session, as suggested by Bland and Altman method [19]. Average bias was calculated by attaining the standard deviation (S.D.) of the average difference between each temperature device. Limits of agreement (95% LoA) are defined at two standard deviations (S.D.) of the bias. Average difference is considered as clinically acceptable in a range lower than ±0.5 °C for ±1.96 S.D. Analysis of bias was completed with calculated proportion of all differences that were within ±0.5 °C and individual correlations between T_{CO} measurement devices. Positive or negative correlations calculated by Pearson's test (r as correlation coefficient) were interpreted using the following criteria: "low" if $r < 0.5$, "moderate" if $0.5 \leq r < 0.74$, "strong" if $r \geq 0.75$.

At least, core temperatures patterns (i.e. T_{COzhf} vs. T_{COpill}) recorded during each session (i.e. STA, TMP and HOT) were compared independently using one-way repeated measures ANOVA. Similar statistical methods were used to analyze the effect of ambient condition during cycling exercise (i.e. TMP vs. HOT) on T_{SKfo} and T_{CO}–T_{SK} values. Pairwise comparisons using a Tukey's HSD were conducted when significant differences were observed.

Significance level was set at $p < 0.05$. Data are reported as mean ± S.D. Statistical analyses were performed using Statistica software (Statistica version 8.0 for Windows, Statsoft, Tulsa, OK, USA).

3. Results

3.1. Exercise conditions and intensity

During cycling sessions, PO and HR values were 241 ± 57 W (or 68.0 ± 7.1 %PPO) and 167 ± 14 bpm (or 87.6 ± 6.5 %HR_{max}) in TMP and 217 ± 47 W (or 61.5 ± 4.3% of PPO) and 172 ± 12 bpm (or 90.0 ± 5.5% of HR_{max}) in HOT (for individual values refers in Table 1). These values suggest that moderate-to-high intensities were performed dur-

Table 1
Overview of subject's characteristics and average performance during cycling exercise in neutral (TMP) and hot (HOT) ambient condition. PPO = peak power output, W_{TMP} = average power output produced in neutral condition, W_{HOT} = average power output produced in hot conditions, HR_{TMP} = average percentage of maximal heart rate reached in neutral condition, HR_{HOT} = average percentage of maximal heart rate reached in hot condition, m.d. = missing data.

Subject	Age (yr)	Weight (kg)	PPO ($W\,kg^{-1}$)	W_{TMP} (%PPO)	W_{HOT} (%PPO)	HR_{TMP} (%HR_{max})	HR_{HOT} (%HR_{max})
1	20	68	4.7	67.2	59.6	91.1	89.5
2	37	58	4.7	54.7	57.8	74.8	79.8
3	25	76	5.4	70.2	58.7	88.8	96.9
4	31	69	5.6	76.8	67.4	93.3	93.8
5	18	64	4.6	64.6	57.4	m.d.	90.8
6	18	69	4.9	73.2	61.9	88.7	87.0
7	42	84	5.0	69.4	67.3	88.3	92.5

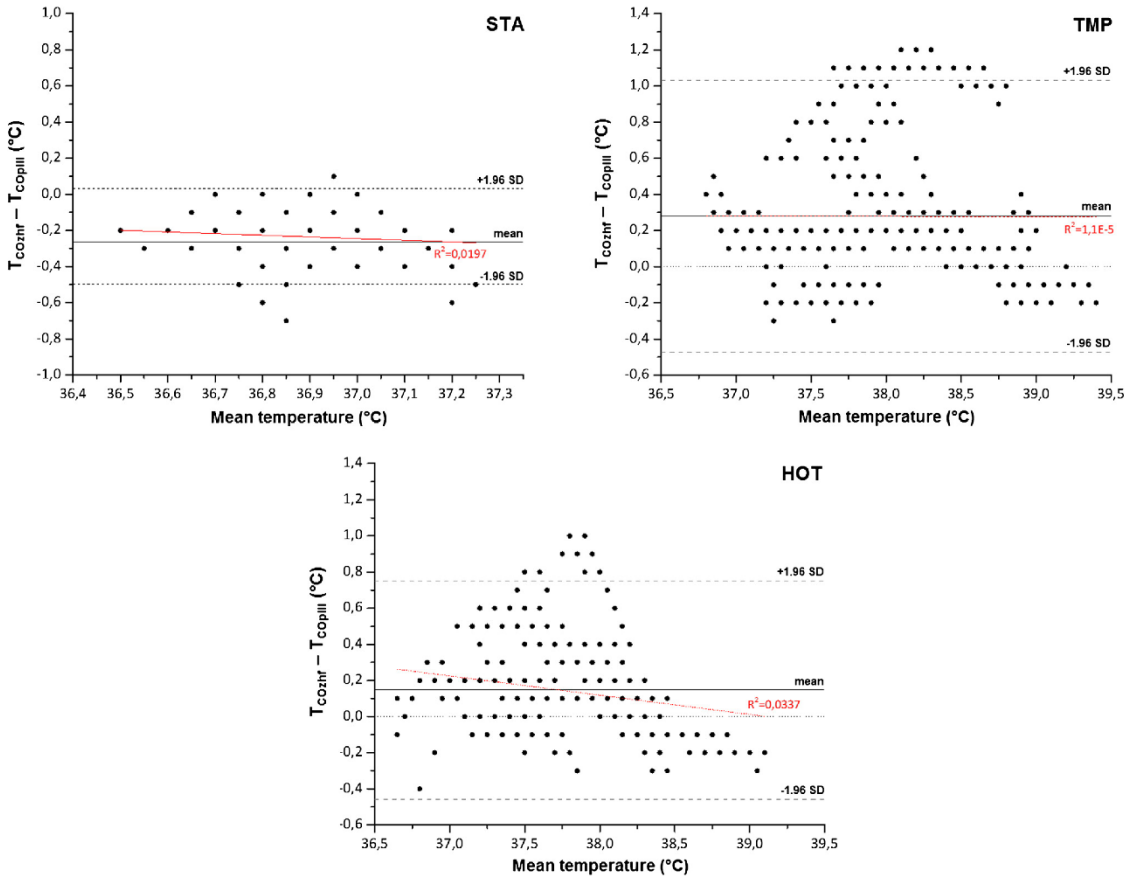


Fig. 1. Bland–Altman plots representing means and differences between core temperature measurements from zero-heat-flux sensor (T_{COzhf}) and gastrointestinal pill (T_{COpill}) during rest (STA) and cycling exercise performed in neutral (TMP) and hot (HOT) ambient conditions. Bias (solid line) indicates in the plot the average difference between T_{COzhf} and T_{COpill}. Lower and upper limits of agreement (−1.96 S.D. and +1.96 S.D., dashed lines) indicate where 95% of differences between T_{COzhf} and T_{COpill} are expected to fall. Regression line and R^2 coefficient between average values and bias (red line) demonstrate the robustness of the analysis depending on measured values. (For interpretation of the colors in the figure(s), the reader is referred to the web version of this article.)

ing the cycling exercise. Final heart rate values above 95% of HR_{max} were reached by one subject in TMP, and three in HOT. Therefore, the workload imposed to the athletes could be considered hard enough to require significant thermoregulatory adaptations.

3.2. Bias and agreement

In Fig. 1, Bland–Altman plots revealed average bias between T_{COzhf} and T_{COpill} of -0.23 ± 0.13, 0.15 ± 0.30 and 0.28 ± 0.38 °C in STA, TMP and HOT, respectively. 95% lim-

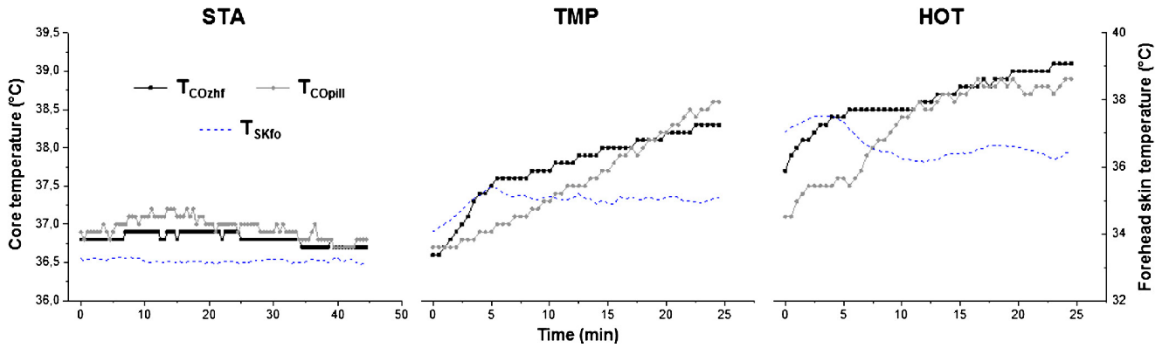


Fig. 2. Individual example of overall temperature patterns assessed by zero-heat-flux sensor (T_{COzhf}, black and solid line), gastrointestinal pill (T_{COpill}, gray and solid line) and forehead head sensor (T_{SKfo}, blue and dotted line) during rest (STA) and cycling exercise performed in neutral (TMP) and hot (HOT) ambient temperature.

its of agreement (95% LoA) from −0.49 to 0.03 °C, −0.46 to 0.75 °C and −0.47 to 1.03 °C were estimated between all pairs of measures in STA, TMP and HOT, respectively. Current results let conclude that T_{COzhf} showed an acceptable bias (i.e. ±0.5 °C) with reference T_{COpill} at rest, but not during cycling exercise (±0.26 °C in STA vs. ±0.60 and ±0.75 °C in TMP and HOT, respectively). However, average proportions of differences within ±0.5 °C were higher than 80% in all of those experimental sessions (97.1, 89.6 and 80.5% in STA, TMP and HOT, respectively). Moreover, strong positive correlations between T_{COzhf} and T_{COpill} were verified in all subjects in HOT ($r = 0.820$, range [0.906–0.993], all $p < 0.05$), and in six of the seven subjects participating in TMP ($r = 0.847$, range [0.255–0.989], all $p < 0.05$). Conversely, low to moderate correlations were observed in STA ($r = 0.204$, range [−0.649–0.628], all $p < 0.05$) thus endorsing to the heterogeneity of measured values in this condition.

3.3. Temperature patterns

An overview of respective T_{COzhf}, T_{COpill} and T_{SKfo} patterns assessed for one of the seven subjects (i.e. subject 3) in each experimental session is reported in Fig. 2. Average T_{COzhf} values of 36.75 ± 0.20, 37.81 ± 0.46, 38.11 ± 0.55 °C and T_{COpill} values of 36.95 ± 0.17, 37.66 ± 0.43 and 37.83 ± 0.49 °C were reported from STA, TMP and HOT sessions, respectively. No differences were observed between T_{COzhf} and T_{COpill} regardless of the experimental session. A significant interaction between time and temperature device was only observed in STA ($p < 0.001$), where pairwise comparison with Tukey post hoc showed a significant decrease of T_{COpill} during the first 10 min of session ($p < 0.05$). Although that T_{COzhf} and T_{COpill} have progressively increased throughout exercise as expected, no effect of ambient condition (i.e. TMP vs. HOT) was however verified ($p > 0.05$).

Individual values reported in Fig. 3 highlight the strong inter-subject variability of T_{COzhf} and T_{COpill} responses in rest (STA, range of T_{COzhf} of 36.4–37.1 °C; range of T_{COpill} of 36.6–37.5 °C) and exercise conditions (TMP and HOT, range of T_{COzhf} of 36.6–39.3 °C; range of T_{COpill} of 36.6–39.5 °C).

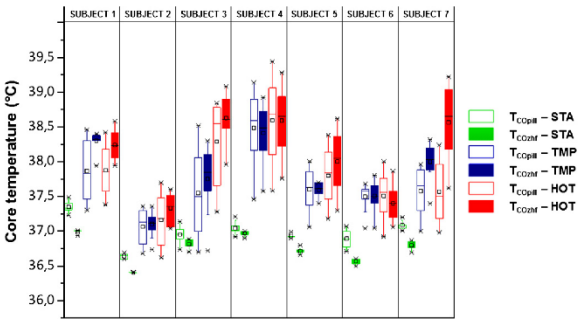


Fig. 3. Box-and-whisker plots representing minimal, lower and upper-quartile, median (i.e. band inside the box), average (i.e. square inside the box) and maximal values assessed by zero-heat-flux sensor (T_{COzhf}, empty box) and gastrointestinal pill (T_{COpill}, hatched box) for each individual rest (STA, green), neutral (TMP, blue) and hot (HOT, red) cycling exercise session.

Records completed in TMP and HOT by three of the seven subjects (i.e. two were concerned in both conditions) presented high measurement deviations (i.e. T_{COzhf}–$T_{COpill} > \pm 0.3$ °C) without any obvious technical cause.

At least, T_{SKfo} values recorded during exercise were significantly higher in HOT than in TMP (average values, 35.78 ± 0.66 vs. 34.88 ± 0.66 °C, $p = 0.012$). A significant interaction between time and temperature device was however observed, reflecting higher stability of T_{SKfo} values in TMP than in HOT ($p < 0.004$). As expected, forehead T_{CO}–T_{SK} values were also higher in HOT than in TMP (average values, 2.93 ± 0.58 vs. 2.33 ± 0.69, $p = 0.037$). Interaction between time and temperature showed a significant increase of forehead T_{CO}–T_{SK} throughout HOT session, conversely to TMP ($p < 0.05$). Neutral environmental condition gives a higher capacity to dissipate metabolic heat and therefore limit T_{CO} increase.

4. Discussion and conclusion

The present study sought to compare forehead zero-heat-flux or ZHF (T_{COzhf}) and gastrointestinal temperature (T_{COpill}) measurements as appropriate solutions for core temperature (T_{CO}) ambulatory monitoring. This original protocol aimed to explore

the reliability of ZHF method under different physiological (i.e. rest vs. exercise) and ambient conditions (i.e. neutral vs. hot temperature) [14]. Although it does not represent a gold standard index of T_{CO}, recent technical improvements in miniaturization of data loggers have stimulated widespread use of thermosensitive ingestible pills in this way [17]. The main findings from this study are that i) ZHF sensor gave an acceptable estimation of T_{COpill} in steady state but not during exercise, ii) similar bias and correlations found in TMP and HOT let to suppose that ZHF performance was not affected, during exercise, by ambient conditions.

Good agreement found at rest (STA) between T_{COzhf} and T_{COpill} (i.e. limits of agreement – 95% LoA – lower than 0.5 °C) confirms that the use of a recently developed ZHF sensor (i.e. SpotOn, 3M) may be considerate as accurate for non-invasive T_{CO} follow-up in physiologically steady state. Previous works showing similar performances with oesophageal or nasopharyngeal temperature have demonstrated the validity of forehead transcutaneous measurement for monitoring the deep body temperature in patients undergoing general anaesthesia [11,12]. As a reminder, T_{CO} estimation by ZHF method is based on the progressive driving of core-to-skin temperature gradient to zero. In this way, forehead is an optimal body location with low subcutaneous fat and a thick network of blood vessels favoring constant blood perfusion [5]. Despite these encouraging perspectives, its ability to give a reliable estimation of T_{CO} in various ambient and physiological conditions was still poorly documented [14]. A prior study including seven healthy subjects (i.e. four men and three women) exercising at a fixed intensity in the heat observed a reliable estimation of oesophageal temperature from ZHF (bias of -0.05 ± 0.18 °C with 95% LoA of ±0.4 °C) [13]. In the current study, the 95% LoA found between T_{COzhf} and T_{COpill} both in TMP and HOT were, however, out of the clinically acceptable ±0.5 °C. The inaccuracy of ZHF method in the estimation of T_{COpill} was verified despite a large proportion of data points included within the ±0.5 °C interval of difference.

Methodological causes potentially explain our opposite conclusions to the previous ones by Teunissen and his colleagues [14]. Firstly, the close exposure of the forehead to the heating source or the ergogenic heat production occurring during the stabilization period (i.e. 10-min period after the power-up of the ZHF system) when subjects warmed up could have caused an artificial overestimation of the measurement. Extreme average deviations (i.e. >0.3 °C) of T_{COpill} estimation by ZHF, observed for three of the seven subjects included, systematically followed rapid and significant T_{COzhf} increases during the first 5 min of relevant experimental sessions. It appears therefore essential to follow a sufficient period of thermal stabilization (i.e. at least 20 min [13]), at rest and in neutral environment, until a reliable assessment from the ZHF probe is attained. Secondly, the use of T_{COpill} as reference needs to question about the potential sources of intra- and inter-subject reproducibility bias, particularly in field-based conditions [5]. The decrease of renal and splanchnic blood flow during whole-body heat stress [20] affects the gastrointestinal motility [21], potentially randomizing the location of the thermosensitive pill within the intestinal tract. Moreover, the subsequent reduction of the rate of warmed blood irrigation generates local thermal inertia that may be put forward to suggest a recurrent time lag between T_{COpill} and T_{COzhf}. Two previous experimental works reported systematic delay for T_{COpill} relative to pulmonary artery or oesophageal temperature [8,22], contrasting with little or no time delay observed between T_{COzhf} and oesophageal temperature during stable and increasing body temperature upon hot conditions [13]. This hypothesis was however not tested in the current study because of an inadequate real-time measurement rate (i.e. one data per 30-s interval) for implementing suitable statistical method such as cross-correlation. Another methodological flaw is the lack of prior unitary calibration of the thermosensitive pill which may be source of mismeasurement of the reference T_{CO} [23]. At least, we supposed that the impact of the large heterogeneity of ZHF responses (see Fig. 2) on the current statistical treatment has been accentuated by the reduced number of subjects included in this study. As the main explanation, the free regulation of work rate imposed during current exercise probably led to a great inter-individual variability of autonomic responses to thermal stress such as facial skin vasodilatation. Blood perfusion level of the forehead during exercise potentially influences core-to-sensor heat conductance, therefore the delay of ZHF response to rapid changes of deep body temperature.

The detailed study of bias showed that T_{COzhf} correlates well with T_{COpill} in TMP and HOT only, supposing a constant difference between both measurements throughout cycling exercise. Moreover, closed differences between T_{COzhf} and T_{COpill} seemed to surprisingly suggest that the performance level of the probe was not influenced by ambient temperature despite higher forehead skin temperature values in HOT. Classically, the thermal insulation by the probe is not sufficient to limit the distortion of the core-to-skin gradient in cool and/or windy conditions despite the activation of the heating element [24]. Indeed, deeper measurements from the skin require a perfect thermal equilibration through the simultaneous minimization of core-to-skin and skin-to-ambient air thermal gradients [5], as observed in current HOT condition. A better understanding of these results involves to know in what depth ZHF could measure subcutaneous temperature. The use of a ZHF probe for intramuscular thigh temperature follow-up showed an ability to track to a depth of up to 2 cm beneath the skin [25]. An investigation from measurement in steady-state conditions with a manikin could be a possible alternative to evaluate the thermal penetration capability of the deep cerebral structures [26].

Given the potential utility of embedded monitoring to prevent heat-related injuries and the mini-invasive nature of the gastrointestinal pill, a comparative study involving ZHF method could be therefore of great interest to identify suitable non-invasive solutions. In light of our observations, complementary results such as proportion of data points included within the ±0.5 °C interval of difference and correlations suggest that ZHF sensor may be considerate as appropriate for T_{CO} monitoring in exercise conditions, despite low agreement found with T_{COpill} and current methodological limitations. The face is generally considered as a thermal window of the body [27]. Head

temperature appears thus as a mediator of thermal perception, playing an important role in dictating voluntary adjustments in exercise work rate in the heat [28]. In this way, the follow-up of forehead core-to-skin gradient may be suggested as a predictive indicator of volitional fatigue in whole-body heat stress. Endurance performance is largely influenced by environmental conditions and the autonomic capacity to cool the skin through sweating. The positive influence of large core-to-skin gradient values on run time before exhaustion at a constant speed was verified from gastrointestinal core and chest skin temperature measurements [4]. Comparative study of current final (i.e. average value from the last 10 min of exercise) forehead and chest core-to-skin gradients using multiple regression (unpublished data) showed that the combination with individual peak power output and body surface predict average PO during fixed-RPE exercise with R^2 values of 0.824 and 0.810, respectively ($p < 0.05$). Given that this result is valid for this protocol only, further studies including larger sample size and/or difference exercise profiles are required to evaluate the combination of aerobic fitness and forehead core-to-skin gradient as a relevant predictive indicator of exercise tolerance across environmental conditions.

Grants and disclosures

The present research was funded in the framework of a Ph.D grant by the French Association Nationale de Recherche et Technologie (grant CIFRE n°2013/0713). This grant was provided following an agreement between the laboratory supporting this research project and Cityzen Sciences, developer of embedded sensors and smart-textile monitoring solutions in sport, wellness and health.

Authors' contribution

G.R., I.A. and T.B. design the experimental protocol. G.R. and T.B. performed the acquisition of data. G.R., C.G. and T.B. analyzed and interpreted data. G.R. and I.A. drafted the manuscript. C.G. prepared the figures. G.R., C.G. and B.M. edited and revised manuscript. All the co-authors approved the final version of manuscript.

Conflict of interest statement

None declared.

Acknowledgements

The authors thank Anne-Virginie Desruelle and Bruno Schmid for their technical advices, Joffrey Ricaud for assistance, Clément Villars for his feedback on the manuscript and all the volunteers who give their time to participate in the present study.

References

[1] Düking P, Hotho A, Holmberg H-C, Fuss FK, Sperlich B. Comparison of non-invasive individual monitoring of the training and health of athletes with commercially available wearable technologies. Front Physiol 2016:7.

[2] El Helou N, Tafflet M, Berthelot G, Tolaini J, Marc A, Guillaume M, et al. Impact of environmental parameters on marathon running performance. PLoS ONE 2012;7:e37407.

[3] Périard JD, Thompson MW, Caillaud C, Quaresima V. Influence of heat stress and exercise intensity on vastus lateralis muscle and prefrontal cortex oxygenation. Eur J Appl Physiol 2013;113:211–22.

[4] Cuddy JS, Hailes WS, Ruby BC. A reduced core to skin temperature gradient, not a critical core temperature, affects aerobic capacity in the heat. J Therm Biol 2014;43:7–12.

[5] Taylor NAS, Tipton MJ, Kenny GP. Considerations for the measurement of core, skin and mean body temperatures. J Therm Biol 2014;46:72–101.

[6] Kolka MA, Quigley MD, Blanchard LA, Toyota DA, Stephenson LA. Validation of a temperature telemetry system during moderate and strenuous exercise. J Therm Biol 1993;18(4):203–10.

[7] Lee S, Williams WJ, Schneider SM. Core temperature measurement during submaximal exercise: esophageal, rectal, and intestinal temperatures. Aviat Space Environ Med 2000;71(9):939–45.

[8] Pearson J, Ganio MS, Seifert T, Overgaard M, Secher NH, Crandall CG. Pulmonary artery and intestinal temperatures during heat stress and cooling. Med Sci Sports Exerc 2012;44:857–62.

[9] Fox RH, Solman AJ. A new technique for monitoring the deep body temperature in man from the intact skin surface. J Physiol 1971;212:8–10.

[10] Dittmar A, Gehin C, Delhomme G, Boivin D, Dumont G, Mott C. A non-invasive wearable sensor for the measurement of brain temperature. In: 28th annual international conference of the IEEE (EMBS'06). Engineering in Medicine and Biology Society; 2006. p. 900–2.

[11] Eshraghi Y, Nasr V, Parra-Sanchez I, Van Duren A, Botham M, Santoscoy T, et al. An evaluation of a zero-heat-flux cutaneous thermometer in cardiac surgical patients. Anesth Analg 2014;119:543–9.

[12] Iden T, Horn E-P, Bein B, Böhm R, Beese J, Höcker J. Intraoperative temperature monitoring with zero heat flux technology (3M SpotOn sensor) in comparison with sublingual and nasopharyngeal temperature: an observational study. Eur J Anaesthesiol 2015;32:387–91.

[13] Teunissen LPJ, Klewer J, de Haan A, de Koning JJ, Daanen HAM. Non-invasive continuous core temperature measurement by zero heat flux. Physiol Meas 2011;32:559–70.

[14] Opatz O, Stahn A, Werner A, Gunga H-C. Determining core body temperature via heat flux – a new promising approach. Resuscitation 2010;81:1588–9.

[15] Borg G. Psychophysical scaling with applications in physical work and the perception of exertion. Scand J Work Environ Health 1990;16:55–8.

[16] Chapon PA, Gauthier A, Bulla J, Moussay S. Calibration and performance assessment of a temperature sensor prototype using a 1-point calibration procedure. Rev Sci Instrum 2012;83:114907.

[17] Byrne C, Lim CL. The ingestible telemetric body core temperature sensor: a review of validity and exercise applications. Br J Sports Med 2007;41:126–33.

[18] Lahiri BB, Bagavathiappan S, Jayakumar T, Philip J. Medical applications of infrared thermography: a review. Infrared Phys Technol 2012;55:221–35.

[19] Bland JM, Altman D. Statistical methods for assessing agreement between two methods of clinical measurement. Lancet 1986;327(8476):307–10.

[20] Rowell LB, Detry JR, Profant GR, Wyss C. Splanchnic vasoconstriction in hyperthermic man–role of falling blood pressure. J Appl Physiol 1971;6:864–9.

[21] Keeling WF, Martin BJ. Gastrointestinal transit during mild exercise. J Appl Physiol 1987;63(3):978–81.

[22] Teunissen LPJ, de Haan A, de Koning JJ, Daanen HAM. Telemetry pill versus rectal and esophageal temperature during extreme rates of exercise-induced core temperature change. Physiol Meas 2012;33(6):915–24.

[23] Travers GJS, Nichols DS, Farooq A, Racinais S, Périard JD. Validation of an ingestible temperature data logging and telemetry system during exercise in the heat. Temperature 2016;3:208–19.

[24] Taylor NAS, Wilsmore BR, Amos D, Takken T, Komen T, Cotter JD, et al. Indirect measurement of core temperature during work: clothing and environmental influences. In: Environmental ergonomics VIII. International series on environmental ergonomics, vol. 1. 1998. p. 325–8.

[25] Brajkovic D, Ducharme MB. Confounding factors in the use of the zero-heat-flow method for non-invasive muscle temperature measurement. Eur J Appl Physiol 2005;94:386–91.

[26] Brandes IF, Perl T, Bauer M, Bräuer A. Evaluation of a novel noninvasive continuous core temperature measurement system with a zero heat flux sensor using a manikin of the human body. Biomed Eng/Biomed Tech 2015;60:1–9.

[27] Matsukawa K, Endo K, Ishii K, Ito M, Liang N. Facial skin blood flow responses during exposures to emotionally charged movies. J Physiol Sci 2018;68:175–90. https://doi.org/10.1007/s12576-017-0522-3.

[28] Schlader ZJ, Simmons SE, Stannard SR, Mündel T. The independent roles of temperature and thermal perception in the control of human thermoregulatory behaviour. Physiol Behav 2011;103:217–24.

ETUDE II

INTERACTIONS BETWEEN PERCEIVED EXERTION AND THERMAL PERCEPTION IN THE HEAT IN ENDURANCE ATHLETES

ROUSSEY G.[1], GRUET M.[1], VALLIER J-M.[1], VERCRUYSSEN F.[1], BERNARD T.[1]

[1] LAMHESS, EA6312, Université de Nice Côte d'Azur, Université de Toulon Var, France

[2] Liverpool John Moores University, Research Institute for Sport and Exercise Sciences, Liverpool, United Kingdom

Ce travail a fait l'objet d'une publication dans une revue scientifique indexée :

Roussey, G., Gruet, M., Vercruyssen, F., Louis, J., Vallier, J. M., Bernard, T. (2018). Interactions between perceived exertion and thermal perception in the heat in endurance athletes. Journal of Thermal Biology, 76, 68-76.

Etat de l'art. La performance lors d'épreuves à libre allure diminue à mesure que la température ambiante s'élève, en raison notamment d'une distorsion de la difficulté perçue de l'effort (RPE). En ambiance chaude, il apparaît que la perception thermique sous-jacente à l'élévation de la température cutanée affecte initialement, et préalablement à une dérive de la température centrale, la perception de l'effort. Les interactions dynamiques entre ces différents paramètres méritent cependant d'être approfondies. L'objectif de cette étude est d'identifier dans quelle mesure une distorsion préalable de la perception de l'effort, induite par exemple par l'apparition de la fatigue mentale, peut affecter la perception thermique et la performance physique qui en résulte.

Méthode. Onze sujets entraînés (âge : 27,0 ± 8,6 ans ; PMA : 346 ± 56 W ; VO_{2max} : 63 ± 5 mL.min-1.kg-1) ont réalisé quatre sessions de 30 min sur ergocycle à une allure régulée par l'évaluation subjective de l'effort (RPE-15), en ambiance tempérée (TMP, 22,5°C) ou chaude (HOT, 37,3°C). Chaque session était précédée d'un exercice cognitif sur ordinateur de 60 min consistant soit à réaliser une tâche de Stroop incongruente (EXP), soit à visionner un film

documentaire (CON). La température centrale, la température cutanée et la perception thermique ont été contrôlés tout au long de chaque session expérimentale. Enfin, la fonction neuromusculaire des extenseurs du genou a été évaluée avant et à l'issue de l'exercice de pédalage.

Résultats. Aucune des deux tâches cognitives n'induit d'effet particulier sur la performance à RPE fixe quelle que soit la condition ambiante appliquée, en dépit d'une charge cognitive subjective plus importante en EXP. En revanche, la diminution progressive et linéaire de la puissance est potentialisée par la chaleur ambiante (puissance moyenne, HOT *vs.* TMP : 64,8 ± 4.0 *vs.* 70,7 ± 5.0 %PMA ; vitesse de régression, HOT *vs.* TMP : -0,022 *vs.* -0,008 $W.kg^{-1}.min^{-1}$). Toutefois, la température cutanée et la sensation de chaleur sous-jacente sont plus élevées en HOT, alors que le confort thermique perçu ne présente aucune différence entre les deux conditions. Enfin, aucun effet particulier de la condition ambiante n'a été observé sur les mesures neuromusculaires post-exercice.

Discussion. A la lecture de ces résultats, il est probable que la combinaison du stress cognitif à la contrainte environnementale n'ait pas suffisamment influencé la perception de l'effort et la perception thermique pendant l'exercice. L'absence de variation concomitante des marqueurs subjectifs de fatigue laisse supposer un probable moindre impact de la charge cognitive prolongée sur la performance physique chez les athlètes entraînés, et renforce l'hypothèse d'une plus grande capacité d'inhibition chez ces individus. De manière plus générale, en l'absence de fatigue neuromusculaire, la diminution plus rapide de la puissance observée en ambiance chaude suggère une large contribution des réponses cardiovasculaires et perceptives dans la régulation de l'intensité lorsque le sujet est en hyperthermie modérée. La moindre sensibilité et attention des sujets à la contrainte thermique explique potentiellement les réponses similaires de confort thermique mesuré dans les deux conditions ambiantes.

Mots-clés. Fatigue mentale, exercice à libre allure, thermorégulation, perception de l'effort.

Interactions between perceived exertion and thermal perception in the heat in endurance athletes

Authors: Gilles Roussey[a], Mathieu Gruet[a], Fabrice Vercruyssen[a], Julien Louis[b], Jean-Marc Vallier[a], Thierry Bernard[a]

[a] *Université de Toulon, LAMHESS, Toulon, France*

[b] *Liverpool John Moores University – Research Institute for Sport and Exercise Sciences Liverpool – United Kingdom.*

Abstract

Introduction: The study aimed to investigate how a distortion of perceived exertion in the heat may affect, during a self-paced cycling exercise preceded by prior cognitive task, the thermal perception and the subsequent regulation of power output in high level athletes. *Methods:* Eleven endurance trained male athletes completed four experimental sessions including a 30-min fixed-RPE (15-Hard) cycling exercise in neutral (TMP-22 °C) and hot (HOT-37 °C) conditions, following a 60-min incongruent Stroop task (EXP) or passively watching documentary films (CON). Central and peripheral performances of the knee extensors were assessed before the cognitive task and after the exercise. *Results:* Although mental demand and effort were higher in EXP ($P < 0.05$), no effect of prior cognitive task was observed on subjective feelings of mental fatigue or decline in power output at a fixed RPE. Average exercise intensity was lower in HOT than TMP (3.14 ± 0.09 W.kg^{-1} *vs.* 3.42 ± 0.10 W.kg^{-1} respectively, $P < 0.05$). Skin temperature and warmth sensations were higher in HOT throughout the exercise ($P < 0.05$) but not thermal comfort. Central and peripheral parameters were not affected more in HOT than in TMP. *Conclusion:* Although the effects of combined stressors on the distortion of perceived exertion could not be verified, the greater decline in power output recorded in HOT than TMP suggest a high contribution of both perceptual and cardiovascular responses in the regulation of work rate when the subject is in mild hyperthermia.

Keywords: Mental fatigue. Self-paced exercise. Perceived exertion. Heat strain. Training level.

Abbreviations: ANOVA, Analysis of Variance; HR, Heart Rate; MVC, Maximal Voluntary Contraction; NASA-TLX, National Aeronautics and Space Administration Task Load Index; PO, Power Output; PPO, Peak Power Output; RH, Relative Humidity; RPE, Rating of Perceived Exertion; VT1, First Ventilatory Threshold; VT2, Second Ventilatory Threshold; T_{CO}, Core Temperature; T_{SK}, Skin Temperature; VAL, Voluntary Activation Level.

*Corresponding author at***:** Thierry Bernard, Ph.D., LAMHESS / UFR STAPS, Université de Toulon, CS 60584, 83041 Toulon Cedex 9, France.
Email address: thierry.bernard@univ-tln.fr

Introduction

Performance level in prolonged self-paced exercise decreases as the ambient temperature increases (Tucker et al., 2004). Impaired endurance performance under heat strain is usually associated with a series of physiological alterations (*i.e.* neuromuscular, cardiovascular and metabolic; Nybo et al., 2014) mediated by the increase in core temperature (T_{CO}), but also by the distortion of perceptual responses (Flouris and Schlader, 2015). Perceived exertion is the conscious awareness of work required to complete a physical task (Pageaux, 2016). Harder subjective effort rated at a given workload in the heat potentially explains behavioral-induced reductions in exercise intensity. In this context, understanding the mechanisms regulating the perceptual responses during self-paced exercise requires the utilization of exercise models in which subjects are free to vary the work rate. Indeed, the behavioral regulation of muscle activity presumably aims to protect homeostasis from excessive changes in T_{CO} (Davies et al., 2016).

The regulation of exercise intensity by sustaining a given rating of perceived exertion (RPE) value outlined the higher linear rate of power output (PO) decline in the heat (*i.e.* 35 °C *vs.* 15 and 25 °C), concomitant to a greater heat storage during the first minutes of the exercise (Tucker et al., 2006). The authors stated that muscle activity was regulated subconsciously in anticipation to excessive-induced disturbances in homeostasis (Saint Clair Gibson et al., 2006). However, in a similar protocol, a recent study using direct calorimetric measurements challenged this hypothesis (Friesen et al., 2018). Nevertheless, there is evidence that skin temperature (T_{SK}) rather than T_{CO} is a predominant signaling input modulating perceived exertion in the heat through thermal perception (Schlader et al., 2011). Dynamic interactions between cutaneous thermal afferences and perceptual responses should, however, be examined. Indeed, the manipulation of ambient temperature during a prolonged self-paced exercise showed no synchronicity between RPE and real-time changes of T_{SK} and subsequent thermal sensation (Hartley et al., 2012).

When exercising in hot condition, changes in warmth sensation modify comfort perception (classically, the warmer the more uncomfortable) and may induce, by this way, a subsequent alteration in RPE (Schulze et al., 2015). Whether additional mental fatigue influences comfort perception and RPE when exercising in the heat remains to be determined (Acevedo and Ekkekakis, 2001). The combined stress factors imposed by heat strain and the cognitive demand required for pace control might have interactive (*e.g.* additive, synergistic or antagonistic) effects on the distortion of RPE and subsequent PO (Lloyd and Havenith, 2016). In neutral conditions, mental fatigue resulting from prior prolonged cognitive activity may lead to lower endurance performance (Van Cutsem et al., 2017a). Pageaux et al. (2013) reported no effect of mental fatigue on neuromuscular performance, suggesting that the subsequent decrease in endurance performance is mainly regulated through a higher RPE rather than a lower ability to produce force. This finding has been confirmed by de Morree et al. (2012) who indicated an increase in RPE in response to the greater demand from the central motor command in fatigued state. Thereafter, no similar consensus was verified in recent studies involving both mental fatigue and heat stress before and/or during endurance exercise (Otani et al., 2016; Van Cutsem et al., 2017b).

Within this framework, the purpose of this experimental work was to compare how a distortion of perceived exertion from prior mental fatigue (EXP) may affect thermal perception and subsequent regulation of cycling PO at fixed RPE, during an exercise performed either in neutral (TMP, 22 °C) or hot (HOT, 37 °C) ambient condition. Although the maintenance of a constant subjective intensity limits the level of physiological disturbance (Lander et al., 2009), neuromuscular alterations induced by prolonged heat exposure could however mediate a greater slow-down regulation of PO (Goodall et al., 2015). To prevent their occurrence, we sought to use a limited exercise duration (30-min) rather than ending the trial when a PO threshold is reached (Tucker et al., 2006). In the same way, central and peripheral mechanisms contributing to fatigue developments were also monitored by comparing pre- and post-exercise measurements. Lastly, endurance athletes were recruited to reduce the high inter-individual variability of heat-induced physiological and psychological stresses (Tikuisis et al., 2002).

We hypothesized that during an exercise at fixed RPE, prior cognitive exertion (EXP *vs.* CON) or heat exposure (HOT *vs.* TMP) both might decrease PO. This reduction in PO might be exacerbated by the combined effects of both stressors. The PO regulation might be mediated by a significant distortion of perception of effort and warmth, whereas the contribution of neuromuscular (*i.e.* central and peripheral) alterations would not be significant.

Material and methods

Participants

Eleven competitive-level male athletes in cycling and triathlon (age: 27.0 ± 8.6 years; height: 1.79 ± 0.09 m; body weight: 70.0 ± 7.7 kg; maximal aerobic power: 346 ± 56 W; maximal oxygen uptake: 63 ± 5 $mL.min^{-1}.kg^{-1}$) participated to the current study. According to the inclusion criteria, subjects were free of any mental, somatic or cardio-respiratory disorders and not accustomed to hot environment. Athletes were classed in the performance level 3 or 4, according to guidelines for subject's classification in sports science research (De Pauw et al., 2013). All experimental procedures conformed to the Declaration of Helsinki were approved by the local ethics committee. All athletes received written instructions outlining all procedures and gave written informed consent but were naïve of the aims and hypothesis. A reward (*i.e.* sports store-voucher) was given at the end of the last session to maintain the highest possible motivation during all the experimental procedure.

Experimental procedure

Each athlete visited the laboratory on five separate occasions (20-22 °C ambient temperature and 40-50 % relative humidity) at the same time of the day (± 2 hours). Sessions were all conducted during the winter season in the northern hemisphere (*i.e.* from November to March) and were completed within 5 weeks for a given subject with a minimum period of 72 hours between visits. Each athlete received written instructions to sleep for at least 7 hours, avoid strenuous exercise, drink a sufficient volume of water, limit consumption of caffeine, nicotine or alcohol for 24 hours prior to each session and have the same diet for the two meals preceding each session.

To limit under or over-estimation during the experimental protocol (Eston et al., 2015), the ability to cycle at a constant RPE was assessed in the inclusion visit during two 5-min exercise bouts corresponding to a RPE-15 level on the 6-20 Borg Scale (Pageaux, 2016). An appropriate coefficient of variation (< 5%) for test-retest reliability of PO was required. Athletes then completed a maximal cycling test to determine peak power output (PPO) after 6-min warm-up at 100 W + increments of 30 W per 2 min-stage until exhaustion using an electronically braked cycle ergometer (Schoberer Rad Messtechnik, Jülich, Welldorf, Germany). During this test, heart rate (HR, RS800, Polar, Finland) and respiratory gas exchanges were analyzed using breath-by-breath gas analyzer (Oxycon, Jaeger, Germany).

Exercise stopped when the athletes reached volitional exhaustion, defined as the point at which they were unable to maintain a pedal cadence of 60 rpm for 30 s despite verbal encouragement. PPO was calculated with the formula $PPO = PO_{out} + (t/120) \times 30$ (PO_{out}: workload of the last completed stage; *t*: time (s) in the final stage). The first (VT1) and the second (VT2) ventilatory thresholds were determined independently by two investigators according to the criteria previously described (Beaver et al., 1986).

During the four next experimental visits, athletes performed a 60-min cognitive task (refer to *Cognitive task* part for more details), either mentally strenuous (EXP) or control (CON), followed by a cycling exercise (refers to *Cycling Exercise* part for more details) in either neutral (TMP; 22.5 ± 1.7 °C, 49.8 ± 10.3 % of relative humidity (RH)) or hot (HOT; 37.2 ± 1.7 °C, 37.5 ± 6.8 % RH) ambient conditions (fig 1). All sessions (*i.e.* EXP_{TMP}, EXP_{HOT}, CON_{TMP} and CON_{HOT}) were distributed in a randomized and counterbalanced order. Following urine sampling and a standardized 5-min warm-up, neuromuscular assessment of right knee extensors was completed (refers to *Neuromuscular assessment* part for more details). After instrumentation with physiological measuring sensors, the athlete was seated in front of a personal computer in a temperate and quiet room for the completion of the cognitive task. At least 20 min after completion of the cognitive task and following a standardized 5-min warm-up in neutral ambient condition, the athlete went into an environmental chamber to perform the cycling protocol. Ambient temperature and humidity were continuously controlled with a specific probe fixed at the level of the athlete's head in his riding position (Testo, Forbach, France). No forced wind exposure and no hydration were applied during the trial. Neuromuscular assessment was repeated at the end of cycling exercise.

Neuromuscular assessment

The athlete sat upright in a custom built chair with hips at 100 ° of flexion and knees at 90 ° and was secured with non-compliant straps to minimize body movement. A calibrated force transducer (F 501 TC 200 daN, TME 78 Orgeval, France) was used to record the mechanical responses during maximal voluntary contractions (MVC) and electrically evoked contractions. Surface electromyographic signals were continuously recorded from the *vastus lateralis* with a pair of self-adhesive surface (10-mm diameter) electrodes (Controle Graphique Medical, Brie-Comte-Robert, France) in bipolar configuration with a 20-mm inter-electrode distance. The reference electrode was fixed on the patella. Signals were amplified with a bandwidth frequency ranging from 1 Hz to 5 kHz (common mode rejection ratio = 110 dB, impedance input = 1000 MΩ, gain = 1000), digitized on-line at a sampling rate of 2000 Hz and

finally stored for analysis using a commercially available software (Acqknowledge 4.1, Biopac Systems Inc.).

Transcutaneous electrical stimulations were delivered to the right femoral nerve using a self-adhesive electrode cathode (10-mm diameter) pressed manually by the same trained experimenter. The self-adhesive rectangular anode (50 x 90 mm, Dura-Stick premium, Compex) was placed in the gluteal fold. A constant current stimulator (model DS7A, Digitimer, Hertfordshire, UK) delivered a square wave stimulus of 1-ms duration and 400-V maximal voltage. During the preliminary testing session, individual supramaximal stimulation intensities were determined and ranged from 80 mA to 130 mA. After a specific quadriceps isometric warm-up, the athlete performed neuromuscular protocol as follows: *(i)* 4-s MVC without superimposed stimulation, *(ii)* 4-s MVC with superimposed supramaximal 100-Hz doublet stimulus, followed 2 s later by paired potentiated 10-Hz (Db_{10}) and 100-Hz (Db_{100}) doublets stimuli, and single potentiated twitch (Tw_p) in the relaxed muscle. Each step was repeated a second time after a 45-s rest period.

Each neuromuscular parameter was averaged from the two repetitions. Peripheral fatigue component analysis included Tw_p, M-wave peak-to-peak amplitude (M-wave) and the low-to-high frequency doublet ratio ($Db_{10:100}$). Force production during MVC was calculated for each 0.25-s trial upon reaching the force plateau. Voluntary Activation Level (VAL) was assessed by twitch interpolation method. The amplitude of the superimposed doublet elicited during MVC was compared with that of the control Db_{100} in relaxed muscle using the following equation:

$$VAL = \left[1 - \frac{Superimposed\ doublet}{Db100}\right] \times 100$$

Cognitive task

The EXP task consisted in completing a modified incongruent version of the Stroop color-word task during 60 min. The computerized version of the task performed in this protocol was programmed with E-Prime software (PST, Sharpsburg, PA, USA) and complied with the description made in a previous study (Pageaux et al., 2015).

The CON task consisted in watching documentary programs chosen by the experimenters, "The Perfect Runner, Clearwater Documentary Inc., 2012" and "Miracle Body, NHK Joho Network, 2008", in continuous and under the same viewing conditions as the experimental task.

Cycling exercise

Athletes performed 30-min of cycling on an air-braked cycle ergometer (Wattbike, Wattbike LTD, Nottingham, UK) previously validated (Hopker et al., 2010). They were instructed to cycle at a PO individually perceived as a whole-body hard effort (*i.e.* RPE-15 level on the Borg 6-20 scale) and were advised to reevaluate regularly their RPE to adjust PO. Cadence and resistance level were freely adjusted by the participant and no feedback was provided regarding time, distance covered, PO or any physiological value. Cycling values were continuously recorded every 5 s. The first 3 min of exercise were retained for analysis. Then, the last minute of each 3-min interval was retained to calculate the corresponding PO and further analyze the rate of PO decline throughout the exercise.

Psychological and physiological measurements

The Brunel Mood Scale survey (Terry et al., 2003) was used to quantify current mood before and after the cognitive task, in accordance with a recent study of Pageaux et al. (2015). "Fatigue" and "Vigor" subscales were considered as markers of mental fatigue.

Subjective load was assessed immediately after the cognitive task and the cycling exercise through a simplified version of the National Aeronautics and Space Administration Task Load Index (NASA-TLX) rating scale (Hart and Staveland, 1988).

Thermal and comfort sensations were assessed using visual analog scales at three time periods (5, 15 and 25-min) of cycling exercise. Participant was instructed to reply to the question "How do you perceive the current thermal environment?" on a visual analog scale ranging from -3 "very cold" to 3 "very hot" to determine comfort sensation. Subjective comfort was determined in response to the question "Do you feel comfortable in the current thermal environment?" and rated from 0 "comfortable" to 3 "very uncomfortable" (Gagge et al., 1969).

Hydration status was controlled at the beginning of each experimental session by assessing the urine specific gravity (*i.e.* ≤ 1.02 g.ml^{-1}). Capillary blood samples were collected from ear lobes before the warm-up and at the end of the cycling exercise. Lactate concentration ([La-]) was measured from capillary blood samples using a Lactate Pro System (LT-1710, Elitech, Puteaux, France).

Heart rate values were collected every 5 s during the whole pre-exercise task and during the cycling session by using a telemetric monitor (Garmin Pro, Garmin, USA).

Body temperature (T_{CO} and T_{SK}) values were monitored throughout the entire cycling exercise. Core temperature was assessed in the gastro-intestinal region, with a pre-calibrated ingestible electronic sensor (E-Celsius©, Bodycap Medical, France; dimensions 17.2 × 8.2 mm;

weight 1.7 g; accuracy ± 0.1 °C) previously validated for assessing human temperature (Chapon et al., 2012). Data were continuously transmitted every 30 s to a specific monitor (E-Celsius© Performance, Bodycap Medical). The capsule was ingested at the same time (± 1 hour) in a 6-12 hours window before each trial. Skin temperature was recorded every 15 s with pre-calibrated insulated Pt-100 temperature probes (Grant Instruments Ltd, Cambridge, UK; length 18 mm; accuracy ± 0.3 °C) fixed on 4 sites (left part of the chest, right lower arm, right upper thigh and left calf) with surgical tape and bandage, according to a four-site measurement model (Ramanathan, 1964).

Statistical analysis

All data are presented as mean ± SD. Normal distribution was systematically checked using Shapiro-Wilk's test. Degrees of freedom were adjusted using the Greenhouse-Geisser correction when violations of sphericity were present.

Paired T-tests were used to test potential differences in accuracy and reaction time between EXP and CON. Two-way analysis of variance (ANOVA; time x cognitive condition) for repeated measures were conducted to detect any potential differences in HR and subjective load. Two-way ANOVAs (cognitive condition × environmental condition) were conducted to detect any differences in mood parameters before (PRE) and after (POST-CT) the cognitive task, and in [La-], cognitive load and neuromuscular performances before (PRE) and after (POST-EX) the cycling exercise. Paired T-tests were also applied in the following parameters to detect pre-post differences (PRE *vs.* POST-CT, PRE *vs.* POST-EX). Similarly, two-way ANOVAs were conducted to analyze the physical, psychological and physiological dependent variables recorded during the cycling exercise.

Pairwise comparisons using a Tukey's HSD were conducted when significant differences were observed. When an interaction between conditions was observed in conjunction with a significant effect of one or another condition, paired T-tests were conducted to examine instantaneous or time effect. For all statistical analysis, the significance level was set at a 95 % confidence level ($P < 0.05$). Effect size was calculated as partial-eta-squared (ηP^2) and interpreted using the following criteria: no effect if $0 \leq \eta P^2 < 0.05$, minimal effect if $0.05 \leq \eta P^2 < 0.26$, moderate effect if $0.26 \leq \eta P^2 < 0.64$, strong effect if $\eta P^2 \geq 0.64$ (Ferguson, 2009). Statistical analysis was performed using Statistica software (Statistica version 8.0 for Windows, Statsoft, Tulsa, OK, USA).

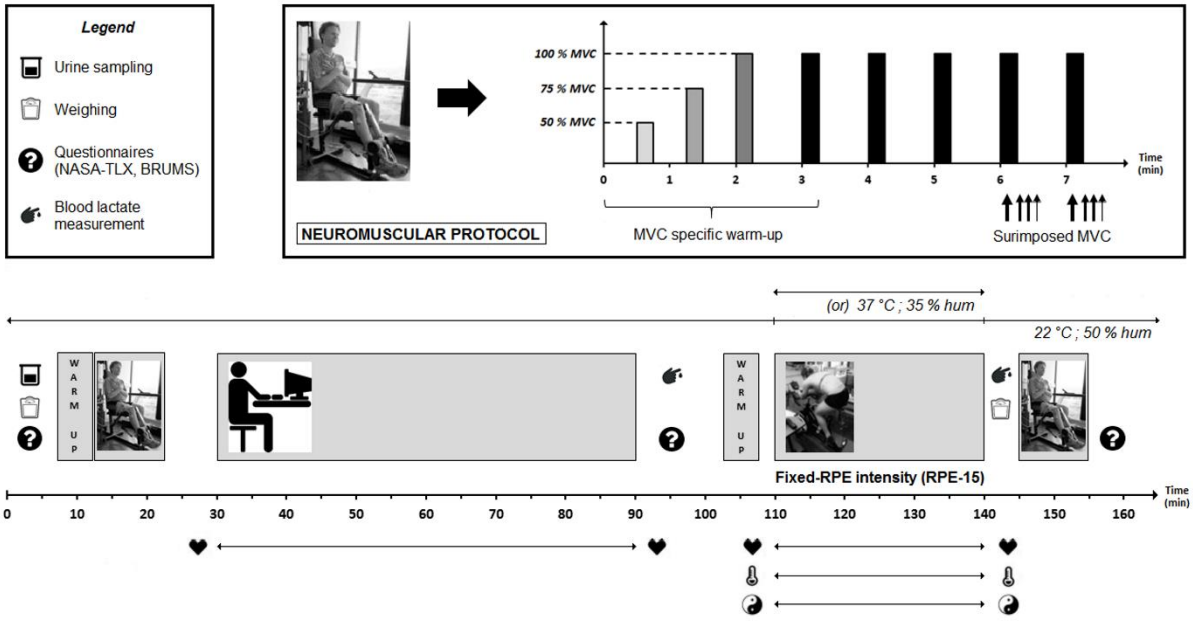


Fig. 1 Overview of the experimental protocol. Order and timing were similar for each visit. *RH* = relative humidity, *MVC* = maximal voluntary contraction, *BRUMS* = Brunel Mood State survey, *NASA-TLX* = National Aeronautics and Space Administration Task Load Index rating scale, *RPE* = Rating of Perceived Exertion

Results

Perceptive and cognitive responses

Reaction time (0.921 ± 0.212 s *vs.* 0.928 ± 0.245 s; $P = 0.941$) and accuracy of responses to the Stroop task (94.8 ± 5.2 % *vs.* 94.7 ± 5.3 %; $P = 0.950$) were similar between EXP_{TMP} and EXP_{HOT}, respectively.

Subjective workloads related to cognitive tasks are presented in fig 2. The EXP sessions increased the mental demand ($P < 0.001$, $\eta P^2 = 0.297$) and effort ($P = 0.002$, $\eta P^2 = 0.206$) compared to CON sessions. Conversely, the mood surveys did not show any effect of the EXP or CON sessions on Fatigue subscale between PRE ($P = 0.519$, $\eta P^2 = 0.010$) and POST-CT ($P = 0.768$, $\eta P^2 = 0.002$). Similarly, Vigor subscale was not affected by the cognitive tasks as indicated by PRE ($P = 0.585$, $\eta P^2 = 0.008$) and POST-CT ($P = 0.860$, $\eta P^2 < 0.001$) measurements. Repeated cognitive sessions induced similar subjective workload and mood scores (all $P > 0.05$).

Variations in thermal perception (*i.e.* sensation and comfort) during the cycling exercise were not affected by the type of pre-exercise cognitive task ($P > 0.05$; fig 3). Heat sensation was higher in HOT condition ($P < 0.001$, $\eta P^2 = 0.285$), whereas thermal discomfort was not altered between conditions ($P = 0.253$, $\eta P^2 = 0.032$).

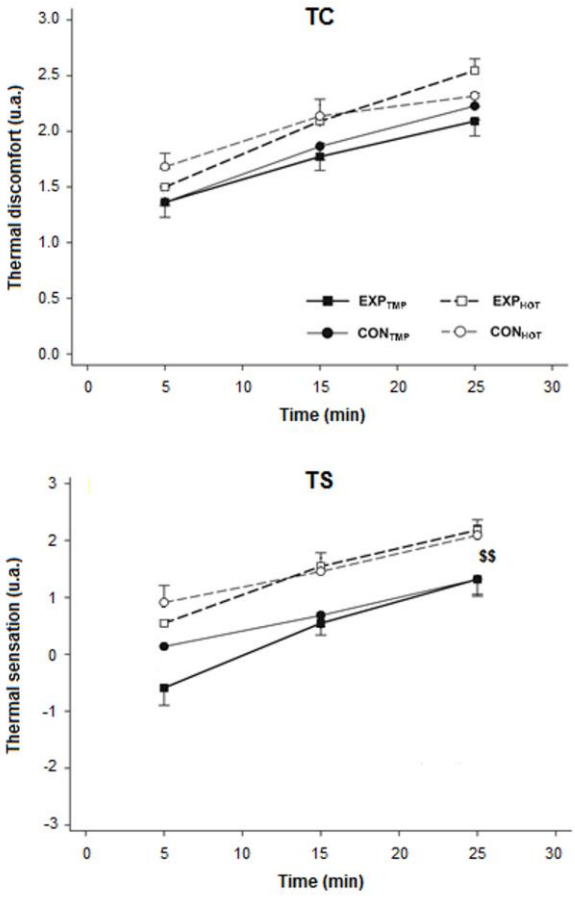


Fig. 2 Overall mean thermal discomfort (*TC*) and thermal sensation (*TS*) over cycling exercise. Thick lines and square plots represent values reported during exercise following incongruent Stroop task (EXP). Thin lines and circle plots represent values reported during exercise following passive control task (CON). Solid lines and black plots represent values reported in neutral environment (TMP). Dotted lines and white plots represent values reported in hot environment (HOT). $^{\$\$}$Significant effect of ambient condition on mean values (TMP < HOT, $P < 0.05$)

No interaction between cognitive conditions and subjective workload parameters was recorded after the cycling exercise (all $P > 0.05$). Only "Effort" was scored higher in HOT condition ($P = 0.003$, $\eta^2 = 0.350$).

Physical responses

The cognitive tasks had no effect on mean PO ($P = 0.501$, $\eta^2 = 0.011$) and the rate of PO decline ($P = 0.914$, $\eta^2 < 0.001$; fig 4) both in TMP and HOT conditions. Mean PO was higher in TMP (3.46 ± 0.44 and 3.39 ± 0.49 $W.kg^{-1}$ in EXP_{TMP} and CON_{TMP}, respectively; $P = 0.047$, $\eta P^2 = 0.095$) compared to HOT (3.20 ± 0.40 and 3.09 ± 0.47 $W.kg^{-1}$ in EXP_{HOT} and CON_{HOT}, respectively). Moreover, the rate of PO decline was faster in HOT (-0.019 ± 0.017 and -0.024 ± 0.022 $W.kg^{-1}.min^{-1}$ in EXP_{HOT} and CON_{HOT}, respectively; $P = 0.015$, $\eta P^2 = 0.138$) than in TMP (-0.009 ± 0.013 and -0.007 ± 0.015 $W.kg^{-1}.min^{-1}$ in EXP_{TMP} and CON_{TMP}, respectively).

The cognitive task had no effect on PRE and POST-EX measurements for all neuromuscular parameters considered (all $P > 0.05$; table 1). The decrease of MVC between PRE and POST-EX was significant in CON_{TMP} only (-6.7 ± 3.7 %, $p < 0.05$) but not in the other conditions (-0.4 ± 11.1 %, -2.6 ± 6.9 %, -3.5 ± 7.2 % in EXP_{TMP}, EXP_{HOT}, CON_{HOT}, respectively). The decrease of VAL was also significant in CON_{HOT} only (-4.3 ± 4.2 %, $P < 0.05$), but not in the other conditions (-2.0 ± 6.8 %, -1.8 ± 6.1 %, -2.0 ± 5.6 % in EXP_{TMP}, EXP_{HOT}, CON_{TMP}, respectively).

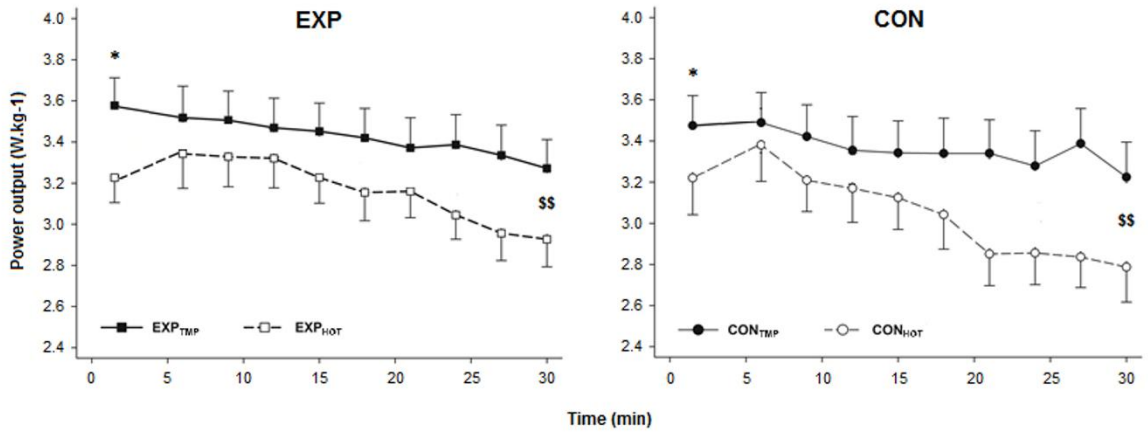


Fig. 3 Mean power output (*PO*) variations throughout cycling exercise. Measurements following incongruent Stroop task (EXP) and passive control task (CON). Solid lines and black plots represent values assessed in neutral condition (TMP). Dotted lines and white plots represent values assessed in hot condition (HOT). *Significant effect of ambient condition on initial PO values (TMP > HOT, P < 0.05). $^{\$\$}$Significant effect of ambient condition on the rate of PO decline (TMP < HOT, $P < 0.05$)

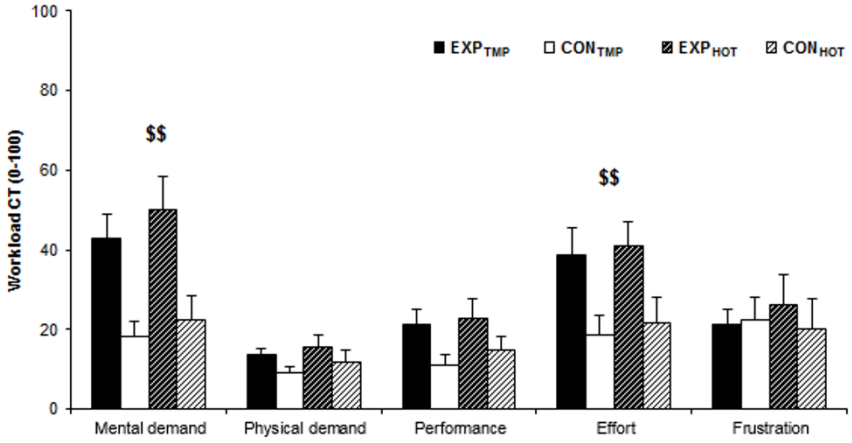


Fig. 4 Subjective workload induced by the cognitive task. Measurements following the incongruent Stroop Task (EXP, black columns) and the passive control task (CON, white columns). $^{\$\$}$Significant main effect of the cognitive task type (EXP > CON, $P < 0.05$)

Physiological responses

Heart rate values were not different between EXP and CON (66.5 ± 9.5 and 66.7 ± 10.1 bpm, respectively; $P = 0.977$, $\eta P^2 < 0.001$). Moreover, repeated cognitive sessions induced similar HR responses for both tasks ($P = 0.101$, $\eta P^2 = 0.142$).

	EXP_{TMP}		CON_{TMP}		EXP_{HOT}		CON_{HOT}	
	PRE	**POST**	**PRE**	**POST**	**PRE**	**POST**	**PRE**	**POST**
MVC (N)	571± 103	561 ± 75	594 ± 96	555 ± 96[a]	569 ± 78	556 ± 101	588 ± 84	565 ± 71
VAL (%)	90.9 ± 6.4	89.1 ± 9.3	90.0 ± 5.5	88.4 ± 7.3	90.2 ± 5.4	88.4 ± 6.9	90.8 ± 5.7	86.9 ± 7.2[a]
M-wave (mV)	15.3 ± 5.4	15.3 ± 5.7	14.8 ± 4.5	15.6 ± 4.7	14.2 ± 4.3	14.1 ± 3.7	16.7 ± 5.3	17.0 ± 4.6
Twp (N)	168 ± 23	147 ± 30[a]	171 ± 22	147 ± 32[a]	167 ± 25	160 ± 30	175 ± 38	167 ± 33
$Db_{10:100}$	0.95 ± 0.10	0.85 ± 0.08[a]	0.96 ± 0.07	0.85 ± 0.10[a]	0.95 ± 0.09	0.89 ± 0.12[a]	0.90 ± 0.07	0.87 ± 0.07

Table 1 Neuromuscular performances of knee extensors. Measurements performed before (PRE) and after (POST) the cycling exercise. MVC, maximal voluntary contraction (N); VAL, voluntary activation level (%); Tw_p, peak twitch (N); $Db_{10:100}$, ratio of 10-Hz doublet/100-Hz values. Data are presented as mean ± SE. [a] Significant intra-condition effect of cycling exercise (PRE > POST, $P < 0.05$).

During cycling exercise, no effect of both cognitive task and ambient conditions was observed on the HR increase ($P > 0.05$). At the end of the exercise, HR was similar ($P > 0.05$) regardless of the condition (176.5 ± 11.5, 175.5 ± 11.7, 179.0 ± 10.8 and 176.3 ± 9.1 bpm in EXP_{TMP}, CON_{TMP}, EXP_{HOT} and CON_{HOT}, respectively). Reached HR values corresponded to 91-94 % of maximal HR.

Lactate values assessed before exercise were not different between conditions. Post-exercise measurements indicated an effect of ambient condition (TMP > HOT; $P = 0.030$, $\eta P^2 = 0.113$). An increased [La-] at post-exercise was verified in all testing conditions ($P < 0.05$). Post-exercise [La-] were respectively 4.5 ± 2.4, 3.8 ± 2.6, 3.0 ± 1.8 and 2.5 ± 1.4 $mmol.L^{-1}$ in EXP_{TMP}, CON_{TMP}, EXP_{HOT} and CON_{HOT}.

The cognitive task had no effect on thermoregulatory variables recorded during the cycling exercise (*i.e.* T_{CO} and T_{SK} variations; $P > 0.05$; fig 5). During the exercise, T_{CO} increased but no effect of ambient conditions was observed on the rate of increase (0.06 ± 0.01, 0.04 ± 0.01, 0.05 ± 0.01 and 0.05 ± 0.01 $°C.min^{-1}$ in EXP_{TMP}, CON_{TMP}, EXP_{HOT} and CON_{HOT}, respectively; $P > 0.05$). At the end of the exercise, T_{CO} values were similar ($P > 0.05$) regardless of the condition. During the first 3-min of the exercise, mean T_{SK} values were significantly higher in HOT than in TMP ($P < 0.001$, $\eta P^2 = 0.569$). The increase in T_{SK} over the cycling exercise was influenced by ambient conditions (0.06 ± 0.01 and 0.06 ± 0.01 $°C.min^{-1}$ in EXP_{HOT} and CON_{HOT} *vs.* 0.03 ± 0.01 and 0.02 ± 0.01 $°C.min^{-1}$ in EXP_{TMP} and CON_{TMP}, respectively; $P < 0.001$, $\eta P^2 = 0.241$).

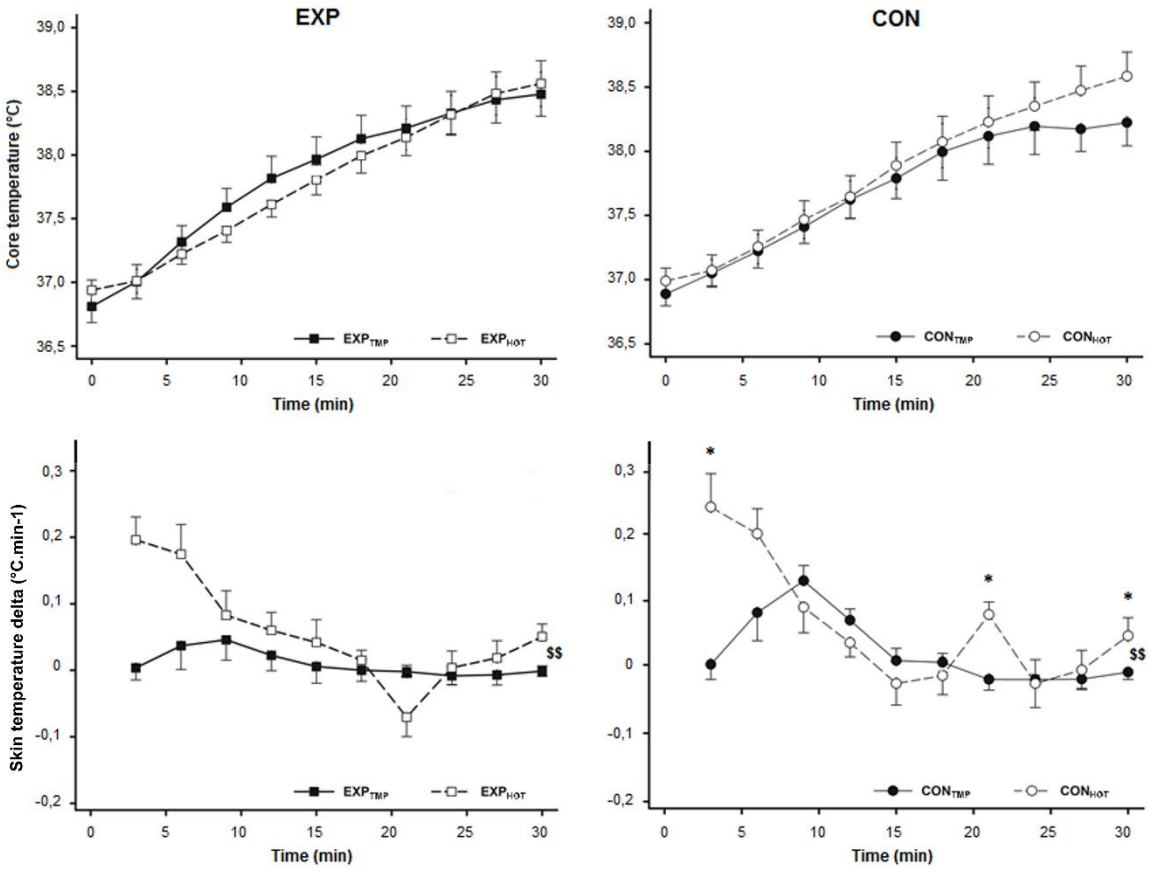


Fig. 5 Mean core (T_{CO}, upper part) and skin temperature (T_{SK}, lower part) variations throughout cycling exercise. Measurements following incongruent Stroop task (EXP, in the left) and passive control task (CON, in the right). Solid lines and black plots represent values assessed in neutral condition (TMP). Dotted lines and white plots represent values in hot condition (HOT). $^{\$\$}$Significant effect of ambient condition on mean variation (TMP < HOT, P<0.05). *Significantly different from TMP ($P < 0.05$).

Discussion

The purpose of this study was to examine the combined effects of cognitive exertion and heat strain on the distortion of perceptual parameters through the regulation of PO at a fixed RPE during a cycling exercise. In this way, a self-regulated cognitive task (*i.e.* incongruent Stroop task) alternatively performed in TMP and HOT conditions was utilized in an attempt to induce mental fatigue before cycling exercise. The absence of higher mental fatigue following EXP did not allow verification whether thermal perception and PO regulation may be modulated by cognitive afferences in endurance athletes. However, whatever the cognitive condition, exercising in HOT decreased PO compared to TMP whereas T_{CO} and post-exercise muscle capacities were similar between conditions. The results from this experiment suggest

that, during exercise in mild hyperthermia, cardiovascular and perceptual responses to the heat are probably the main factors influencing perceived exertion.

The high correlations with HR, ventilation and oxygen consumption support the use of RPE as a relevant tool to regulate exercise intensity (Thompson et al., 2014). In our study, the athletes sustained a 15-RPE equivalent intensity for 30 min corresponding to 70.6 ± 5.6, 69.0 ± 6.2, 65.2 ± 4.0 and 62.9 ± 5.6 % PPO in EXP_{TMP}, CON_{TMP}, EXP_{HOT} and CON_{HOT}, respectively. Moreover, as inferred through post-exercise variations in [La-] (*i.e.* 3.0 ± 0.7, 2.8 ± 0.7, 1.7 ± 0.6 and 1.2 ± 0.5 $mmol.L^{-1}$ in EXP_{TMP}, CON_{TMP}, EXP_{HOT} and CON_{HOT}, respectively), the cycling exercise was performed around PO between VT1 and VT2 (*i.e.* 77.8 ± 8.8 % of PO produced at VT2). Compared with extrapolated data from previous similar experimental protocols (Tucker et al., 2006), the workload imposed on the athletes could be considered hard enough to require significant behavioral regulation of PO at a fixed RPE.

Contrary to our initial hypotheses, the results derived from this study did not verify a significant effect of EXP on thermal perception and PO regulation at a fixed RPE. The induction of mental fatigue in our experimental protocol aimed to investigate the psychological and/or behavioral adaptive mechanisms initiated to regulate thermal perception and PO. With regard to mood parameters, both cognitive tasks induced negative but small and similar variations in Fatigue and Vigor levels. Moreover, similar HR responses raise questions on the cognitive challenge induced by EXP (Richter et al., 2008). One possible explanation of these divergent results is that the 60 min incongruent Stroop Task could have not been sufficiently stressful to induce mental fatigue, despite its challenging nature reflected by higher mental demand and effort than in CON. The cognitive performance of highly trained athletes (*i.e.* performance level 3-4; De Pauw et al., 2013) participating in this study could have not been affected by a progressive decreased arousal and motivation (Martin et al., 2016). Higher ability to bypass irrelevant stimuli (*i.e.* inhibition) observed in endurance athletes suggests a reduced cognitive demand (Cona et al., 2015), compared with less trained populations for which mental fatigue and/or decreased endurance performance were observed following EXP (Pageaux et al., 2015; Otani et al., 2016). Another explanation is that the passive and monotonous character of the control task involved similar changes in subjective fatigue and vigor than EXP (Wascher et al., 2014; Huang et al., 2015). In addition, methodological limitations including the low sensitivity of Brunel Mood State questionnaire to small short-term changes of mental fatigue, and the absence of control from a basic cognitive task repeated before and after EXP or CON, might have led to an underestimation of mental fatigue following both conditions (Van Cutsem et al., 2017a). Finally we can hypothesize that in highly trained endurance athletes, the combined

cognitive and environmental stressors proposed in this study were not strong enough to alter the work rate during a prolonged cycling exercise (Lloyd and Havenith, 2016).

Regardless of prior cognitive activity, the current results are in line with literature data showing higher-than-normal RPE in the heat (Flouris and Schlader, 2015). This study is one of the first to report a lower PO from the beginning of the exercise in HOT compared to TMP (*i.e.* 3.23 *vs.* 3.53 $W.kg^{-1}$). This early difference in PO between HOT and TMP conditions might be explained by the increased T_{SK} (+ 0.2-0.3 °$C.min^{-1}$) and subsequent changes in heat sensations in HOT. As observed in previous studies, a faster rate of PO decline was also recorded in HOT condition (Tucker et al., 2006; Friesen et al., 2018). Perceptual disturbances are frequently associated, in this context, with impaired supraspinal ability to produce muscular force (Goodall et al., 2015). On the contrary, the current lack of post-exercise MVC and VAL reduction in most of the experimental conditions suggests that peripheral alterations from cycling exercise at fixed RPE (*i.e.* decreased Tw_p and $Db_{10:100}$) were probably insufficient to exacerbate central fatigue. Indeed, despite greater skin blood flow and subsequent cardiovascular strain highlighted by higher core-to-skin temperature gradient in HOT (Sawka et al., 2011), blood [La-] recorded in the current study suggest a greater contribution of the anaerobic metabolism in TMP. The reduced metabolic challenge induced by fixed-RPE exercise in HOT probably contributes to minimize subsequent fatigue (Lander et al., 2009). Moreover, the limited increase in T_{CO} recorded after 30 min of exercise in HOT (*i.e.* 38.2 to 38.6 °C) suggests that the level of hyperthermia reached by our participants was probably not sufficient to alter neural drive (Thomas et al., 2005). Nevertheless, the delay between the cessation of exercise and the commencement of neuromuscular tests may also explain the absence of marked changes in neuromuscular performances following the cycling exercise (Froyd et al., 2013). The hypothetical occurrence of central alterations in HOT should therefore be considered at an individual level.

The physical responses (*i.e.* PO decline) were likely influenced by cardiovascular and perceptual changes as final effectors. The drift of HR recorded in HOT was in equal proportion to the reduction in PO. Changes in central command activation involved by the cardiovascular drift during prolonged exercise may induce a distortion of RPE (Norton et al., 1999). Furthermore, it cannot be excluded that cutaneous heat stimuli and subsequent thermal perception may have contributed to the regulation of PO at a fixed RPE (Schlader et al., 2011). Indeed our subjects did not perceive more discomfort in HOT than in TMP, although they reported through the NASA-TLX scale a higher effort produced in HOT which may reflect a higher cognitive demand. Although perceived exertion is now considered to be closely related

to the activity of the central motor command (de Morree et al., 2012), afferent feedbacks initiated by physiological or sensory changes might challenge the complex affective and motivational processes which indirectly influence the perceived exertion (Craig, 2002; Venhorst et al., 2017). However, the current experimental protocol did not permit to dissociate the respective roles of perceptual and cardiovascular strain in the regulation of work rate in the heat.

Moreover, T_{CO} values recorded during the exercise in HOT indicate that hyperthermia was mild. In this context, previous manipulations of thermoregulatory inputs aiming to change T_{SK} (*i.e.* cold to hot *vs.* hot to cold) demonstrated similar increases in RPE, independently of subsequent variations of thermal perception (Hartley et al., 2012). Therefore, the inverse relation between T_{SK} and RPE, which has been supported following experimental protocols involving drastically different ambient conditions (Tucker et al., 2004), is valid only when the subject is free of physiological stress like during the initial stages of a self-paced exercise (Schlader et al., 2011). In this way, the perception of effort appears to be the key regulator of intensity when exercising in the heat (Flouris and Schlader, 2015) while the contribution of thermal perception probably fluctuates according to the hyperthermia level, but also to training experience. Increased thermal discomfort, which plays a major role in the decision to disengage from prolonged exercise, is largely influenced by T_{SK} and wetness in the condition of mild hyperthermia (Flouris and Schlader, 2015). However, endurance athletes that routinely face thermal disturbances are likely to implement, in this context, attentional strategies focused on environmental stimuli rather than somatic responses to increased skin blood flow or sweat rate (Schücker et al., 2009). This difference between perceived and physiological strain may probably explain their capacity to sustain greater T_{CO} values throughout self-paced exercise (Tikuisis et al., 2002). Therefore, previous experience and memorized sensations rather than emotional responses could affect, for this population, the self-regulation of exercise intensity (Brick et al., 2016).

Conclusion

Despite its challenging nature, the incongruent Stroop task had no effect on HR and sensation of fatigue in high level endurance athletes. This cognitive task was likely not stressful enough for endurance athletes given their high inhibitory control capacity. Therefore, cycling PO was not altered by the cognitive condition (EXP *vs.* CON) in both ambient conditions (TMP *vs.* HOT). These results do not allow to clarify on the combined effects of psychological and

environmental stressors on the perception of effort. However, whatever the cognitive condition, the athletes started the exercise in HOT with a lower PO than in TMP and a faster rate of PO decline at fixed RPE was recorded throughout the exercise in HOT compared to TMP. The absence of higher post-exercise deterioration of muscle capacities suggest that perceptual responses and cardiovascular strain, both mediated through T_{SK}, played an important role in PO regulation in mild hyperthermia. When exercising in HOT, the distortion of RPE might be caused by physiological alterations (*i.e.* cardiovascular drift), and/or affective and motivational processes that heat sensations and subsequent discomfort involve. The absence of marked changes in the perception of discomfort in HOT for our participants might also support that training level influence the contribution of thermal perception on physical performance in the heat. Further studies are warranted to compare perceptual and emotional responses in highly trained and recreational athletes during self-paced prolonged exercise.

Acknowledgments

The authors thank Anne-Virginie Desruelle, Bruno Schmid and Rémi Radel for their technical support, Joffrey Ricaud and Thibaut Roumengous de Festes for assistance and all the volunteers who gave their time to participate in the present study.

Funding

This study was funded, in the framework of a Ph.D. grant, by the French National Association of Research and Technology (grant CIFRE n°2013/0713).

Conflict of interest

The authors declare that they have no conflict of interest.

References

Acevedo, E.O., Ekkekakis, P., 2001. The transactional psychobiological nature of cognitive appraisal during exercise in environmentally stressful conditions. Psychol. Sport. Exerc. 2, 47–67. http://dx.doi.org/10.1016/S1469-0292(00)00013-3.

Beaver, W.L., Wasserman, K., Whipp, B.J., 1986. A new method for detecting anaerobic threshold by gas exchange, J. Appl. Physiol. 60-6, 2020-27. http://dx.doi.org/10.1152/jappl.1986.60.6.2020.

Brick, N.E., MacIntyre, T.E., Campbell, M.J., 2016. Thinking and Action: A Cognitive Perspective on Self-Regulation during Endurance Performance. Front. Physiol. 7, 159. http://dx.doi.org/10.3389/fphys.2016.00159.

Chapon, P.A., Gauthier, A., Bulla, J., Moussay, S., 2012. Calibration and performance assessment of a temperature sensor prototype using a 1-point calibration procedure. Rev. Sci. Instrum. 83-11, 490-7. http://dx.doi.org/10.1063/1.4767244.

Cona, G., Cavazzana, A., Paoli, A., Marcolin, G., Grainer, A., Bisiacchi, P.S., 2015. It's a Matter of Mind! Cognitive Functioning Predicts the Athletic Performance in Ultra-Marathon Runners. PLOS ONE 10-7, e0132943. http://dx.doi.org/10.1371/journal.pone.0132943.

Craig, A.D., 2002. How do you feel? Interoception: the sense of the physiological condition of the body. Nat. Rev. Neurosci., 3, 8, 655-666. http://dx.doi.org/10.1038/nrn894.

Davies, M.J., Clark, B., Welvaert, M., Skorski, S., Garvican-Lewis, L.A., Saunders, P., Thompson, K.G., 2016. Effect of Environmental and Feedback Interventions on Pacing Profiles in Cycling: A Meta-Analysis. Front. Physiol. 7. http://dx.doi.org/10.3389/fphys.2016.00591.

De Morree, H.M., Klein, C., Marcora, S.M., 2012. Perception of effort reflects central motor command during movement execution. Psychophysiology. 49, 9, 1242–53.

De Pauw, K., Roelands, B., Cheung, S.S., de Geus, B., Rietjens, G., Meeusen, R., 2013. Guidelines to Classify Subject Groups in Sport-Science Research. Int. J. Sport. Physiol. Perf. 8, 111–22. http://dx.doi.org/10.1123/ijspp.8.2.111.

Eston, R., Coquart, J., Lamb, K., Parfitt, G., 2015. Misperception: No Evidence to Dismiss RPE as Regulator of Moderate-Intensity Exercise. Med. Sci. Sport. Exerc. 47, 2676. http://dx.doi.org/10.1249/MSS.0000000000000748.

Ferguson, C.J., 2009. An effect size primer: A guide for clinicians and researchers. Prof. Psychol. 40, 532–8. http://dx.doi.org/10.1037/a0015808.

Flouris, A.D., Schlader, Z.J., 2015. Human behavioral thermoregulation during exercise in the heat: Human behavioral thermoregulation. Scand. J. Med. Sci. Sport. 25, 52–64. http//dx.doi.org/10.1111/sms.12349.

Friesen, B.J., Périard, J.D., Poirier, M.P., Lauzon, M., Blondin, D.P., Haman, F., Kenny, G.P., 2018. Work Rate during Self-paced Exercise is not mediated by the Rate of Heat Storage. Med. Sci. Sport. Exerc. 50, 159–68. http://dx.doi.org/10.1249/MSS.0000000000001421.

Froyd, C., Millet, G.Y., Noakes, T.D., 2013. The development of peripheral fatigue and short-term recovery during self-paced high-intensity exercise: Kinetics of peripheral fatigue and recovery. J. Physiol. 591, 1339-46. https://doi.org/10.1113/jphysiol.2012.245316

Gagge, A.P., Stolwijk, J.A.J., Saltin, B., 1969. Comfort and thermal sensations and associated physiological responses during exercise at various ambient temperatures. Env. Res. 2, 209–29.

Goodall, S., Charlton, K., Hignett, C., Prichard, J., Barwood, M., Howatson, G., Thomas, K., 2015. Augmented supraspinal fatigue following constant-load cycling in the heat. Scand. J. Med. Sci. Sport. 25, 164–72. https://doi.org/10.1111/sms.12370.

Hart, S.G., Staveland, L.E., 1988. Development of NASA-TLX (Task Load Index): results of empirical and theoretical research. Human. Ment. Workload. 2, 408. http://dx.doi.org/10.1016/S0166-4115(08)62386-9.

Hartley, G.L., Flouris, A.D., Plyley, M.J., Cheung, S.S., 2012. The effect of a covert manipulation of ambient temperature on heat storage and voluntary exercise intensity. Physiol. Behav. 105, 1194–1201. http://dx.doi.org/10.1016/j.physbeh.2011.12.017.

Hopker, J., Myers, S., Jobson, S.A., Bruce, W., Passfield, L., 2010. Validity and Reliability of the Wattbike Cycle Ergometer. Int. J. Sport. Med. 31, 731–36. http://dx.doi.org/10.1055/s-0030-1261968.

Huang, C.-S., Pal, N.R., Chuang, C.-H., Lin, C.-T., 2015. Identifying changes in EEG information transfer during drowsy driving by transfer entropy. Front. Neurosci. 9, 570. http://dx.doi.org/10.3389/fnhum.2015.00570.

Lander, P.J., Butterly, R.J., Edwards, A.M., 2009. Self-paced exercise is less physically challenging than enforced constant pace exercise of the same intensity : influence of complex central metabolic control. Br. J. Sport. Med. 43, 789–95. http://dx.doi.org/10.1136/bjsm.2008.056085.

Lloyd, A., Havenith, G., 2016. Interactions in human performance: An individual and combined stressors approach. Temperature 3, 514-7. http://dx.doi.org/10.1080/23328940.2016.1189991.

Martin, K., Staiano, W., Menaspà, P., Hennessey, T., Marcora, S., Keegan, R., Thompson, K.G., Martin, D., Halson, S., Rattray, B., 2016. Superior Inhibitory Control and Resistance to Mental Fatigue in Professional Road Cyclists. PLOS ONE 11-7, e0159907. http://dx.doi.org/10.1371/journal.pone.0159907.

Norton, K.H., Gallagher, K.M., Smith, S.A., Querry, R.G., Welch-O'Connor, R.M., Raven, P.B., 1999. Carotid baroreflex function during prolonged exercise. J. Appl. Physiol., 87, 339–347. https://doi.org/10.1152/jappl.1999.87.1.339

Nybo, L., Rasmussen, P., Sawka, M.N., 2014. Performance in the heat : physiological factors of importance for hyperthermia-induced fatigue. Compr. Physiol. 657–689. http://dx.doi.org/10.1002/cphy.c130012.

Otani, H., Kaya, M., Tamaki, A., Watson, P., 2016. Separate and combined effects of exposure to heat stress and mental fatigue on endurance exercise capacity in the heat. Eur. J. Appl. Physiol. 117-1, 119-29. http://dx.doi.org/10.1007/s00421-016-3504-x.

Pageaux, B., Marcora, S.M., & Lepers, R., 2013. Prolonged mental exertion does not alter neuromuscular function of the knee extensors. Med. Sci. Sports. Exerc. 45(12), 2254–2264.

Pageaux, B., Marcora, S.M., Rozand, V., Lepers, R., 2015. Mental fatigue induced by prolonged self-regulation does not exacerbate central fatigue during subsequent whole body endurance exercise. Front. Neurosci. 9. http://dx.doi.org/10.3389/fnhum.2015.00067.

Pageaux, B., 2016. Perception of effort in Exercise Science: Definition, measurement and perspectives. Eur. J. Sport. Sci. 16, 885-94. http://dx.doi.org/10.1080/17461391.2016.1188992.

Ramanathan, N.L., 1964. A new weighting system for mean surface temperature of the human body. J. Appl. Physiol. 19, 531–3.

Richter, M., Friedrich, A., Gendolla, G.H.E., 2008. Task difficulty effects on cardiac activity. Psychophysiol. 45, 869–75.http://dx.doi.org/10.1111/j.1469-8986.2008.00688.x.

Saint Clair Gibson, A., Lambert, E.V., Rauch, L.H., Tucker, R., Baden, D.A., Foster, C., Noakes, T.D., 2006. The role of information processing between the brain and peripheral physiological systems in pacing and perception of effort. Sport. Med. 36, 705–22.

Sawka, M.N., Leon, L.R., Montain, S.J., Sonna, L.A., 2011. Integrated physiological mechanisms of exercise performance, adaptation, and maladaptation to heat stress. Compr. Physiol. 1. http://dx.doi.org/10.1002/cphy.c100082.

Schlader, Z.J., Simmons, S.E., Stannard, S.R., Mündel, T., 2011. Skin temperature as a thermal controller of exercise intensity. Eur. J. Appl. Physiol. 111, 1631–39. http://dx.doi.org/10.1007/s00421-010-1791-1.

Schücker, L., N. Hagemann, N., B. Strauss, B., K. Völker, K., 2009. The effect of attentional focus on running economy, J. Sport. Sci. 27-12, 11241–8. http://dx.doi.org/10.1080/02640410903150467.

Schulze, E., Daanen, H.A.M., Levels, K., Casadio, J.R., Plews, D.J., Kilding, A.E., Siegel, R., Laursen, P.B., 2015. Effect of Thermal State and Thermal Comfort on Cycling Performance in the Heat. Int. J. Sport. Physiol. Perf. 10, 655–63. https://doi.org/10.1123/ijspp.2014-0281.

Terry, P.C., Lane, A.M., Fogarty, G.J., 2003. Construct Validity of the Profile of Mood States - Adolescents for use with Adults. Psychol. Sport. Exerc. 4, 125–39. http://dx.doi.org/10.1016/S1469-0292(01)00035-8.

Thomas, M.M., Cheung, S.C., Elder, G.C., Sleivert, G.G., 2005. Voluntary muscle activation is impaired by core temperature rather than local muscle temperature. J. Appl. Physiol. 100, 1361–69. 10.1152/japplphysiol.00945.2005.

Thompson, W.R., Gordon, N.F., Pescatello, L.S., 2014. ACSM's guidelines for exercise testing and prescription, Hubsta Ltd, New Zealand.

Tikuisis, P., McLellan, T.M., Selkirk, G.A., 2002. Perceptual versus physiological heat strain during exercise heat stress. Med. Sci. Sport. Exerc. 34, 1454–61. http://dx.doi.org/10.1249/01.mss.0000027764.43430.fe.

Tucker, R., Rauch, L., Harley, Y.R., Noakes, T., 2004. Impaired exercise performance in the heat is associated with an anticipatory reduction in skeletal muscle recruitment. Pflügers Archiv – Eur. J. Physiol. 448. http://dx.doi.org/10.1007/s00424-004-1267-4.

Tucker, R., Marle, T., Lambert, E.V., Noakes, T.D., 2006. The rate of heat storage mediates an anticipatory reduction in exercise intensity during cycling at a fixed rating of perceived exertion. J. Physiol. 574, 905–15. http://dx.doi.org/10.1113/jphysiol.2005.101733.

Van Cutsem, J., Marcora, S., De Pauw, K., Bailey, S., Meeusen, R., Roelands, B., 2017a. The Effects of Mental Fatigue on Physical Performance: A Systematic Review. Sport. Med. 47, 1569–88. http://dx.doi.org/10.1007/s40279-016-0672-0.

Van Cutsem, J., De Pauw, K., Buyse, L., Marcora, S., Meeusen, R., Roelands, B., 2017b. Effects of Mental Fatigue on Endurance Performance in the Heat. Med. Sci. Sport. Exerc. 49, 1677–87. http://dx.doi.org/10.1249/MSS.0000000000001263.

Venhorst, A., Micklewright, D., Noakes, T.D., 2017. Towards a three-dimensional framework of centrally regulated and goal-directed exercise behaviour: a narrative review. Br. J. Sport. Med. 0, 1-12. http://dx.doi.org/10.1136/bjsports-2016-096907.

Wascher, E., Rasch, B., Sänger, J., Hoffmann, S., Schneider, D., Rinkenauer, G., Heuer, H., Gutberlet, I., 2014. Frontal theta activity reflects distinct aspects of mental fatigue. Biol. Psychol. 96, 57–65. http://dx.doi.org/10.1016/j.biopsycho.2013.11.010.

ETUDE III

EFFETS COMPARES DE DEUX METHODES D'ACCLIMATATION DE COURTE DUREE SUR LA PERFORMANCE ET LA PERCEPTION DE L'EFFORT EN AMBIANCE CHAUDE

G. ROUSSEY[1], P. FONTANARI[1], J. LOUIS[2], T. BERNARD[1]

[1] Université de Toulon, LAMHESS, Toulon, France

[2] Liverpool John Moores University, Research Institute for Sport and Exercise Sciences, Liverpool, United Kingdom

Etat de l'art. Le nombre croissant d'événements sportifs majeurs en environnement chaud suggère l'application préalable de stratégies d'acclimatation. Alors que les recommandations se distinguent des conditions de préparation des athlètes en particulier lors de périodes précompétitives, à l'inverse peu d'études jusqu'à présent ont analysé les effets et contraintes relatives à l'application des contenus d'entraînement habituels dans un tel cadre. L'une des principales limites semble toutefois être l'apparition de phénomènes relatifs à une surcharge fonctionnelle, susceptible de dégrader la capacité de performance du sujet. Le premier objectif de ce protocole est de comparer les effets respectifs d'un protocole dit « expérimental » associant une diminution du volume à la production d'intensités variables et autorégulées, et d'un protocole dit « classique » à intensité fixe, sur la performance et la perception de l'effort. Le second objectif de ce protocole est de comparer l'évolution respective des marqueurs perceptifs et physiologiques lors du maintien de seuils fixes de perception de l'effort.

Méthode. Dix-sept cyclistes entraînés en cyclisme et triathlon (âge : 35,4 ± 11,0 ans ; PMA : 333 ± 40 W ou 4,6 ± 0,5 $W.kg^{-1}$) ont participé à un protocole d'acclimatation de 5 jours sur ergocycle (conditions ambiantes : 38 °C ; 45 % HR), à des intensités autorégulées et variables (EXP, 9 sujets ; volume 270 min) ou bien fixes et peu variables (FIX, 8 sujets ; volume 350 min). Une épreuve contre-la-montre de 20 km réalisée dans un environnement chaud (38-39 °C) a été répétée avant (TT-PRE), à l'issue du protocole (TT-POST1) et une semaine après (TT-POST2). Afin d'observer les ajustements de la perception de l'effort, 2 épreuves pré- (HST-PRE) et post- (HST-POST) acclimatation ont été réalisées dans la chaleur (38° C) à des intensités autorégulées. Nous avons contrôlé, lors de cette même épreuve, les paramètres de

fréquence cardiaque, de température centrale, de température cutanée et de perception thermique. Le contrôle de marqueurs physiologiques sensibles à l'acclimatation à la chaleur, par exemple le taux d'hématocrite (HCT) et la concentration sudorale en ions sodium ([Na+]) a également été répété au cours de ces deux sessions.

Résultats. Lors de l'épreuve TT, une *très probable* faible amélioration immédiate de la performance (+2,8 ± 1,6 %) est observée chez FIX tandis que l'effet de l'acclimatation reste *incertain* mais positif pour EXP (+1,2 ± 2,4 %). Ainsi, 6 des 9 sujets du groupe EXP ont amélioré leur performance, contre l'ensemble des 8 pour le groupe FIX. Les principaux gains de puissance sont observés au cours des six premiers kilomètres de l'épreuve TT et sont plus marqués pour le groupe FIX. Lors de l'épreuve HST, seul FIX améliore de manière très probable la puissance développée à RPE-15 (+10,1 ± 16,7 %). Parmi les marqueurs physiologiques suivis pendant HST, on observe un ralentissement de l'élévation de la température centrale (EXP : -28 ± 19 % ; FIX : -21 ± 33 %). Enfin, bien que la sensation de chaleur perçue soit significativement et similairement diminuée, nous observons post-acclimatation des variations différentes de la température cutanée entre les deux groupes alors que le confort thermique n'est pas réellement affecté.

Discussion. Les données de l'étude démontrent que la réduction du volume d'exposition associée à une gestion autorégulée de l'intensité permet d'obtenir une amélioration post-acclimatation de la performance lors d'un exercice à libre allure. Appliquer ce mode de régulation serait plus à même de préserver les paramètres affectifs et motivationnels lors de l'entraînement et prévenir d'éventuels risques de surcharge fonctionnelle. Toutefois, les progressions plus marquées pour le groupe FIX, et associées à une diminution de la perception de l'effort, suggèrent que le rapport volume-intensité pour le groupe EXP peut être encore ajusté dans le but d'optimiser les effets attendus sur la performance. D'autre part, l'amélioration de la performance en ambiance chaude paraît plus sensible à une limitation du stress physiologique pendant l'exercice, tandis que l'effet d'une optimisation du confort thermique s'avère minime.

Mots-clés. Acclimatation à la chaleur, exercice à libre allure, entraînement à haute intensité, perception de l'effort, perception thermique.

EFFETS COMPARES DE DEUX METHODES D'ACCLIMATATION DE COURTE DUREE SUR LA PERFORMANCE ET LA PERCEPTION DE L'EFFORT EN AMBIANCE CHAUDE

Gilles Roussey, Pierre Fontanari, Julien Louis, Thierry Bernard

INTRODUCTION

Un nombre croissant d'événements sportifs majeurs auront prochainement lieu dans des environnements chauds et/ou humides (*i.e.* Jeux Olympiques de Tokyo, 2020). Il est clairement établi que les effets délétères de la chaleur sur le plan cardiorespiratoire et/ou neuromusculaire limitent la capacité de performance de l'athlète lors d'épreuves prolongées (Nybo et al., 2014). La préparation de telles compétitions requiert ainsi de déterminer, au préalable, des stratégies efficaces mais également adaptées aux conditions écologiques d'entraînement et de préparation des athlètes. Ainsi, l'exposition répétée à une chaleur d'origine artificielle ou naturelle induit des améliorations significatives de performance lors d'un exercice prolongé à libre allure, tel qu'un contre-la-montre cycliste (Racinais et al., 2015).

Le faible intérêt porté par les athlètes et entraineurs aux stratégies d'acclimatation révèle la complexité de leur application lors de la préparation de compétitions de haut niveau (Casadio et al., 2017). En effet, si la mise en place de cycles courts (*i.e.* durée inférieure à 7 jours) répond pleinement aux contraintes temporelles des athlètes de haut niveau, son application ne garantit pas un développement optimal des réponses physiologiques à la chaleur pendant l'exercice (Chalmers et al., 2014). Dès lors, la production de hautes intensités peut être une solution dans le but de maximiser les adaptations potentielles à court terme, notamment par la diminution sous-jacente du délai avant atteinte de températures corporelles « cibles » (Wingfield et al., 2016). Son association à une réduction du volume spécifique d'entraînement, par exemple lors de stages spécifiques en phase de pré-compétition, présente un intérêt réel dans le cadre des sports collectifs (Sunderland et al., 2008) mais aussi d'endurance, dont les épreuves sont concernées par de multiples changements d'allure inhérents au scénario de course.

Néanmoins, les « hautes intensités » appliquées dans l'étude de Wingfield (2016) sont bien inférieures aux seuils généralement soutenus lors de la préparation d'athlètes de haut niveau. Dans ce contexte, une étude récente s'est intéressée aux effets d'un stage d'acclimatation en milieu tropical (*i.e.* Guadeloupe) au cours duquel des triathlètes de haut

niveau ont conservé volumes et intensités d'entraînement habituels (Schmit et al., 2017). Toutefois, les résultats issus de ce protocole mettent en valeur l'apparition de phénomènes relatifs à un surentraînement fonctionnel, tels qu'une réduction de la capacité de performance de l'athlète. Dans ce contexte, l'alternative d'une régulation de l'intensité des sessions d'entraînement par le biais d'un marqueur perceptif sensible à la fatigue, par exemple la perception de l'effort (*i.e.* RPE-9 à RPE-19 ; Meeusen et al., 2013), peut être pertinente. Si l'application de telles méthodes génère des améliorations significatives du potentiel aérobie chez des sujets sédentaires (Parfitt et al., 2012), son impact chez l'athlète entraîné demeure toutefois inconnu. Le premier objectif de ce protocole est de comparer les effets respectifs d'un protocole dit « expérimental » associant une diminution du volume d'entraînement à la production d'intensités variables (*i.e.*, plage de faibles à très élevées) et autorégulées, et d'un protocole dit « classique » à intensités imposée et peu variables, sur la performance en cyclisme. Celle-ci sera quantifiée lors d'une épreuve simulée de contre-la-montre en ambiance chaude répétée immédiatement puis sept jours après la fin du cycle d'entraînement.

D'autre part, l'application de hautes intensités est susceptible de potentialiser la diminution de la sensation de chaleur et l'amélioration sous-jacente du confort thermique observée après quelques jours d'exposition répétée à la chaleur (Wingfield et al., 2016). Si la perception thermique est considérée comme un élément médiateur de la perception de l'effort lors d'un exercice en ambiance chaude (Flouris and Schlader, 2015), l'évolution des interactions entre ces marqueurs perceptifs suite à une acclimatation n'est pas clairement identifiée. Par conséquent, le second objectif de ce protocole est de comparer l'évolution respective des marqueurs perceptifs et physiologiques induits par l'application de hautes intensités pendant l'entraînement, lors d'une épreuve au cours de laquelle les sujets ont produit des seuils de perception de l'effort (RPE) variables.

METHODOLOGIE

Sujets

Dix-sept cyclistes ou triathlètes (35,4 ± 11,0 ans ; 178,8 ± 5,9 cm ; 72,9 ± 7,8 kg ; PMA 333 ± 40 W ou 4,6 ± 0,5 $W.kg^{-1}$) ne présentant aucun désordre d'origine métabolique, somatique ou cardiorespiratoire ont été inclus dans ce protocole. En accord avec la grille de classification des sujets en sciences du sport (De Pauw et al., 2013), ces sujets relèvent d'un niveau de performance 3-4 ou « entraîné » à « très entraîné ». Les participants n'ont pas été exposés à la chaleur (*i.e.* températures ambiantes supérieures à 25 °C) en situation d'activité au

cours des 30 jours précédant la session d'inclusion. L'ensemble du protocole expérimental est conforme à la Déclaration d'Helsinki et a été approuvé par un comité éthique universitaire interne. Préalablement à son inclusion, chaque sujet a reçu par écrit l'ensemble des instructions et procédures relatives au protocole puis a donné son consentement écrit à participer à l'expérimentation.

Design expérimental

Le protocole expérimental (*i.e.* durée totale de 6 semaines) comprend une session d'inclusion et deux sessions de familiarisation en semaine 1, deux sessions expérimentales pré-entraînement en semaine 2, une période de repos en semaine 3, un cycle d'acclimatation de cinq sessions d'entraînement en semaine 4 et trois sessions expérimentales post-entraînement en semaines 5 et 6 (fig. 1). Le protocole a été intégralement complété dans le sud-est de la France au cours de la période « hivernale » allant d'octobre à avril. Les sessions expérimentales ont été conduites pour chaque sujet sur une plage horaire similaire (± 2 h).

Une session d'inclusion a permis d'évaluer la puissance maximale aérobie (PMA) sur un ergocycle piloté par ordinateur (Schoberer Rad Messtechnik, Jülich, Welldorf, Germany). L'épreuve triangulaire a débuté par un échauffement de 6 min à 100 W, suivi de paliers de 30W toutes les 2 min jusqu'à épuisement du sujet. La PMA a été calculée à partir de la formule suivante : $PMA = PO_{fin} + (t/120) \times 30$ (PO_{fin} = puissance moyenne produite lors du dernier incrément complété).

Suite à son inclusion, chaque sujet a été assigné, de manière aléatoire et randomisée, à un protocole d'acclimatation dit « expérimental » (EXP ; 9 sujets) ou à un protocole d'acclimatation classique dit « à intensité fixe » (FIX ; 8 sujets) réalisé en semaine 4. L'ensemble des sessions s'est déroulé dans une chambre climatique ventilée par débit d'air contrôlé, et dont les paramètres environnementaux (*i.e.* température, humidité) ont été continuellement mesurés à l'aide d'une sonde adaptée et pilotée par ordinateur (Testo, Forbach, France). Les exercices ont été réalisés sur un ergocycle (Wattbike, Wattbike LTD, Nottingham, UK) dont le modèle a été préalablement validé dans la littérature pour l'usage en sciences du sport (Hopker et al., 2009).

Préalablement à chaque session expérimentale, il a été demandé aux sujets de limiter toute consommation d'alcool, de tabac, de café, de thé ou de boisson énergisante et d'éviter toute séance mobilisant fortement le potentiel aérobie au cours des 24 h précédentes, et de dormir au moins 7 h au cours de la nuit qui précède. Les sujets sont également tenus de consommer la même quantité et le même type d'aliments lors des deux repas précédant chacune

des sessions expérimentales, et d'absorber un volume d'eau minimal de 500 ml. Des consignes plus souples ont été appliquées lors des sessions d'entraînement destinées à favoriser l'acclimatation à la chaleur.

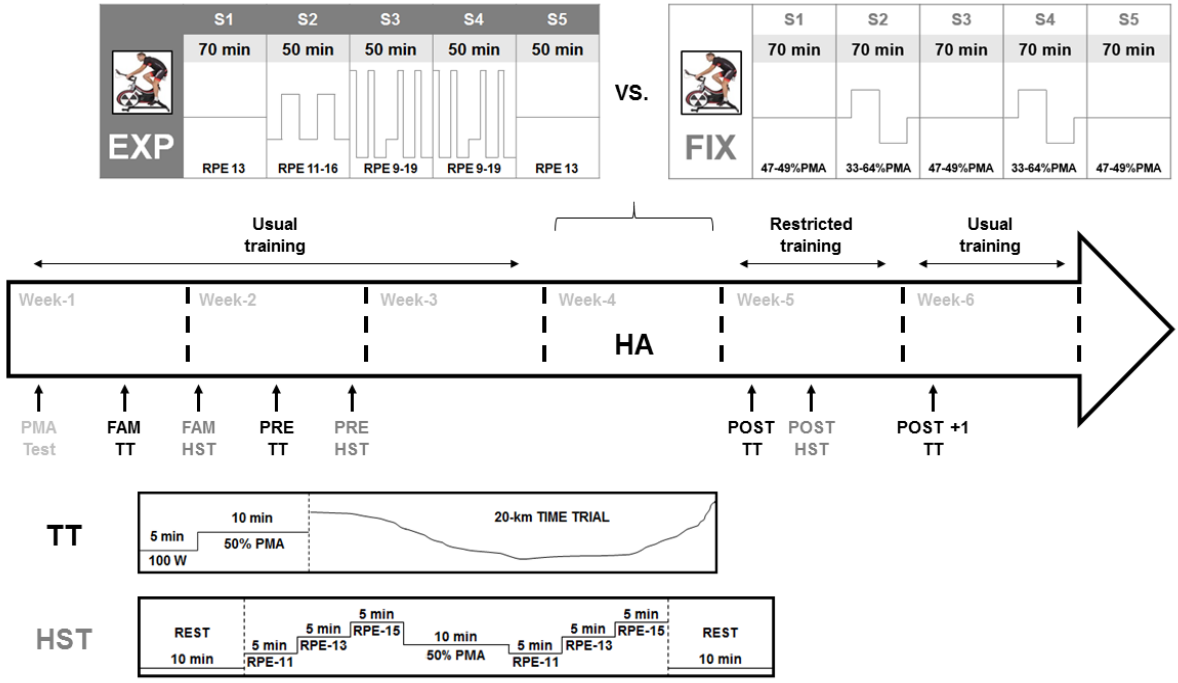


Fig.1. Description du protocole expérimental détaillé. EXP = groupe « expérimental » à intensité variable et autorégulée. FIX = groupe à intensité fixe et peu variable. TT = épreuve de contre-la-montre 20 km ; HST = épreuve-test de tolérance à la chaleur à RPE fixe ; FAM = session de familiarisation à l'épreuve TT ; HA = période d'acclimatation à la chaleur.

Epreuve expérimentale de tolérance à la chaleur (HST)

Protocole

Une épreuve de « tolérance à la chaleur » (HST pour « Heat Stress Tolerance ») a été répétée par les sujets à deux reprises, soit avant (HST-PRE, en semaine 3) et après (HST-POST, en semaine 4) le cycle d'acclimatation à la chaleur. L'épreuve consiste d'abord en une variation par intervalles de 5 min du seuil de RPE fixe soutenu (*i.e.* RPE-11, RPE-13, RPE-15 ; échelle RPE 6-20 de Borg ; Pageaux, 2016). Cette étape sera ainsi répétée sur deux périodes de 15 min, entrecoupées par une période de 10 min au cours de laquelle le sujet maintiendra 50 % de PMA, pour une durée totale de l'épreuve de 40 min (fig. 1). Les sessions HST-PRE et HST-POST ont été effectuées en ambiance chaude (35 °C ; 40 % HR ou Humidité Relative) sans ventilation

forcée ni moyen d'hydratation disponible. Une session de familiarisation en ambiance tempérée (22 °C ; 50 % HR) a été préalablement complétée en semaine 1. Suite aux mesures pré-expérimentales, le sujet préalablement équipé est installé dans la chambre climatique puis laissé au repos pendant 10 min avant le début de l'exercice, lui-même suivi d'une période de récupération de 10 min.

Mesures

Un prélèvement urinaire a été systématiquement effectué dès l'arrivée du sujet au laboratoire pour être analysé dans le but de déterminer la gravité spécifique (SG). Dans le cas où SG > 1,02 $g.ml^{-1}$, le sujet était invité à ingérer un volume d'eau complémentaire équivalent à 0,5 % de son poids de corps. Le sujet a complété une série d'échelles de Likert de 100 mm afin de reporter *(i)* son état de fatigue globalement ressenti (0-mm : pas du tout fatigué ; 100-mm : extrêmement fatigué) et *(ii)* la qualité de son sommeil la nuit précédant la session (0-mm : meilleur sommeil possible ; 100-mm : plus mauvais sommeil possible).

Afin de calculer les pertes hydriques induites par l'exercice (BML), la masse corporelle du sujet a été contrôlée à l'aide d'une balance électronique (Tanita). La concentration sanguine en lactates [La^-] a été vérifiée à partir d'un premier échantillon de sang de 5 µl prélevé au niveau du lobe de l'oreille et analysé via le système Lactate Pro (LT-1710, Elitech, Puteaux, France). Ces deux mesures ont été répétées à l'issue de l'exercice. Un second échantillon de sang de 65 µl prélevé à l'aide d'un capillaire héparinisé a été analysé à partir du système I-STAT (Abbott, Lake Bluff, IL) via la cartouche compatible EC4+ afin de déterminer le taux hématocrite sanguin (HCT ; Rudolf et al., 2015). La mesure de HCT et l'estimation sous-jacente du taux d'hémoglobine (Hb) ont été exploitées pour le calcul de l'expansion pré-post acclimatation du volume plasmatique (PV ; Greenleaf et al., 1979).

Les concentrations en ions sodium de la sueur évacuée pendant l'exercice [Na^+] ont été quantifiées. Avant l'entrée dans la chambre climatique, une compresse stérile non tissée (5 x 5 cm) a été fixée sur chaque omoplate après nettoyage et rinçage de la zone cutanée au moyen d'un film adhésif transparent (Tegaderm, 3M, Germany ; dimension 10 x 10 cm). A la fin de l'épreuve, les compresses ont été retirées à l'aide d'une pince stérilisée et déposées chacune dans une seringue stérile pour l'extraction de la sueur. Les échantillons de ± 5 mm^3 ont été conservés dans des tubes de type Eppendorf à -18°C jusqu'à exécution des analyses. La quantification de [Na^+] a été effectuée pour chaque échantillon à l'aide d'un spectromètre d'absorption atomique (Spectraa 800, Verian, Palo Alto, CA) préalablement calibré.

Pendant l'épreuve, la fréquence cardiaque (FC) a été relevée de manière continue à l'aide d'un capteur télémétrique connecté à l'ergocycle (Garmin Pro, Garmin, USA). La température centrale a été contrôlée dès l'arrivée du sujet au laboratoire (BASE) à partir du point gastro-intestinal via une capsule ingérable thermosensible (e-Celsius, Bodycap Medical, Caen, France ; longueur 17,2 mm, diamètre 8,2 mm, poids 2 g) validée scientifiquement pour la mesure de la température chez l'homme (Chapon et al., 2012). Afin d'assurer la reproductibilité des mesures, il a été demandé à chaque sujet d'ingérer la gélule à même heure (± 1 h) dans un délai de 6 à 12 h précédant chaque session expérimentale. Pendant la session, les données ont été collectées par intervalles de 30 sec à l'aide d'un système de recueil télémétrique spécifique, puis téléchargées à partir du logiciel fournisseur après connexion à un ordinateur de type PC.

La température cutanée (T_{SK}) a été également contrôlée en continu sur huit sites distincts à savoir le front (T_{face}), l'épaule droite (T_{epa}), la partie supérieure gauche de la poitrine (T_{poi}), la partie antérieure du bras droit (T_{bic}), la partie postérieure du bras gauche (T_{tri}), la partie supérieure de la main gauche (T_{main}), la face antérieure de la cuisse droite (T_{cui}) et la face postérieure de la jambe gauche (T_{jam}) à l'aide de capteurs thermiques de surface (type Pt-100, Grant Instruments). Les capteurs ont été fixés à l'aide d'un scotch adhésif (Blenderm) et maintenus pendant l'épreuve par un filet tubulaire, après rasage et dégraissage préalable à l'alcool 70 °C de chaque zone de fixation. Les mesures ont été collectées par intervalles de 15 sec à l'aide d'un système d'acquisition connecté à un ordinateur de type PC (Keithley DMM 2700). La température cutanée moyenne a été calculée à chaque intervalle de mesure à partir de l'expression suivante (ISO standard 9886, 2004) :

$$T_{SK} = (0{,}07*T_{face}) + (0{,}175* T_{epa}) + (0{,}175* T_{poi}) + (0{,}07* T_{bic}) + (0{,}07* T_{tri}) + (0{,}05* T_{main}) + (0{,}19* T_{cui}) + (0{,}2* T_{jam})$$

Le suivi de T_{face} a fait l'objet d'une analyse spécifique en parallèle de T_{SK}. Enfin, le confort et la sensation thermique ont été relevés au départ de l'exercice (DEB), à l'issue du bloc de travail de 10 min à intensité fixe (MED) et en fin d'épreuve (FIN). Le ressenti thermique de l'environnement a été évalué en réponse à la question « Comment percevez-vous l'ambiance thermique actuelle ? » à l'aide d'une échelle spécifique graduée de -3 (*i.e.* très froid) à 3 (*i.e.* très chaud). De même, le confort thermique a été déterminé en réponse à la question « Vous sentez-vous à l'aise dans cet environnement thermique ? » à partir d'une échelle graduée de 0 (*i.e.* pas du tout) à 3 (*i.e.* extrêmement ; Gagge et al., 1969).

Epreuve expérimentale de contre-la-montre (TT)

Protocole

Une épreuve de contre-la-montre de 20 km (TT pour Time Trial) a été reproduite dans une ambiance chaude et modérément humide (35 °C ; 40 % RH) par les sujets à 3 reprises soit avant (TT-PRE, en semaine 3), immédiatement (TT-POST1, en semaine 5) et 8 jours (TT-POST2, en semaine 6) après le cycle d'acclimatation (fig. 1). Une session de familiarisation a été effectuée en semaine 2, préalablement à la session TT-PRE, afin de limiter les effets inhérents à l'apprentissage sur la production de puissance lors de l'épreuve de référence.

Suite aux mesures pré-expérimentales, le sujet préalablement équipé est installé à l'intérieur de la chambre climatique, puis laissé au repos pendant 5 min. Après un protocole d'échauffement de 10 min à 100 W puis 5 min à 50 % de PMA, l'épreuve de contre-la-montre est alors réalisée. Au cours de l'épreuve, les sujets ont été exposés à un flux d'air continu dispensé au moyen d'un ventilateur du commerce et invités à boire *ad libitum* lors des sessions de familiarisation et TT-PRE. Le volume total d'eau disponible en TT-POST et TT-POST1 a été limité en se basant sur la quantité totale ingérée en TT-PRE.

Mesures

Le contrôle pré- post- HST des différents indicateurs de l'état de fatigue, de la qualité de sommeil pré-session, de SG, de BML et de [La^-] ont été réalisés dans des conditions similaires au TT.

La perception de l'effort a été évaluée tous les 4 km à partir de l'échelle RPE 6-20 de Borg en réponse à la question « Comment percevez-vous l'effort actuellement produit ? ». Le confort et la sensation thermique ont été contrôlés selon la même méthodologie que celle appliquée lors de l'épreuve HST et FC enregistrée en continu.

Sessions d'entraînement

Au cours des cinq sessions d'entraînement réalisées sur une plage de 5 ± 1 jours consécutifs (fig. 1), les sujets inclus en EXP ont été sollicités à des intensités autorégulées dans le but de maintenir un seuil de RPE prédéfini et variable (*i.e.* entre RPE-9 et RPE-19 sur l'échelle 6-20 de Borg) pour un volume total d'entraînement de 270 min. Les sujets inclus en FIX ont développé des intensités imposées, sous-maximales et peu variables pour un volume total d'entraînement de 350 min. Les intensités ont été définies individuellement à partir des

performances réalisées lors de l'épreuve HST-PRE (*i.e.* puissances moyennes soutenues à RPE-11, RPE-13 et RPE-15).

Les protocoles d'acclimatation proposés dans ce travail ont été conçus à partir d'une synthèse des récentes investigations scientifiques réalisées en thermo-physiologie intégrée lors de cycles d'acclimatation à la chaleur de courte durée (Chalmers et al., 2014 ; Périard et al., 2015). Les sujets pouvaient boire *ad libitum* durant les sessions d'entraînement intégralement réalisées en environnement chaud (35 °C ; 40 % HR).

La charge d'entraînement de chaque session, exprimée en unités arbitraires (u.a.) est calculée à partir du produit de l'intensité moyenne soutenue et de la durée exprimées respectivement en % PMA et minutes.

Analyse statistique

L'ensemble des données est présenté ici sous la forme de moyenne ± écart-type. Les intensités et valeurs de charge d'entraînement totale produites par les groupes EXP et FIX lors du cycle d'acclimatation ont été comparées à l'aide d'un test de Student. Les effets immédiats (TT-PRE *vs.* TT-POST 1) ou retardé (TT-PRE *vs.* TT-POST 2) de l'acclimatation ("test") ou les différences intergroupes ("groupe"), observés pour les marqueurs de performance (*i.e.* temps et puissance moyenne), physiologiques et perceptifs contrôlés pendant TT ont été vérifiés par analyse de variance (ANOVA) à deux facteurs (conditions "test" x "groupe" ; 2 x 3). Une analyse similaire a été appliquée sur les marqueurs de performance, physiologiques ou subjectifs mesurés en début de session HST (conditions "test" x "groupe" ; 2 x 2). Enfin, une analyse de variance à mesures répétées (conditions "test" x "groupe" ; 2 x 2 x 3) a été appliquée sur les variations (DEB *vs.* MED *vs.* FIN) de FC, T_{SK}, T_{face} et des marqueurs de perception thermique au cours de HST. Un test post-hoc de Tukey a été systématiquement réalisé afin de comparer chaque paire de données pour lesquelles un effet significatif de la condition "test" ou "groupe" a été préalablement observé. Pour tous ces traitements, la distribution normale des données a été préalablement vérifiée à partir du test de Shapiro-Wilk. En présence d'éventuelles violations de sphéricité lors de mesures répétées, le nombre de degrés de liberté a été ajusté à partir du correctif de Greenhouse-Geisser. La taille de l'effet des analyses de variance (ES) a été déterminée à partir du calcul de l'êta carré partiel interprété selon le référentiel proposé par Ferguson (2009) : pas d'effet si $\eta P^2 < 0,05$, effet minimal si $0,05 \leq \eta P^2 < 0,26$, effet modéré si $0,26 \leq \eta P^2 < 0,64$, effet large si $\eta P^2 \geq 0,64$. Les analyses statistiques ont été assurées à l'aide du logiciel Statistica (Statistica version 8.0 for Windows, Statsoft, Tulsa, OK, USA).

Afin d'étudier de manière plus approfondie certaines variables par la distinction des réponses individuelles à l'acclimatation à la chaleur, les marqueurs moyens de performance lors de TT (*i.e.* temps, puissance moyenne) ou de HST (*i.e.* puissance moyenne pendant chaque bloc d'exercice à RPE fixe) ont été analysés via la méthode dite d'inférence basée sur la taille de l'effet (Hopkins et al., 2009). La taille des différences intragroupe (EXP et FIX), intergroupe (EXP *vs.* FIX en TT-PRE, TT-POST 1 et TT-POST 2) et les différences de variation entre les groupes (EXP *vs.* FIX ; TT-PRE *vs.* TT-POST 1, TT-PRE *vs.* TT-POST 2) induites par l'acclimatation ont été calculées à partir des données brutes et interprétées selon le référentiel proposé par Hopkins. Les seuils ES de 0,2, 0,6, 1,2, 2,0 et 4,0 correspondent respectivement à des tailles d'effets faibles, modérés, larges, très larges et extrêmement larges de l'acclimatation ou du groupe. Les seuils de variation minimale significative (SWC) définis pour le temps de parcours et la puissance moyenne sont respectivement de 0,3 et de 0,7 % (Paton and Hopkins, 2006 ; Bonetti and Hopkins, 2009). L'interprétation de l'effet est considérée comme *incertaine* si *(i)* la taille de l'effet est inférieure à 0,2 ou *(ii)* l'intervalle de confiance à 90 % intègre une valeur nulle (Hopkins et al., 2009). La probabilité de vérifier des valeurs supérieures ou inférieures aux seuils de variation minimale significative est déterminée à partir du référentiel suivant : *certainement pas (< 1 %), très improbable (1-5 %), improbable (5-25 %), possible (25-75 %), probable (75-95 %), très probable (95-99 %), certainement (> 99 %).*

RESULTATS

Charge d'entraînement et réponses subjectives

Alors que la comparaison des puissances moyennes développées lors des 5 sessions d'entraînement ne montre aucune différence entre EXP et FIX (voir tab. 1 ; $p > 0,05$), le calcul des charges d'entraînement met quant à lui en évidence une différence de 29 % entre le groupe EXP et FIX (EXP *vs.* FIX : 11875 ± 1664 *vs.* 16747 ± 1924 u.a. ; $p < 0,001$).

Le suivi des marqueurs subjectifs de fatigue ($p = 0,71$; ES = 0,002) et de sommeil ($p = 0,44$; ES = 0,020) contrôlés préalablement à chaque épreuve HST ne montre aucune différence significative entre les valeurs pré et post-acclimatation.

Conditions ambiantes pendant les épreuves

Les valeurs de températures et d'humidités relatives ambiantes moyennes lors de HST-PRE et HST-POST étaient de 38,3 ± 0,9 °C et 27,2 ± 4,2 % HR, et 38,3 ± 1,5 °C et 31,9 ± 9,0 % HR.

	EXP		FIX	
	Durée (min)	**Intensité (% PMA)**	**Durée (min)**	**Intensité (% PMA)**
Session 1	70	41,6 ± 7,3	70	44,7 ± 7,6
Session 2	50	41,8 ± 8,0	70	50,0 ± 4,9 #
Session 3	50	44,7 ± 5,1	70	47,4 ± 6,1 #
Session 4	50	47,0 ± 6,7	70	50,7 ± 4,1 #
Session 5	50	40,0 ± 8,8	70	46,0 ± 4,1 #

Tab. 1. Durées et intensité moyenne (*i.e.* puissance moyenne exprimée en % PMA) développée au cours des cinq sessions d'entraînement, respectivement pour les groupes EXP et FIX. * *Différence significative de l'intensité entre EXP et FIX (p < 0,05). # Différence significative de charge d'entraînement (intensité moyenne x temps) entre EXP et FIX (p < 0,05).*

Lors de TT-PRE, TT-POST-1 et TT-POST 2, ces paramètres étaient respectivement de 38,6 ± 0,6 °C et 39,7 ± 7,0 % HR, de 39,1 ± 0,4 °C et 39,6 ± 2,5 % HR et de 39,4 ± 0,4 °C et 43,7 ± 1,5 % HR. Les conditions ambiantes relevées au cours de ces deux épreuves ne présentent aucune différence significative quelle que soit TT ou HST complétée (p > 0,05).

Performance pendant l'épreuve HST

L'analyse de variance n'a vérifié aucun effet particulier de l'acclimatation (*i.e.* HST-PRE vs HST-POST) sur la puissance moyenne soutenue dans chacun des blocs à RPE fixe (*i.e.* p > 0,05). Le calcul des tailles d'effet ne valide qu'une *probable* augmentation de la puissance développée lors du second bloc à RPE-15 pour FIX (ES = 0,3 ± 0,3). La faible taille de l'effet est due à une grande variabilité interindividuelle (+10,1 ± 16,7 %).

La comparaison PRE *vs.* POST- des deux blocs répétés à même seuil de RPE fixe lors des HST (*i.e.* RPE-11, RPE-13 et RPE-15) n'a révélé aucune différence significative apparente (p > 0,05). Les coefficients de variation de la puissance moyenne calculés pour chaque seuil de RPE sont respectivement, en HST-PRE, de 17,9 ± 10,3 %, 17,2 ± 14,4 % et 9,2 ± 8,1 % pour EXP, et de 14,5 ± 10,9 %, 14,2 ± 8,8 % et 7,5 ± 5,0 % pour le groupe FIX. Au cours de HST-POST, ces mêmes coefficients ont été de 12,1 ± 9,0 %, 8,0 ± 6,6 % et 6,7 ± 4,1 % respectivement en RPE-11, RPE-13 et RPE-15 pour EXP, et 6,9 ± 4,4 %, 4,2 ± 4,0 % et 4,2 ± 4,1 % pour FIX.

Mesures physiologiques et perceptives pendant l'épreuve HST

L'analyse de variance révèle un effet significatif de l'acclimatation (HST-POST *vs.* HST-PRE ; tab. 3) sur l'augmentation de T_{CO} pendant HST est observé (p = 0,007 ; ES = 0,216), sans différence significative entre EXP (-28 ± 19 %) et FIX (-21 ± 33 %). Les valeurs de HCT avant exercice ne sont pas modifiées en HST-POST quel que soit le groupe (p = 0,34 ; ES = 0,031), bien qu'elles soient à cet instant supérieures pour EXP par rapport à FIX (p = 0,017 ; ES = 0,175). Le volume plasmatique tend à augmenter après acclimatation pour FIX (+1,6 ± 13,1 %) et à diminuer pour EXP (-8,0 ± 16,0 %), toutefois ces variations ne sont pas significatives (p = 0,20). De même, les valeurs de BML (p = 0,64 ; ES = 0,008) et de $[Na^+]$ sudorale (p = 0,13 ; ES = 0,081) ne présentent pas d'effet significatif induit par la phase d'acclimatation dans les deux groupes.

Aucune différence significative n'est constatée entre les mesures répétées de FC pendant HST-PRE et HST-POST (p = 0,23 ; ES = 0,049). Inversement, les mesures répétées de T_{SK} présentent, à échelle minimale, des réponses différentes à l'acclimatation entre les deux groupes (fig. 3 ; p = 0,029 ; ES = 0,129). Alors que l'élévation de T_{SK} a été systématique quels que soient les épreuves ou les groupes lors de la première moitié (DEB < MED ; p < 0,05), les différences de variation apparaissent lors de la seconde moitié de l'épreuve (MED *vs.* FIN).

		EXP		**FIX**	
		HST-PRE	**HST-POST**	**HST-PRE**	**HST-POST**
Bloc 1	RPE-11	30,8 ± 8,5	27,4 ± 5,8	31,2 ± 7,1	31,6 ± 10,6
	RPE-13	42,8 ± 9,0	41,8 ± 8,4	45,2 ± 6,5	45,9 ± 8,9
	RPE-15	63,1 ± 11,4	64,1 ± 8,1	64,9 ± 4,7	66,6 ± 10,3
Bloc 2	RPE-11	39,7 ± 10,1	34,6 ± 11,8	38,1 ± 6,9	38,0 ± 9,6
	RPE-13	48,4 ± 7,6	49,0 ± 6,2	49,9 ± 5,1	50,1 ± 7,9
	RPE-15	62,0 ± 8,3	61,1 ± 6,7	62,6 ± 3,5	68,9 ± 10,6*

Tab. 2. Valeurs moyennes de puissance développées au cours de chaque bloc de travail à RPE fixe lors de HST (à RPE-11, RPE-13 et RPE-15 ; premier bloc – 0 à 15 min – et second bloc – 25 à 40 min) en % PMA. * *Effet significatif de l'acclimatation (PRE < POST, p < 0,05).*

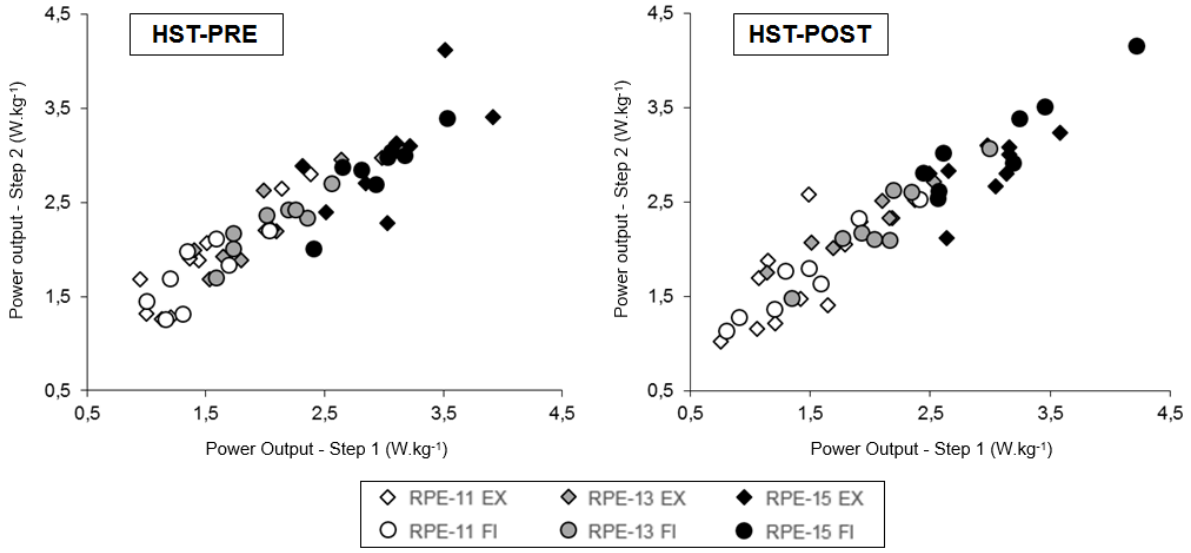


Fig. 2. Distribution des puissances moyennes produites lors des deux blocs de travail à RPE-11, RPE-13 et RPE-15 par les groupes EXP et FIX lors des épreuves HST-PRE et HST-POST.

	EXP		**FIX**	
	HST-PRE	**HST-POST**	**HST-PRE**	**HST-POST**
Fatigue pré-session (u.a.)	2,8 ± 2,4	2,9 ± 2,2	2,7 ± 1,7	2,2 ± 2,1
Sommeil pré-session (u.a.)	2,5 ± 2,1	3,6 ± 3,4	2,1 ± 2,1	2,4 ± 2,5
Fréquence cardiaque (bpm)				
DEB	108 ± 14	98 ± 17	117 ± 25	108 ± 17
MED	146 ± 13	141 ± 11	149 ± 17	150 ± 15
FIN	164 ± 15	160 ± 17	169 ± 21	168 ± 20
Température centrale (°C)				
BASE	36,9 ± 0,2	37,0 ± 0,3	37,1 ± 0,3	37,0 ± 0,4
Gain thermique (°C)	1,5 ± 0,4	1,0 ± 0,3*	1,5 ± 0,4	1,1 ± 0,4*
Pertes hydriques (kg)	2,2 ± 0,7	2,0 ± 0,7	1,9 ± 0,4	1,9 ± 0,8
$[Na^+]$ sudorale ($mg.l^{-1}$)	1603 ± 292	1367 ± 515	1574 ± 583	1268 ± 494
Taux hématocrite (%)	47 ± 3	50 ± 4	46 ± 4	45 ± 3

Tab. 3. Evolution des marqueurs physiologiques mesurés pendant l'épreuve HST (PRE *vs.* POST). Les données sont présentées sous la forme de moyenne ± écart-type. *BASE, valeur au repos ; DEB, valeur moyenne au cours de la première minute de l'épreuve ; MED, valeur moyenne à la fin du bloc à 50 % de PMA (i.e. 22'30 à 24'30) ; FIN, valeur moyenne à la fin du second bloc à RPE-15 (i.e. 37'30 à 39'30). [Na+], concentration en sodium. * Effet significatif de l'acclimatation (PRE < POST, p < 0,05).*

L'application du test post-hoc a ainsi révélé une diminution de T_{SK} en HST-POST pour FIX (DEB *vs.* FIN ; p = 0,31) alors que celle-ci augmentait sur la même période en HST-PRE (DEB *vs.* FIN ; p < 0,001). A l'inverse, aucun changement réel de la cinétique de température cutanée n'est constaté à l'issue de la phase d'acclimatation pour EXP (p > 0,05). De même, les mesures répétées de T_{face} présentent également des réponses à l'acclimatation différentes entre les deux groupes (fig. 3 ; p = 0,039 ; ES = 0,123). Une diminution significative est observée au cours des deux épreuves pour EXP (DEB > FIN ; p < 0,05) alors que la valeur moyenne tend à être plus élevée en HST-POST (POST *vs.* PRE : 37,2 ± 0,9 °C *vs.* 36,6 ± 1,0 °C). Pour FIX, ce même effet n'est visible que pendant HST-POST, alors que la valeur moyenne tend à être plus faible que lors de HST-PRE (POST *vs.* PRE : 36,3 ± 0,7 °C *vs.* 36,7 ± 0,5 °C).

En dépit de ces réponses particulières, un effet significatif et identique de l'acclimatation sur la sensation de chaleur est observé pour les deux groupes (p = 0,007 ; ES = 0,169). Alors que ce paramètre tend à augmenter progressivement au cours de HST-PRE (FIN *vs.* DEB : 1,2 ± 1,0 u.a.), il demeure stable au cours de HST-POST (FIN *vs.* DEB : 0,1 ± 1,4 u.a.). Malgré la modification des réponses sensorielles, l'évolution des mesures répétées du confort thermique perçu pendant l'exercice ne sont pas significativement modifiées par l'acclimatation (fig. 3 ; p = 0,28 ; ES = 0,042). Pour autant, ce paramètre se dégrade progressivement dans le temps au cours de HST-PRE (différence entre DEB et FIN, EXP *vs.* FIX : -1,3 ± 0,8 *vs.* -0,9 ± 1,0 u.a.) et de HST-POST (EXP *vs.* FIX : -0,7 ± 1,0 *vs.* -0,4 ± 1,4 u.a.).

Performance au cours de TT

L'analyse de variance ne montre pas d'effet significatif immédiat de l'acclimatation sur la performance lors de TT (fig. 4 ; p = 0,56 ; ES = -0,23). Le calcul des tailles d'effet suggère quant à lui des effets *incertains* de l'acclimatation pour EXP (-1,2 ± 2,4 % ; ES : -0,22 ± 0,26). A l'inverse, une très *probable* faible diminution du temps de parcours est envisagée pour FIX (-2,8 ± 1,6 % ; ES : -0,44 ± 0,18). La performance a été immédiatement améliorée pour 6 des 9 sujets du groupe EXP (-23 ± 44 s), et pour l'ensemble des 8 sujets du groupe FIX (-52 ± 30 s). Les effets retardés de l'acclimatation sont, en revanche, *incertains* aussi bien pour EXP (-0,1 ± 3,5 % ; ES = 0,03 ± 0,39) que pour FIX (-1,5 ± 3,4 % ; ES : -0,32 ± 0,54). Les différences entre EXP et FIX sont *incertaines* pour les effets immédiats comme retardés (0,2 < ES < 0,2).

De même, aucun effet significatif de l'acclimatation n'a été constaté sur la puissance moyenne développée pendant TT (p = 0,38 ; ES = 0,36). Les sujets du groupe EXP ont produit respectivement une puissance moyenne de 69,4 ± 5,3 %, 72,3 ± 6,9 % et 69,5 ± 6,8 % PMA en TT-PRE, TT-POST 1 et TT-POST 2.

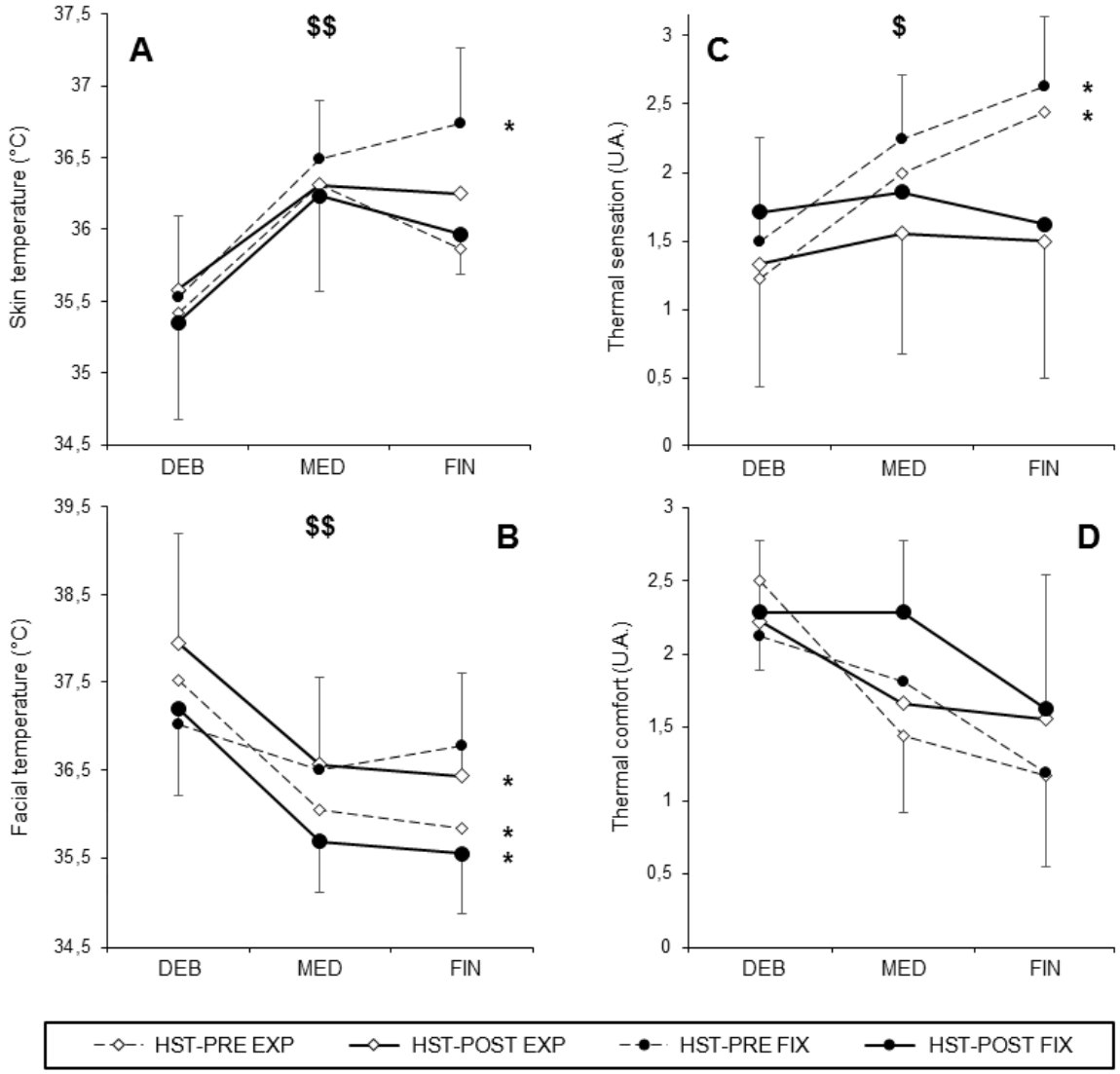


Fig. 3. Variations moyennes par groupe (EXP, losanges blancs ; FIX, ronds noirs) de la température cutanée globale (A), de la température cutanée faciale (B), de la sensation thermique (C) et du confort thermique (D) en début, milieu et fin des épreuves HST-PRE (ligne fine et pointillée) et HST-POST (ligne pleine et épaisse). *Echelle de sensation thermique : 0, sensation modérée ; 3, sensation très chaude. Echelle de confort thermique : 0, pas du tout confortable ; 3, extrêmement confortable. * Variation significative entre le début et la fin de l'épreuve (FIN vs. DEB, p < 0,05).* $^{\$}$ *Différence significative de variation pour les deux groupes (HST-POST vs. HST-PRE, p < 0,05).* $^{\$\$}$ *Différence significative de variation entre les deux groupes (HST-POST vs. HST-PRE, EXP vs. FIX, p < 0,05).*

Concernant les sujets du groupe FIX, ces mêmes valeurs ont été respectivement de 66,8 ± 5,5 %, 72,2 ± 5,4 % et 70,4 ± 6,9 % PMA. Le calcul des tailles d'effet suggère un effet *incertain* pour EXP (+4,3 ± 6,0 % ; ES = 0,29 ± 0,31), alors qu'une *très probable* faible amélioration est envisagée pour FIX (+8,1 ± 5,3 % ; ES = 0,55 ± 0,23).

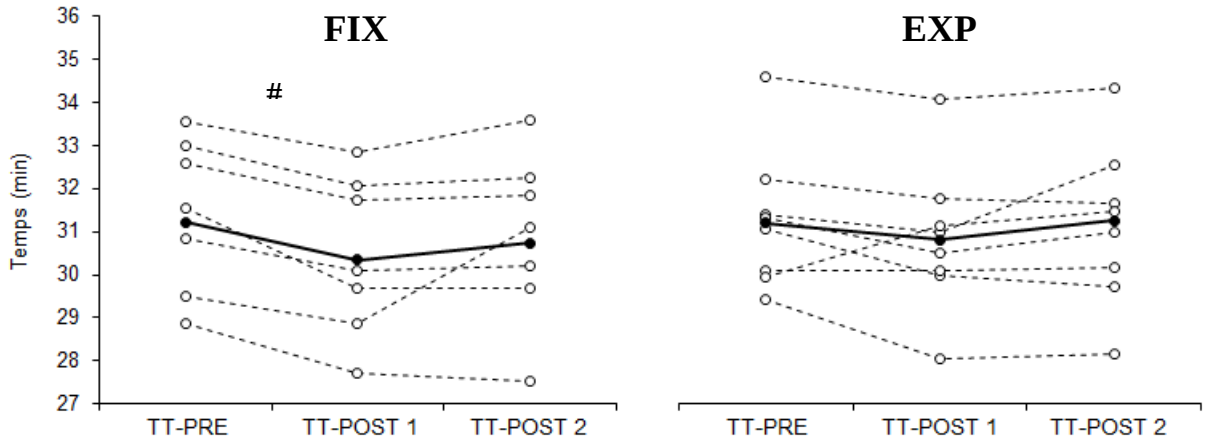


Fig. 4. Evolution du temps de parcours individuel au cours des épreuves de contre-la-montre (TT) réalisées avant acclimatation (TT-PRE), 2-3 jours après (TT-POST 1) et 8-10 jours après (TT-POST 2) la fin du cycle d'acclimatation. La courbe en trait épais représente l'évolution des valeurs moyennes de chaque groupe. $^{\#}$ *Très probable faible diminution par rapport à TT-PRE (-0,2 < ES < 0,6).*

Les effets retardés de l'acclimatation sont, en revanche, *incertains* aussi bien pour EXP (+0,3 ± 8,5 %; ES = 0) que pour FIX (+5,5 ± 8,8 % ; ES : 0,34 ± 0,40). Les différences entre EXP et FIX sont *incertaines* pour les effets immédiats comme retardés (-0,2 < ES < 0,2).

L'analyse comparée de la distribution de puissance au cours de l'épreuve TT (*i.e.* TT-PRE vs TT-POST 1 ; fig. 5) ne présente aucun effet significatif de l'acclimatation sur chacun des intervalles étudiés (p > 0,05). Le calcul des tailles d'effet suggère néanmoins une *très probable* amélioration modérée pour le groupe FIX entre 0 et 2 km (+9,9 ± 5,6 % ; ES = 0,70 ± 0,29), et entre 2 et 6 km (+10,1 ± 8,1 % ; ES = 0,72 ± 0,40). Une *probable à très probable* faible amélioration est observée sur les autres intervalles de distance (*i.e.* 6-10 km, 10-14 km, 14-18 km, 18-20 km ; 0,2 < ES < 0,6). EXP présente systématiquement un effet *incertain* de l'acclimatation (0-2 km : +8,0 ± 14,8 % ; 2-6 km : +2,9 ± 11,6 % ; -0,2 < ES < 0,2).

Par ailleurs, la puissance moyenne développée par les sujets du groupe EXP reste supérieure à celle des sujets du groupe FIX au cours de l'intervalle 0-2 km quelle que soit l'épreuve TT disputée (p = 0,026 ; ES = 0,76). Si une *probable* différence modérée est observée entre les deux groupes lors de TT-PRE (EXP *vs.* FIX : 3,4 ± 0,4 *vs.* 3,0 ± 0,3 $W.kg^{-1}$; ES = -0,93 ± 0,81), celle-ci devient néanmoins *incertaine* lors de TT-POST 1 (EXP *vs.* FIX : 3,3 ± 0,4 *vs.* 3,0 ± 0,3 $W.kg^{-1}$; ES = -0,64 ± 0,81) et de TT-POST 2.

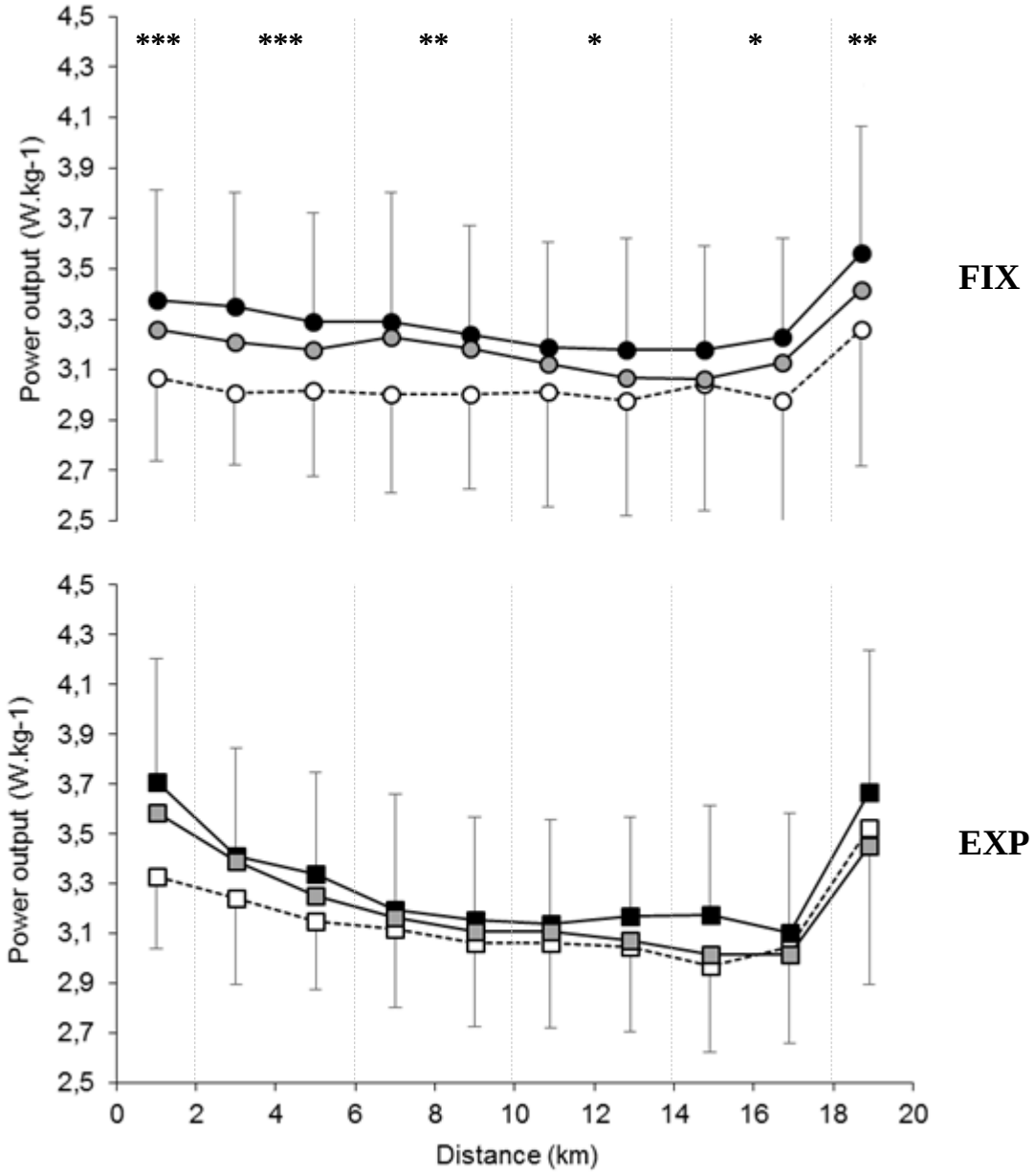


Fig. 5. Distribution de la puissance par intervalles de 2 kilomètres au cours des épreuves TT-PRE (trait pointillé, point blanc), TT-POST 1 (trait plein, point noir) et TT-POST 2 (trait plein, point gris). Les données sont présentées sous la forme moyenne ± écart-type. L'analyse statistique de la distribution est présentée par intervalles 0-2, 2-6, 6-10, 10-14, 14-18 et 18-20 km. ** Probable faible augmentation de la puissance en TT-POST 1 par rapport à TT-PRE (0,2 < ES < 0,6). ** Très probable faible augmentation de la puissance en TT-POST 1 par rapport à TT-PRE (0,2 < ES < 0,6). *** Très probable augmentation modérée de la puissance en TT-POST 1 par rapport à TT-PRE (0,6 < ES < 1,2).*

Mesures physiologiques et perceptives pendant l'épreuve TT

Aucun effet significatif de l'acclimatation n'a été vérifié pour les valeurs moyennes de FC ($p = 0,89$; ES < 0,01), de [La-] mesurée avant l'épreuve ($p = 0,73$; ES = 0,14) et après l'épreuve ($p = 0,09$; ES = 0,10). L'élévation de [La^-] pendant TT est toutefois significative pour chacun des groupes et dans chaque condition ($p < 0,05$).

Du point de vue des variables perceptives, aucun effet de l'acclimatation n'a été vérifié sur les valeurs moyennes de RPE ($p = 0,59$; ES = 0,02), de sensation thermique ($p = 0,93$; ES < 0,01) ou de confort thermique ($p = 0,72$; ES = 0,55).

DISCUSSION

Le premier objectif de ce travail était de valider l'intérêt de développer de hautes intensités, sous la forme d'exercices intermittents, lors de protocoles d'acclimatation à la chaleur de courte durée (*i.e.* 5 jours). Les perspectives éventuelles étaient d'une part de transposer leur application à des cycles d'entraînement en pré-compétition (*i.e.* affûtage), et d'autre part de potentialiser l'amélioration du confort thermique perçu. La comparaison des temps de parcours lors de l'épreuve de contre-la-montre (TT) développés avant et après la phase d'acclimatation démontre que les deux programmes sont susceptibles d'induire une amélioration sensible de la performance (EXP *vs.* FIX, diminution du temps de parcours exprimé en % TT-PRE : -1,2 ± 2,4 % *vs.* -2,8 ± 1,6 %). Si la réduction significative du volume d'entraînement (*i.e.* 23 %) est d'un réel intérêt pour les athlètes et entraîneurs dans le cadre d'une préparation à la compétition, les effets minorés observés en comparaison du groupe FIX à la suite de ce protocole à intensité variable et autorégulée suggèrent de possibles ajustements de la charge d'entraînement appliquée. De plus, seul FIX connaît une amélioration de la puissance soutenue lors du second bloc à RPE-15 de l'épreuve HST (HST-POST *vs.* HST-PRE : 3,1 ± 0,5 *vs.* 2,8 ± 0,3 $W.kg^{-1}$ pour FIX ; 2,9 ± 0,3 *vs.* 2,9 ± 0,6 $W.kg^{-1}$ pour EXP). Si des adaptations physiologiques significatives ont été observées, notamment du point de vue des cinétiques de T_{CO}, l'absence d'effets retardés sur la performance constatée dans les deux groupes laisse supposer que ces mêmes adaptations ont été incomplètes. Enfin, bien que des changements des marqueurs de perception thermique aient été constatés, nos résultats semblent montrer leur rôle minime dans la construction de l'image subjective de l'effort. La légère amélioration des performances chez les sujets du groupe FIX relèverait alors davantage de l'ajustement des réponses physiologiques face à l'exposition répétée à la chaleur.

Adapter l'usage de stratégies d'acclimatation aux conditions écologiques propres à l'entraînement de haut niveau dans les disciplines d'endurance (*e.g.* cyclisme, triathlon ; Issurin, 2010) requiert de pouvoir appliquer de hautes intensités sous forme intermittente. La production de chaleur supplémentaire potentiellement générée par leur répétition est à même d'approcher, dans un délai plus court, une charge thermique (*i.e.* élévation de T_{CO}) optimale pour l'adaptation physiologique significative de l'organisme (Périard et al., 2015). Néanmoins, seule une étude récente s'est attachée à reproduire un tel contexte dans l'optique d'une préparation à une épreuve de contre-la-montre cycliste de 20 km en ambiance chaude (Schmit et al., 2017). La diminution de la performance (*i.e.* élévation moyenne du temps de parcours de 1,7 ± 1,3 %) a été certes inattendue mais justifiée par l'apparition concomitante de phénomènes liés à un surentraînement fonctionnel tels que l'amplification de la sensation de fatigue générale perçue (Meeusen et al., 2013).

La faible amélioration de la performance post-acclimatation constatée lors de la présente étude, couplée à l'absence de variation des marqueurs subjectifs de fatigue, suggère que l'autorégulation de l'intensité ait pu prévenir la possible occurrence de ces phénomènes pour le groupe EXP. La régulation des intensités hautes et basses à partir de la production de RPE serait plus à même de préserver les paramètres affectifs et motivationnels de l'athlète au fur et à mesure du cycle d'entraînement (Parfitt et al., 2012), et ainsi contrecarrer la dégradation des paramètres psychologiques inhérentes à une surcharge fonctionnelle (Meeusen et al., 2013). De plus, si l'application de sessions à intensité autorégulée est jusqu'à présent peu utilisée chez les athlètes entraînés, l'aptitude émotionnelle supérieure de ces derniers à tolérer des seuils d'intensités élevés (*i.e.* à partir de RPE-15 ; Bixby and Lochbaum, 2006) laisse supposer des réponses affectives positives de leur part à l'issue des sessions intermittentes. Enfin, la réduction de 23 % du volume d'entraînement appliquée pour le groupe EXP peut représenter une aubaine dans les sports d'endurance, en particulier dans le but d'appliquer une période d'acclimatation juste avant la compétition (*i.e.* phase d'affûtage ; Casadio et al., 2017). Néanmoins, la comparaison des charges d'entraînement cumulées sur cinq jours (*i.e.* EXP *vs.* FIX : -29 %) suggère de possibles ajustements du rapport entre volume et intensité soutenu par le groupe EXP. Les intensités moyennes produites par les sujets du groupe EXP lors des sessions d'entraînement (voir tab. 1) n'auraient, dès lors, pas été suffisantes pour compenser la réduction du temps d'entraînement. Si ce point peut être éventuellement considéré comme une limite de l'autorégulation de l'intensité, toutefois l'argument d'une sollicitation physiologique insuffisante ne peut être vérifié en l'absence du contrôler du stimulus thermique induit par l'entraînement (*i.e.* mesure de T_{CO}).

De manière générale, et bien qu'il soit plus *incertain* pour EXP, le gain de performance sur l'épreuve TT généré par la période d'acclimatation demeure apparent. D'autre part, l'analyse comparée de la distribution de puissance au cours de TT-PRE et de TT-POST révèle qu'une large partie des sujets, en particulier ceux issus du groupe EXP, ont opté pour une production de puissance plus élevée au cours des premiers kilomètres de l'épreuve. Ainsi, parmi les 14 sujets ayant choisi cette stratégie, 11 d'entre eux ont amélioré leur performance globale par rapport à TT-PRE. Ce choix d'une réduction volontaire et progressive de l'intensité de l'exercice, reflet de l'expérience acquise par les sujets face au contexte de l'exercice, vise à limiter par mécanisme anticipatoire l'accumulation de chaleur métabolique afin de prévenir toute déficience physiologique précoce (Marino, 2004).

Du point de vue physiologique, la similitude des réponses de FC entre TT-PRE et TT-POST laisse supposer que le stress cardiovasculaire au cours de l'exercice aurait été réduit. Ces adaptations sont susceptibles de relever indirectement du ralentissement des élévations respectives de T_{CO} (*i.e.* diminution du gain thermique de 0,4 à 0,5 °C en moyenne) et de T_{SK} en HST-POST. La possible réduction de la production de chaleur métabolique par les muscles actifs, observable après une courte période d'exposition répétée à la chaleur (Fujii et al., 2012), constitue la principale explication de ce phénomène (Rivas et al., 2017). Les mécanismes sous-jacents à l'acclimatation ne seraient pas systématiquement la conséquence d'une plus grande capacité de dissipation corporelle, mais plutôt d'une plus grande efficience métabolique (Sawka et al., 1983). Ainsi, l'activation du mécanisme autonome de vasodilatation et l'afflux sanguin massif vers les vaisseaux cutanés à l'origine du stress cardiovasculaire inhérent à la chaleur, de même que l'activité sudorale, seraient directement affectés par des changements de la cinétique de température corporelle (Roberts et al., 1977). En dépit de pertes hydriques post-exercice inchangées, la tendance vers une réduction post-acclimatation de $[Na^+]$ sudorale suggère, chez certains sujets, une possible facilitation de la dissipation de chaleur par voie évaporatoire (Buono et al., 2018).

En marge de ces améliorations, l'absence de tout effet sur les valeurs de HCT ou de T_{CO} basale mesurées avant le début de HST signifie que les réponses physiologiques à l'exposition répétée à la chaleur n'ont pas été optimales. En effet, une expansion mineure du volume plasmatique peut être fréquemment constatée après 4-5 jours d'une exposition quotidienne à des températures chaudes (Périard et al., 2015). Le caractère incomplet de l'adaptation physiologique peut ainsi expliquer l'absence d'effets « retardés » de l'acclimatation sur la performance lors du TT complété 8-10 jours après la fin du protocole d'entraînement, même si

leur dissipation est fréquemment constatée dans ce même délai suite à un cycle de courte durée (Garrett et al., 2011).

L'acclimatation à la chaleur est également associée à des adaptations significatives des composantes discriminantes (*i.e.* sensation thermique) et affectives (*i.e.* confort thermique) de la perception thermique. Les adaptations similaires de la sensation de chaleur constatées pour les deux groupes en HST-POST corroborent le postulat selon lequel ces gains peuvent survenir à court terme. Ainsi, un effet optimal de l'acclimatation sur le confort thermique perçu pendant l'exercice est généralement constaté au bout de 4 à 6 jours d'exposition répétée (Périard et al., 2015) et favorise l'amélioration de la performance, par exemple lors d'exercices de type intermittent (Sunderland et al., 2008). De plus, la similitude des adaptations observées en dépit d'une moindre durée cumulée d'exposition pour EXP (*i.e.* 270 *vs.* 350 min) tend à confirmer l'impact de la production de hautes intensités sur l'optimisation de la perception thermique. En effet, le maintien de 70 %$VO2_{max}$ par intervalles de 3 minutes lors d'un cycle d'acclimatation de 5 jours induit, chez des sujets non entraînés, des adaptations supplémentaires du confort thermique en dépit d'une réduction de 66 % du temps cumulé d'exposition à la chaleur (Wingfield et al., 2016).

Les réponses conscientes à l'activation des thermorécepteurs centraux et périphériques jouent en effet un rôle majeur dans le processus complexe de régulation volontaire de l'allure (Cheung, 2010). Toutefois, l'absence de lien entre la moindre sensation de chaleur et d'éventuels gains de performance observés pendant HST-POST, en particulier lors du second bloc à RPE-15 pour FIX, atténue quelque peu l'importance accordée à la perception thermique dans les changements post-acclimatation de la perception subjective de l'effort (Flouris and Schlader, 2015). La distorsion du rapport entre adaptations physiologiques et réponses perceptives pendant l'exercice suggère le possible affaiblissement du rôle joué par l'optimisation de la perception thermique chez le sujet acclimaté (Malgoyre et al., 2018). En effet, nous constatons de manière surprenante que l'évolution de la sensation thermique pendant l'exercice n'est aucunement corrélée à celle de T_{SK} ou de T_{face}, et n'influence pas la variation du confort thermique perçu en dépit des ajustements de la cinétique de T_{CO}. Les variations de T_{face} sont pourtant susceptibles d'affecter le confort thermique et/ou la perception de l'effort pendant l'exercice (Malgoyre et al., 2018). Ces résultats pourraient être la conséquence d'un affaiblissement de la capacité de discrimination thermique inhérente à l'exercice (Gerrett et al., 2014) ou à l'acclimatation (Mäkinen et al., 2004), et/ou de facteurs d'origine méthodologique tels que la faible sensibilité des échelles d'évaluation de la perception thermique appliquées ici. A l'inverse, les ajustements post-acclimatation de la variation de température cutanée et

centrale, en particulier au cours de la seconde moitié de l'épreuve HST-POST, peuvent expliquer le travail plus important développé à même RPE par la diminution du stress thermique. Le maintien du plus large gradient possible entre valeurs centrales et cutanées de température limite la variation du débit sanguin cutané (Cheuvront et al., 2010) et la redistribution des masses sanguines vers les muscles actifs, sous-jacente à l'amélioration de la capacité de performance aérobie en ambiance chaude (Cuddy et al., 2014).

En conclusion, les données de l'étude démontrent que la réduction du volume d'exposition associée à l'application de hautes intensités autorégulées (EXP) permet d'observer une sensible amélioration post-acclimatation de la performance lors d'un exercice à libre allure, notamment concomitante au ralentissement des cinétiques de température corporelle. D'un point de vue pratique, l'application de hautes intensités dans le cadre d'un cycle d'acclimatation de courte durée demeure, en dépit des résultats, plus adaptées aux conditions écologiques de préparation des athlètes. Toutefois, le protocole FIX implique des progressions plus marquées sur cette même épreuve et associées à une diminution de la perception de l'effort. Dans le cas présent, un ajustement à la marge du volume et/ou une structure de session différente (*i.e.* élévation plus précoce de l'intensité) auraient pu jouer en faveur d'un temps de maintien plus long et/ou d'un délai plus court avant mise de l'organisme en hyperthermie. D'autre part, l'amélioration de la performance en ambiance chaude est plus sensible à une limitation du stress physiologique pendant l'exercice, tandis que l'effet d'une optimisation du confort thermique s'avère minime. L'application de stratégies d'acclimatation ou de préparation préalable à une compétition sportive se tenant en ambiance chaude doit donc nécessairement tenir compte de cet aspect.

REFERENCES

Bixby, W.R., Lochbaum, M.R., 2006. Affect responses to acute bouts of aerobic exercise in fit and unfit participants: An examination of opponent-process theory. *J. Sport. Behav. 29-2, 111.*

Bonetti, D.L., Hopkins W.G., 2009. Sea-level exercise performance following adaptation to hypoxia. *Sports Med. 39, 107-27.*

Buono, M.J., Kolding, M., Leslie, E., Moreno, D., Norwood, S., Ordille, A., Weller, R., 2018. Heat acclimation causes a linear decrease in sweat sodium ion concentration. *J. Therm. Biol. 71, 237–40.*

Casadio, J.R., Kilding, A.E., Cotter, J.D., Laursen, P.B., 2017. From Lab to Real World: Heat Acclimation Considerations for Elite Athletes. *Sports Med. 47, 1467–76.*

Chalmers, S., Esterman, A., Eston, R., Bowering, K.J., Norton, K., 2014. Short-Term Heat Acclimation Training Improves Physical Performance: A Systematic Review, and Exploration of Physiological Adaptations and Application for Team Sports. *Sports Med. 44, 971–988.*

Chapon, P.A., Gauthier, A., Bulla, J., Moussay, S., 2012. Calibration and performance assessment of a temperature sensor prototype using a 1-point calibration procedure. *Rev. Sci. Instrum. 83-11, 490-7.*

Cheung, S.S., 2010. Interconnections between thermal perception and exercise capacity in the heat: Thermal perception and exercise capacity. *Scand. J. Med. Sci. Sports 20, 53–9.*

Cheuvront, S.N., Kenefick, R.W., Montain, S.J., Sawka, M.N., 2010. Mechanisms of aerobic performance impairment with heat stress and dehydration. *J. Appl. Physiol. 109, 1989–95.*

Cuddy, J.S., Hailes, W.S., Ruby, B.C., 2014. A reduced core to skin temperature gradient, not a critical core temperature, affects aerobic capacity in the heat. *J. Therm. Biol. 43, 7–12.*

De Pauw, K., Roelands, B., Cheung, S.S., de Geus, B., Rietjens, G., Meeusen, R., 2013. Guidelines to Classify Subject Groups in Sport-Science Research. *Int. J. Sport. Physiol. Perf. 8, 111–22.*

Ferguson, C.J., 2009. An effect size primer: A guide for clinicians and researchers. *Prof. Psychol. Res. Pract. 40, 532–538.*

Flouris, A.D., Schlader, Z.J., 2015. Human behavioral thermoregulation during exercise in the heat: Human behavioral thermoregulation. *Scand. J. Med. Sci. Sports 25, 52–64.*

Fujii, N., Honda, Y., Ogawa, T., Tsuji, B., Kondo, N., Koga, S., Nishiyasu, T., 2012. Short-term exercise-heat acclimation enhances skin vasodilation but not hyperthermic hyperpnea in humans exercising in a hot environment. *Eur. J. Appl. Physiol. 112, 295–307.*

Gagge, A.P., Stolwijk, J.A.J., Saltin, B., 1969. Comfort and thermal sensations and associated physiological responses during exercise at various ambient temperatures. *Environ. Res. 2, 209–229.*

Garrett, A.T., Rehrer, N.J., Patterson, M.J., 2011. Induction and decay of short-term heat acclimation in moderately and highly trained athletes. *Sports Med. 41, 757–71.*

Gerrett, N., Ouzzahra, Y., Coleby, S., Hobbs, S., Redortier, B., Voelcker, T., & Havenith, G., 2014. Thermal sensitivity to warmth during rest and exercise: a sex comparison. *Eur. J. Appl. Physiol. 114-7, 1451-62.*

Greenleaf, J.E., Convertino, V.A., Mangseth, G.R., 1979. Plasma volume during stress in man: osmolality and red cell volume. *J. Appl. Physiol., 47-5, 1031-38.*

Hopker, J., Coleman, D., Passfield, L., 2009. Changes in cycling efficiency during a competitive season. *Med. Sci. Sport. Exerc. 41, 912–19.*

Hopkins, W.G., Marshall, S.W., Batterham, A.M., Hanin, J., 2009. Progressive statistics for studies in sports medicine and exercise science. *Med. Sci. Sport. Exerc. 41, 3–13.*

ISO Standard, 2004. 9886 Ergonomics-Evaluation of Thermal Strain by Physiological Measurements, 2nd Edition. *International Standard Organization, 1-21.*

Issurin, V.B., 2010. New horizons for the methodology and physiology of training periodization. *Sports Med. 40-3, 189-206.*

Mäkinen, T.M., Pääkkönen, T., Palinkas, L.A., Rintamäki, H., Leppäluoto, J., Hassi, J., 2004. Seasonal changes in thermal responses of urban residents to cold exposure. *Comp. Biochem. Physiol. A. Mol. Integr. Physiol. 139, 229–38.*

Malgoyre, A., Tardo-Dino, P.-E., Koulmann, N., Lepetit, B., Jousseaume, L., Charlot, K., 2018. Uncoupling psychological from physiological markers of heat acclimatization in a military context. *J. Therm. Biol. 77, 145–56.*

Marino, F.E., 2004. Anticipatory regulation and avoidance of catastrophe during exercise-induced hyperthermia. *Comp. Biochem. Physiol. B. 139, 561–569.*

Meeusen, R., Duclos, M., Foster C, et al. (2013). Prevention, diagnosis, and treatment of the overtraining syndrome: joint consensus statement of the European College of Sport Science and the American College of Sports Medicine. *Med. Sci. Sport. Exerc. 45-1, 186-205.*

Nybo, L., Rasmussen, P., Sawka, M.N., 2014. Performance in the heat : physiological factors of importance for hyperthermia-induced fatigue. *Compr. Physiol. 657–89.*

Pageaux, B., 2016. Perception of effort in Exercise Science: Definition, measurement and perspectives. *Eur. J. Sport Sci. 16, 885–94.*

Parfitt, G., Evans, H., Eston, R., 2012. Perceptually Regulated Training at RPE-13 Is Pleasant and Improves Physical Health. *Med. Sci. Sports Exerc. 44, 1613–18.*

Paton, C.D., Hopkins, W.G., 2006. Variations in performance of elite cyclists from race to race. *Eur. J. Sport. Sci. 1, 25-31.*

Périard, J.D., Racinais, S., Sawka, M.N., 2015. Adaptations and mechanisms of human heat acclimation: Applications for competitive athletes and sports. *Scand. J. Med. Sci. Sport. 25, 20–38.*

Racinais, S., Périard, J.D., Karlsen, A., Nybo, L., 2015. Effect of Heat and Heat Acclimatization on Cycling Time Trial Performance and Pacing. *Med. Sci. Sports Exerc. 47, 601–6.*

Rivas, E., Rao, M., Castleberry, T., Ben-Ezra, V., 2017. The change in metabolic heat production is a primary mediator of heat acclimation in adults. *J. Therm. Biol. 70, 69–79.*

Roberts, M.F., Wenger, C.B, Stolwijk, J.A.J., Nadel, E.R., 1977. Skin Blood-Flow and Sweating Changes Following Exercise Training and Heat Acclimation. *J. Appl. Physiol. 43-1, 133-7.*

Rudolf, J., Douglass, J., Baron, J., Lewandrowski, K., 2015. Evaluation of the i-STAT point-of-care capillary whole blood hematocrit and hemoglobin: Comparison to the Siemens RAPIDLab 1200, Sysmex XE5000, and manual spun hematocrit. *Clin. Chim. Acta 446, 37–42.*

Sawka, M.N., Pandolf, K.B., Avellini, B.A., Shapiro, Y., 1983. Does heat acclimation lower the rate of metabolism elicited by muscular exercise? *Aviat. Space. Environ. Med. 54, 27-31.*

Schmit, C., Duffield, R., Hausswirth, C., Brisswalter, J., Le Meur, Y., 2017. Optimizing Heat Acclimation for Endurance Athletes: High- vs Low-Intensity Training. *Int. J. Sports Physiol. Perform. 1–24.*

Sunderland, C., Morris, J.G., Nevill, M.E., 2008. A heat acclimation protocol for team sports. *Br. J. Sports Med. 42, 327–33.*

Wingfield, G.L., Gale, R., Minett, G.M., Marino, F.E., Skein, M., 2016. The effect of high versus low intensity heat acclimation on performance and neuromuscular responses. *J. Therm. Biol. 58, 50–59.*

DISCUSSION GENERALE

Ce travail de thèse a eu pour objectif d'apporter un éclairage global à certaines inconnues relatives à l'application de stratégies d'acclimatation à la chaleur. Notre intérêt pour ce sujet a, pour point de départ, le faible intérêt des athlètes et entraîneurs de haut niveau pour ces méthodes de préparation en rapport aux gains de performance qu'elle est susceptible de produire (Périard et al., 2017). Ceci serait, entre autres, la conséquence d'une inadéquation entre les besoins et contraintes réels de ce public et les propositions issues du milieu scientifique (Casadio et al., 2016). Les travaux expérimentaux présentés ont donc été motivés par le souhait d'apporter, au travers des mesures physiologiques et psychologiques effectuées, des réponses et des perspectives face à certaines interrogations venant du terrain et laissées en suspens.

Parmi elles, les réponses biomécaniques et psychophysiologiques aux charges et contenus habituels d'entraînement appliqués lors d'un stage d'acclimatation ont été, jusqu'à présent, peu explorées dans la littérature. Les recommandations, encore persistantes, de modérer les intensités d'entraînement en ambiance chaude et de maintenir les sessions à haute intensité en ambiance tempérée expliquent le peu de recul sur la question (Guy et al., 2014). Pourtant, appliquer de hautes intensités (*e.g.* lors d'exercices de type intermittent) présente dans ce contexte plusieurs intérêts. Tout d'abord, leur répétition constitue une alternative de travail intéressante dans les sports d'endurance. Ceux-ci impliquent en effet de nombreux changements d'allure dictés par les scénarii de course, et sans récupération possible (Sunderland et al., 2008 ; Wingfield et al., 2016). De plus, le niveau de sollicitation physiologique inhérent permet, à l'échelle de la session, une réduction de la durée d'exposition nécessaire à l'atteinte d'une charge thermique conséquente (Houmard et al., 1990). Etant donné ces intérêts, il est donc capital que l'entraîneur puisse comprendre comment et avec quels outils rationaliser l'application d'une telle stratégie de préparation avant la compétition.

La première interrogation concerne le risque potentiel de surcharge fonctionnelle inhérente à de telles sollicitations physiologiques (Schmit et al., 2017). Afin de répondre à ce problème, nous avons proposé l'association d'un protocole d'acclimatation incluant des sessions de type intermittent à une autorégulation de l'intensité contrôlée par la perception de l'effort (RPE). En effet, la sensibilité de ce paramètre à l'état de fatigue et aux adaptations fonctionnelles de l'organisme contribue à l'équilibre des charges d'entraînements et participe à la préservation des réponses affectives et motivationnelles sous-jacentes (Ciolac et al., 2015). Les résultats de l'étude III ont montré, à l'issue du cycle d'acclimatation, une amélioration sensible des performances du groupe ayant suivi ce protocole autorégulé (EXP) lors d'une épreuve de 20 km sur ergocycle en situation de contre-la-montre (-1,2 ± 2,4 % de la durée de référence). De prime abord, la diminution du volume et/ou l'autorégulation de l'intensité de

l'exercice ont contribué à rendre la production de hautes intensités à l'entraînement plus « tolérable » sur le plan psychophysiologique. Or, la gestion des réponses psychologiques à l'entraînement constitue un premier rempart contre l'occurrence de dérèglements fonctionnels précurseurs de l'état de surentraînement (Bresciani et al., 2011). D'autre part, les effets positifs d'une telle combinaison vont au-delà du simple gain d'efficacité pendant l'entraînement. Par exemple, chez l'athlète entraîné, la diminution de la durée d'exposition à la chaleur permet de contrebalancer certains effets négatifs de la participation à certaines compétitions ou à des stages d'acclimatation (*i.e.* longs déplacements, effets d'un éventuel décalage horaire ; Reilly et al., 2005) par un temps plus important accordé au sommeil et à la récupération. En parallèle, l'autorégulation de l'intensité constitue une méthode simple et pratique à appliquer en conditions écologiques pour l'entraîneur. De plus, l'autonomie laissée à l'athlète pendant la session participe à renforcer l'état psychologique de l'athlète (Ekkekakis, 2009). Enfin, l'amélioration de la puissance moyenne à RPE-15 suppose que le sujet progressivement acclimaté ait développé, au cours du cycle d'acclimatation, des intensités de plus en plus élevées lors de la production d'intensités subjectives dans le but de maintenir session après session un niveau de sollicitation physiologique constant (Périard et al., 2015).

Toutefois, ce mode de régulation de l'intensité peut s'avérer contreproductif chez des athlètes qui, pour diverses raisons, limiteraient l'intensité de leurs efforts à des seuils insuffisants pour générer des adaptations physiologiques significatives. Dans notre étude, l'hétérogénéité des variations post-acclimatation de la performance pour le groupe EXP (*i.e.* six des neuf sujets ont vu leur durée de référence sur 20 km diminuer après acclimatation) implique de devoir considérer avec précaution cette approche, par exemple par une application individualisée. La diminution plus marquée de la durée de référence pour le groupe FIX (*i.e.* -2,8 ± 1,6 *vs.* -1,2 ± 2,4 %) suggère, quant à elle, une marge d'ajustement du rapport entre durée d'exposition et distribution des intensités subjectives pour le groupe EXP. En effet, les sessions plus longues et soutenues à des intensités imposées et sous-maximales (*i.e.* 33-64 %PMA) du groupe FIX mettent en évidence une efficacité sensiblement supérieure de ce protocole. L'analyse des données de fréquence cardiaque (FC) relevées au cours des sessions d'entraînement montre que les sujets du groupe FIX ont été davantage sollicités que ceux du groupe EXP (*i.e.* en moyenne par session : 77,1-82,6 $\%FC_{max}$ pour FIX et 68,5-77,1 $\%FC_{max}$ pour EXP). Par ailleurs, la différence de 29% de la charge d'entraînement quantifiée pour les deux groupes pourrait expliquer la moindre adaptation de l'organisme à la chaleur observée dans le groupe EXP. En effet, les fortes variations d'intensité proposées (*e.g.* RPE 19-9) lors des sessions d'entraînement du groupe EXP nécessitent un engagement psychologique très

important des sujets et seraient plus impactées, de ce point de vue, par la chaleur que des intensités sous-maximales constantes.

Considérer la pertinence de la charge d'entraînement à partir des seules valeurs de puissance ou de FC issue des sessions d'acclimatation demeure insuffisant. En effet, il reste difficile de déterminer si la baisse de performance post-acclimatation observée chez certains sujets relève d'une surcharge relative à un investissement personnel extrême durant les sessions d'exercice intermittent autorégulées ou, inversement, d'une stimulation physiologique insuffisante. La première hypothèse n'est d'ores et déjà pas vérifiable en l'état. En effet, les variations de FC pendant l'épreuve et de la lactatémie post-exercice ne peuvent être exploités en raison de leur double sensibilité au surmenage (Le Meur et al., 2012) et à l'acclimatation à la chaleur (Sawka et al., 2011). Des variations post-acclimatation négatives des marqueurs de fatigue et de sommeil ont certes été observées chez deux sujets mais elles ne sont pas concomitantes à une altération de leur niveau de performance. Dès lors, le contrôle d'autres marqueurs complémentaires serait nécessaire. Par exemple, vérifier un état de surmenage chez le sujet entraîné passe entre autres par un contrôle de l'activité neurovégétative de l'individu via certains indicateurs de variabilité de la FC (Plews et al., 2013). La quantification du RPE-session et de la charge d'entraînement à partir de la méthode de Foster (Herman et al., 2006) aurait pu, quant à elle, constituer une approche intéressante dans le but de vérifier la seconde hypothèse. Enfin, valider l'efficacité d'une session d'acclimatation passe par la connaissance de l'amplitude et de la vitesse d'élévation de la température centrale (T_{CO}) pendant l'effort. Le calcul de la charge thermique permettrait notamment de mieux rationaliser les intensités et l'architecture de la session, et d'évaluer l'impact de la contrainte environnementale sur le stress physiologique inhérent à l'entraînement (Taylor and Cotter, 2006).

L'identification de moyens non-invasifs et fiables de contrôle de T_{CO} constitue donc un réel enjeu, ainsi que la seconde interrogation posée lors de ce projet de recherche. A ce jour, seul le suivi de la température gastro-intestinale par ingestion préalable d'une gélule thermosensible est applicable sur le terrain, en dépit toutefois de son caractère modérément invasif. Si la fiabilité de cette technique est validée par la littérature (Byrne and Lim, 2007), son usage présente toutefois certaines limites méthodologiques inhérentes à l'exercice en conditions écologiques (*i.e.* ingestion de fluides) et susceptibles d'affecter la reproductibilité des données (Keeling and Martin, 1987 ; Wilkinson et al., 2008 ; Roach et al., 2010). D'autre part, son accès demeure difficile d'un point de vue financier. La mesure de T_{CO} par voie transcutanée via un capteur à annulation de flux représente donc une solution alternative, quoique peu étudiée jusqu'à présent dans ce contexte (Teunissen et al., 2011). Les résultats de l'étude I ont ainsi

montré des écarts moyens supérieurs à 0,5 °C entre les estimations frontale et gastro-intestinale de T_{CO} pendant l'exercice, et ce indépendamment de la condition ambiante appliquée. L'amplitude des écarts est certes surprenante quand on considère le pourcentage très élevé de points de mesure (*i.e.* entre 80 et 90 %) pour lesquels la différence est inclue dans un intervalle de ± 0,5 °C. Ces résultats laissent ainsi supposer une importante hétérogénéité interindividuelle des réponses de l'un ou l'autre des capteurs. Par ailleurs, la forte corrélation vérifiée en ambiance tempérée (r = 0,847) et chaude (r = 0,820) entre les mesures issues de ces deux systèmes semble confirmer une certaine stabilité de ZHF en situation d'exercice. Ces résultats vont dans le sens de ceux obtenus par Teunissen et al. (2011), à savoir une limite d'agrément de ± 0,4 °C entre les mesures de ZHF et de température œsophagienne au cours d'un exercice sous-maximal en ambiance chaude. Bien que ce paramètre n'ait pas été vérifié au cours de notre protocole, plusieurs éléments concomitants laissent supposer que ZHF dispose d'un délai de réponse plus court en comparaison des mesures gastro-intestinales. En effet, alors que ce délai varie pour une gélule thermosensible en fonction de l'inertie thermique interne au tractus intestinal (Taylor et al., 2016), à l'inverse il s'avère stable et relativement faible pour ZHF (Teunissen et al., 2011).

Le capteur à annulation de flux représente donc une opportunité technologique dans le but de généraliser le monitoring de T_{CO} en conditions ambulatoires. Si sa diffusion se limite exclusivement au secteur hospitalier (Eshraghi et al., 2014), les perspectives d'un usage régulier sur le terrain vont néanmoins dépendre de futurs développements technologiques préalables à son intégration dans un système de monitoring embarqué. Ces développements seront conditionnés par les réponses apportées aux contraintes inhérentes que sont l'autonomie énergétique du système (*i.e.* pour rappel, le capteur à annulation de flux est constitué d'un élément chauffant) ou l'isolation du capteur face à des conditions ambiantes susceptibles de dégrader la qualité de la mesure (*i.e.* froid, vent ; Taylor et al., 2016).

Enfin, la troisième et dernière interrogation posée lors de ce projet de recherche concerne l'identification de facteurs susceptibles d'affecter l'implication physique des athlètes au cours d'un cycle d'acclimatation. Parmi ces facteurs, l'apparition à court et moyen terme de phénomènes de fatigue d'origine psychologique et/ou cognitive constitue une source de distorsion de la performance, notamment par ses effets sur la perception de l'effort (Marcora et al., 2009 ; Rozand and Lepers, 2016). Si ce phénomène est généralement associé à une activité cognitive intense et préalable à l'exercice, d'autres contraintes inhérentes aux stages d'entraînement sont susceptibles d'avoir des effets similaires. Parmi ces contraintes, l'anxiété liée à la gestion du déplacement et amplifiée par le décalage horaire (Reilly et al., 2005), et/ou

le stress global induit par l'exposition répétée à la chaleur (Schmit et al., 2017) sont les plus remarquables. L'apparition progressive de la fatigue mentale au cours du cycle d'entraînement peut ainsi perturber son exécution et/ou masquer les effets possibles de l'acclimatation (Halperin et al., 2015). Dans l'étude II, nous avons voulu vérifier à partir de l'autorégulation d'une intensité sous-maximale (*i.e.* RPE-15) l'amplitude de la dégradation de performance générée par l'interaction entre fatigue mentale et chaleur. Ce mode d'exercice aurait pour intérêt de permettre une analyse des paramètres susceptibles de moduler la tolérance du sujet à l'exercice (Astokorki and Mauger, 2016), et indépendamment de tout déséquilibre physiologique (Lander et al., 2009). Ainsi, lors de l'étude II, les sujets perçoivent un confort thermique similaire en ambiance tempérée et chaude, bien que les températures cutanées et les sensations de chaleur sous-jacentes soient bien plus élevées lors de l'exercice à 38 °C. La diminution plus rapide, par le sujet, de la puissance en ambiance chaude aurait ainsi pour but de préserver ses propres réponses affectives et émotionnelles face à la contrainte thermique.

En rapport à la question posée en préambule de l'étude, ces mêmes résultats montrent que l'application préalable d'une tâche cognitive d'inhibition de 60 min n'a pas modifié la régulation de la puissance soutenue à RPE-15, indépendamment de la condition ambiante. Il est probable que la sollicitation cognitive n'ait pas été assez importante pour les sujets entraînés inclus dans ce protocole, comme en atteste l'absence de variation pré-post tâche des marqueurs subjectifs de fatigue et d'énergie. En effet, les athlètes entraînés en endurance semblent présenter des capacités d'inhibition supérieures à la moyenne (Cona et al., 2015), en d'autres termes une plus grande aptitude à faire abstraction des phénomènes environnementaux pendant l'épreuve. De telles distorsions de la perception de l'effort, associées à des réductions du niveau de performance en endurance, concernent alors probablement ~~l~~es individus moins entraînés (Otani et al., 2016). Si la question posée lors de cette étude ne traite pas directement du sujet, il demeure néanmoins envisageable que des athlètes en stage d'acclimatation puissent subir une altération transitoire de leurs ressources cognitives et émotionnelles. En effet, on considère que des dégradations de la performance cognitive de l'individu peuvent être observées à partir d'une T_{CO} de 38,5 °C (Hocking et al., 2001), or ce seuil est établi comme un minima à atteindre session après session dans le but de générer des adaptations conséquentes à la chaleur (Taylor, 2014). L'application d'un suivi longitudinal de paramètres psychologiques et cognitifs au cours d'un cycle d'acclimatation constitue donc une perspective de recherche en lien avec le terrain.

Au-delà des questions posées en lien avec la construction de protocoles d'acclimatation à la chaleur, l'évolution des réponses perceptives à la chaleur a pu constituer un autre sujet d'intérêt lors de ce projet. L'application d'un exercice à RPE fixe (*i.e.* RPE-16) a permis, par

le passé, de constater que le sujet opte pour une puissance initiale plus faible à mesure que la température ambiante s'élève (Schlader et al., 2011). Ainsi, le départ plus lent observé sous une température ambiante de 38 °C (*i.e.* en moyenne sur les trois premiers kilomètres : 3,1 ± 0,5 $W.kg^{-1}$ *vs.* 3,6 ± 0,5 $W.kg^{-1}$ à 22 °C) coïncide avec une élévation plus rapide de la température cutanée et des sensations de chaleur accentuées. L'importance de la perception thermique dans la régulation de la puissance serait, par la suite, progressivement « challengée » par le stress cardiovasculaire inhérent lui aussi à l'élévation de la température cutanée (Périard et al., 2011). Le rôle joué par chacun de ces paramètres dans la régulation de l'allure dépend essentiellement de la magnitude de l'élévation de T_{CO}, relative aux variations de cette même allure pendant l'exercice (Flouris and Schlader, 2015). Leur interaction, dont l'influence sur le choix de l'athlète pendant l'exercice est pourtant cruciale, n'est cependant pas encore bien appréhendée dans la littérature. L'évoquer n'a toutefois pas de sens si l'on éclipse les caractéristiques du sujet concerné, en particulier son niveau d'entraînement et son acclimatation préalable à la chaleur. Les sujets entraînés et/ou démontrant un potentiel aérobie élevé font ainsi preuve d'une tolérance plus importante sur le plan perceptif. Ceci peut cependant les amener à sous-estimer le degré de sollicitation physiologique réel pendant l'exercice (Tikuisis et al., 2002). L'acclimatation à la chaleur, quant à elle, minimiserait l'influence potentielle de la sensation thermique sur la perception de l'effort. Ainsi, lors de l'étude III, la moindre sensation de chaleur observée après la phase d'acclimatation pendant l'épreuve-test dite de « tolérance à la chaleur » ne participe pas à des ajustements positifs de la sélection de puissance à RPE fixe, quel que soit le niveau d'intensité subjective soutenue.

Ce phénomène qui survient en dépit de l'optimisation des réponses perceptives à la chaleur a été plusieurs fois souligné dans la littérature récente (Malgoyre et al., 2018). La distorsion entre réponses physiologiques et perceptives expliquerait, parmi d'autres hypothèses, l'absence d'un quelconque effet d'une stratégie de refroidissement corporel sur la performance de sujets entraînés et acclimatés (Schmit et al., 2015). En dépit d'une amélioration notable de la sensation thermique à la suite du port du gilet de « cooling », l'analyse des réponses physiologiques post-acclimatation laisserait supposer que les effets positifs du refroidissement corporel aient été « shuntés » à la suite du protocole d'acclimatation à la chaleur. En d'autres termes, optimiser le confort thermique par le biais de stratégies spécifiques est devenu inutile chez le sujet acclimaté car ce dernier tolère mieux la contrainte ambiante jusqu'à parvenir à se rapprocher de ses limites physiologiques. Les résultats issus de l'étude III apparaissent dès lors moins surprenants. En effet, les modifications de sensation de chaleur observées post-acclimatation dans les deux groupes sont les conséquences d'adaptations distinctes des

températures cutanées et faciales au cours de la seconde moitié de l'épreuve à RPE fixe (*i.e.* pour la température cutanée : légère élévation pour le groupe EXP *vs.* diminution modérée pour le groupe FIX). S'il n'est pas étonnant que la sensation thermique puisse, dans certains cas, être dissociée de la température cutanée (Schlader et al., 2011), pour autant ce résultat semble défendre l'hypothèse d'un affaiblissement de la capacité de discrimination thermique (*i.e.* élévation du seuil thermique de déclenchement du message afférent sensoriel ; Mäkinen et al., 2004) chez le sujet acclimaté. Les adaptations propres aux mécanismes de thermorégulation autonomes contribuent également, par la plus lente élévation des températures centrale et cutanée, à retarder l'activation nerveuse des thermorécepteurs. En réponse, l'évolution de la perception de l'effort serait alors plus sensible aux réponses physiologiques (*i.e.* stress cardiovasculaire) au cours de l'exercice. Du point de vue de l'entraînement, ces adaptations faciliteraient l'implication, alors en progression constante, de chaque athlète lors de sessions d'acclimatation à libre allure ou à RPE fixe. Ce dernier serait alors en mesure de maintenir, session après session, une sollicitation physiologique minimale requise pour l'adaptation de l'organisme à la contrainte thermique.

Enfin, des évolutions post-acclimatation distinctes de la sensation de chaleur et du confort thermique perçu ont pu être observées, notamment lors de l'épreuve de « tolérance à la chaleur ». Lors de l'étude III, l'optimisation du confort thermique relative à l'acclimatation s'est vérifiée au début de l'épreuve de contre-la-montre et concorde avec une élévation de la puissance initiale (*i.e.* celle-ci étant plus marquée pour le groupe FIX). La plus grande tolérance émotionnelle de la chaleur ambiante contribuerait alors à développer, dans cet environnement, la prise de décisions et d'initiatives. Le modèle psychobiologique de la performance en endurance décrit les interactions entre perception de l'effort et motivation, cette dernière étant probablement influencée par le confort thermique. Ainsi, plus ce confort serait élevé et plus le sujet serait apte à s'engager sur le maintien d'intensités subjectives élevées. L'optimisation de la performance en ambiance chaude chez le sujet acclimaté passerait donc par des actions ciblées sur les aspects émotionnels et affectifs (*e.g.* préparation mentale ; Barwood et al., 2008), alors que des actions sur les voies sensorielles (*e.g.* usage du menthol ; Flood et al., 2018) auraient à priori une portée moindre.

CONCLUSION ET PERSPECTIVES

En conclusion, les travaux expérimentaux menés au cours de ce travail de thèse ont démontré qu'il était possible d'appliquer, chez l'athlète entraîné, des contenus d'entraînement spécifiques à leur discipline et notamment la répétition de très hautes intensités. L'autorégulation de l'intensité à partir de RPE s'adapte à ce contexte d'entraînement et peut être associé à une réduction du volume. Pour l'entraîneur, un tel mode de travail offre de nouvelles options dans la planification d'une stratégie d'acclimatation préalable à une épreuve en environnement chaud. En particulier, il semble possible de pouvoir associer un cycle d'exposition répétée à la chaleur à une forte diminution de la charge d'entraînement au cours de la semaine précédant la compétition (*i.e.* affûtage).

Toutefois, les effets incertains sur la performance et les marges de progression éventuelles soulignent l'importance de contrôler l'implication des athlètes lors des sessions autorégulées. D'un point de vue scientifique, déterminer le rapport dose-réponse optimal par rapport à ce mode d'entraînement nécessite une série d'investigations complémentaires incluant le suivi d'autres marqueurs. Par exemple, et bien que les solutions techniques disponibles s'avèrent onéreuses ou insuffisamment développées, le suivi de la charge thermique à partir d'une mesure embarquée de T_{CO} pourrait être envisagé dans ce cadre.

Enfin, l'étude approfondie des marqueurs de perception thermique laisse apparaître en particulier une distorsion du rapport entre état physiologique et réponses perceptives chez le sujet acclimaté à la chaleur. La moindre sensibilité à la chaleur est susceptible de faciliter la production de puissance à RPE fixe lors de sessions autorégulées d'acclimatation. L'optimisation du confort thermique se distingue quant à elle des réponses sensorielles et se matérialise par des changements de choix stratégiques (*i.e.* départ plus rapide lors d'un contre-la-montre). Agir sur la performance chez le sujet acclimaté passe donc par une action sur les réponses physiologiques mais aussi émotionnelles et affectives, plutôt que sensorielles.

Les perspectives ouvertes à l'issue de ce travail sont multiples. En premier lieu, le protocole original d'acclimatation à la chaleur que nous avons proposé pourrait être étendu à d'autres catégories de population non actives pour lesquelles la température représente une contrainte réelle, voire un risque important susceptible d'altérer leur intégrité physique. Par exemple, les individus souffrant de sclérose en plaques sont particulièrement atteints par la chaleur ambiante, du fait de dysfonctions neurovégétatives affectant les mécanismes de thermorégulation autonome (Huang et al., 2015). L'impact de ces déficits physiologiques sur leur capacité à faire de l'exercice laisse toutefois en suspens cette suggestion, d'autant plus que l'exposition passive seule dégrade déjà fortement leur capacité de production de force (White et al., 2013). Afin d'améliorer leurs conditions de vie, les personnes âgées, particulièrement

vulnérables à la chaleur (Pandolf, 1997), pourraient également bénéficier de cette approche afin de mieux appréhender les vagues de chaleur estivale dont on sait que la fréquence ne va cesser de s'accroître au cours des années à venir. Enfin, dans le cadre professionnel, la prévention du stress thermique relatif au port de combinaisons de protection (Aoyagi et al., 1994) peut également passer par l'application de telles méthodes, alors susceptibles d'agir sur la cinétique de la température corporelle pendant la journée de travail.

Concernant l'application de ce protocole aux athlètes entraînés, la perspective majeure de recherche concerne l'optimisation du suivi de la charge d'entraînement. Combiner le suivi, session après session, de marqueurs physiologiques (*i.e.* charge thermique) et psychologiques (*i.e.* perception de l'effort) aurait pour but de mieux comprendre les dynamiques de progression lors d'un cycle d'acclimatation, et ainsi améliorer la pertinence de sa planification. Connaître les effets de ce protocole sur la performance sportive passe également par la simulation d'autres référentiels d'épreuves en laboratoire. Parmi les possibilités, l'application d'un exercice à libre allure « dynamique » avec changements imposés de puissance à intervalles de temps prédéfinis (Abbiss et al., 2010) serait à même de permettre l'évaluation des effets d'un tel protocole sur la gestion d'actions à haute intensité lors d'une épreuve d'endurance (Wingfield et al., 2016).

Enfin, approfondir les connaissances sur le rôle de la perception thermique dans la régulation de l'allure passerait par une réutilisation de l'exercice à RPE fixe prolongé. Son application permettrait notamment d'évaluer les réponses affectives et émotionnelles à la contrainte exercée par la chaleur et dans différents contextes d'études (*i.e.* comparaison de populations, effet de l'acclimatation). Des travaux similaires menés sur la compréhension du rôle joué par la tolérance à la douleur dans la construction de la performance physique ont montré des résultats pertinents (Astokorki and Mauger, 2016).

REFERENCES

-A-

Abbiss, C.R., Burnett, A., Nosaka, K., Green, J.P., Foster, J.K., Laursen, P.B., 2010. Effect of hot versus cold climates on power output, muscle activation, and perceived fatigue during a dynamic 100-km cycling trial. Journal of Sports Sciences 28, 117–125.

Abbiss, C.R., Peiffer, J.J., Meeusen, R., Skorski, S., 2015. Role of Ratings of Perceived Exertion during Self-Paced Exercise: What are We Actually Measuring? Sports Med. 45, 1235–1243.

Altareki, N., Drust, B., Atkinson, G., Cable, T., Gregson, W., 2009. Effects of Environmental Heat Stress (35 °C) with Simulated Air Movement on the Thermoregulatory Responses during a 4-km Cycling Time Trial. Int. J. Sports Med. 30, 9–15.

Amann, M., Dempsey, J.A., 2008. Locomotor muscle fatigue modifies central motor drive in healthy humans and imposes a limitation to exercise performance. J. Physiol. 586, 161–173.

Amann, M., Proctor, L.T., Sebranek, J.J., Pegelow, D.F., Dempsey, J.A., 2009. Opioid-mediated muscle afferents inhibit central motor drive and limit peripheral muscle fatigue development in humans: Intrathecal fentanyl and central motor drive. J. Physiol. 587, 271–283.

Amann, M., Blain, G.M., Proctor, L.T., Sebranek, J.J., Pegelow, D.F., Dempsey, J.A., 2010. Group III and IV muscle afferents contribute to ventilatory and cardiovascular response to rhythmic exercise in humans. J. Appl. Physiol. 109, 966–976.

Amann, M., Secher, N.H., 2010. Point: Afferent Feedback from Fatigued Locomotor Muscles is an Important Determinant of Endurance Exercise Performance. J. Appl. Physiol. 108, 452–454.

Amann, M., Venturelli, M., Ives, S.J., McDaniel, J., Layec, G., Rossman, M.J., Richardson, R.S., 2013. Peripheral fatigue limits endurance exercise via a sensory feedback-mediated reduction in spinal motoneuronal output. J. Appl. Physiol. 115, 355–364.

Arens, E.A., Zhang, H., 2006. The skin's role in human thermoregulation and comfort. Center for the Built Environment.

Armstrong, L. E., Maresh, C. M., 1991. The induction and decay of heat acclimatisation in trained athletes. Sports Med., 12(5), 302-312.

Arngrimsson, S., Petitt, D.S., Borrani, F., Skinner, K., Cureton, K.J., 2004. Hyperthermia and maximal oxygen uptake in men and women. European Journal of Applied Physiology 92.

Aschoff, J., Wever, R., 1958. Kern und schale im waermehaushalt des menschen. Naturwissenschaften, 45(20), 477-485.

Asmussen, E., Bonde-Petersen, F., Jørgensen, K., 1976. Mechano-elastic properties of human muscles at different temperatures. Acta Physiologica Scandinavica 96, 83–93.

Astokorki, A.H.Y., Mauger, A.R., 2017. Tolerance of exercise-induced pain at a fixed rating of perceived exertion predicts time trial cycling performance. Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports 27, 309–317

Attia, M., 1984. Thermal pleasantness and temperature regulation in man. Neurosci. Biobehav. Rev., 8(3), 335-342.

Aoyagi, Y., McLellan, T. M., Shephard, R. J., 1994. Effects of training and acclimation on heat tolerance in exercising men wearing protective clothing. European journal of applied physiology and occupational physiology, 68(3), 234-245.

-B-

Barbas, H., Saha, S., Rempel-Clower, N., Ghashghaei, T., 2003. Serial pathways from primate prefrontal cortex to autonomic areas may influence emotional expression. BMC neuroscience, 4(1), 25.

Barbosa, T.C., Vianna, L.C., Fernandes, I.A., Prodel, E., Rocha, H.N.M., Garcia, V.P., Rocha, N.G., Secher N.H., Nobrega, A.C.L., 2016. Intrathecal fentanyl abolishes the exaggerated blood pressure response to cycling in hypertensive men. J. Physiol. 594, 715–725.

Barcroft, J., Binger, C.A., Bock, A.V. et al., 1923. Observations upon the effect of high altitude on the physiological processes of the human body, carried out in the Peruvian Andes, chiefly at Cerro de Pasco. Biol Sci 211: 351-480, 1923.

Baron, B., Moullan, F., Deruelle, F., Noakes, T.D., 2011. The role of emotions on pacing strategies and performance in middle and long duration sport events. Br. J. Sports Med. 45, 511–517.

Barwood, M.J., Thelwell, R.C., Tipton, M.J., 2008. Psychological skills training improves exercise performance in the heat. Medicine & Science in Sports & Exercise 40, 387–396.

Bass, D.E., Kleeman, C.R., Quinn, M., Henschel, A., Hegnauer, A.H., 1955. Mechanisms of acclimatization to heat in man. Medicine, 34, 323-380.

Bazett, H. C., McGlone, B., Brocklehurst, R. J., 1930. The temperatures in the tissues which accompany temperature sensations. J. Physiol., 69(1), 88-112.

Bazett, H.C., Sunderman, F.W., Doupe, J., Scott, J.C., 1940. Climatic effects on the volume and composition of blood in man. Am. J. Physiol., 129, 69-83.

Beaumont, W., 1838. Experiments and Observations on the Gastric Juice, and the Physiology of Digestion. MacLachlan & Stewart, Edinburgh.

Beaver, W. L., Wasserman, K., Whipp, B. J., 1986. A new method for detecting anaerobic threshold by gas exchange. J. Appl. Physiol., 60(6), 2020-2027.

Becerra, L. R., Breiter, H. C., Stojanovic, M. et al., 1999. Human brain activation under controlled thermal stimulation and habituation to noxious heat: an fMRI study. Magnetic Resonance in Medicine: An Official Journal of the International Society for Magnetic Resonance in Medicine, 41(5), 1044-1057.

Bennett, A.F., 1984. Thermal dependence of muscle function. Am. J. Physiol. 247: 217-229.

Binkhorst, R. A., Hoofd, L., Vissers, A. C., 1977. Temperature and force-velocity relationship of human muscles. J. Appl. Physiol., 42(4), 471-475.

Bixby, W. R., Lochbaum, M. R., 2006. Affect responses to acute bouts of aerobic exercise in fit and unfit participants: An examination of opponent-process theory. J. Sport. Behav., 29(2), 111.

Bligh, J., 1957. A comparison of the temperature of the blood in the pulmonary artery and in the bicarotid trunk of the calf during thermal polypnoea. J. Physiol., 136(2), 404-412.

Boksem, M.A.S., Tops, M., 2008. Mental fatigue: Costs and benefits. Brain Res. Rev. 59, 125–139.

Bonaventura, J. M., Sharpe, K., Knight, E., Fuller, K. L., Tanner, R. K., Gore, C. J., 2015. Reliability and accuracy of six hand-held blood lactate analysers. J. Sports Sci. Med., 14(1), 203.

Bongers, C.C.W.G., Thijssen, D.H.J., Veltmeijer, M.T.W., Hopman, M.T.E., Eijsvogels, T.M.H., 2015. Precooling and percooling (cooling during exercise) both improve performance in the heat: a meta-analytical review. British Journal of Sports Medicine 49, 377–384.

Borg, G., 1970. Perceived exertion as an indicator of somatic stress. Scand. J. Rehabil. Med., 2, 92-98.

Borg, G., Hassmén, P., Lagerström, M., 1987. Perceived exertion related to heart rate and blood lactate during arm and leg exercise. Eur. J. Appl. Physiol. Occup. Physiol., 56(6), 679-685.

Borg, G., Van den Burg, M., Hassmen, P., Kaijser, L., Tanaka, S., 1987. Relationships between perceived exertion, HR and HLa in cycling, running and walking. Scand. J. Sport Sci., 9, 3, 69-77.

Borg, G., 1990. Psychophysical scaling with applications in physical work and the perception of exertion. Scand. J. Work. Env. Health., 55-58.

Boutcher, S. H., Fleischer-Curtian, L. A., Gines, S. D., 1988. The effects of self-presentation on perceived exertion. J. Sport. Exerc. Psychol., 10(3), 270-280.

Boyas, S., Guével, A., 2011. Neuromuscular fatigue in healthy muscle: Underlying factors and adaptation mechanisms. Ann. Phys. Rehabil. Med. 54, 88–108.

Brajkovic, D., Ducharme, M.B., 2005. Confounding factors in the use of the zero-heat-flow method for non-invasive muscle temperature measurement. Eur. J. Appl. Physiol. 94, 386–391.

Brehm, J. W., Self, E. A., 1989. The intensity of motivation. Ann. Rev. Psychol., 40(1), 109-131.

Brenner, I.K.M., Zamecnik, J., Shek, P.N., et al., 1997. The impact of heat exposure and repeated exercise on circulating stress hormones. Eur. J. Appl. Physiol. Occup. Physiol. 76(5):445–54.

Bresciani, G., Cuevas, M. J., Molinero, O. et al., 2011. Signs of overload after an intensified training. Int. J. Sports Med., 32(5), 338.

Brick, N.E., MacIntyre, T.E., Campbell, M.J., 2016. Thinking and Action: A Cognitive Perspective on Self-Regulation during Endurance Performance. Frontiers in Physiology 7.

Briguglio, M., Dell'Osso, B., Panzica, G., Malgaroli, A., Banfi, G., Zanaboni Dina, C., Galentino, R., Porta, M., 2018. Dietary Neurotransmitters: A Narrative Review on Current Knowledge. Nutrients 10, 591.

Brooks, G.A., Hittelman, K.J., Faulkner, J.A., Beyer, R.E., 1971. Temperature, skeletal muscle mitochondrial functions and oxygen debt. Am. J. Physiol. 220: 1053-1059.

Browne, S., Renfree, A., 2013. Exercise performance and neuromuscular activity at a fixed level of RPE following manipulation of peripheral physiological status. J. Hum. Sport Exerc. 8, 820–828.

Brownsberger, J., Edwards, A., Crowther, R., Cottrell, D., 2013. Impact of mental fatigue on self-paced exercise. Int. J. Sports Med.

Bundle, M.W., Ernst, C.L., Bellizzi, M.J., Wright, S., Weyand, P.G., 2006. A metabolic basis for impaired muscle force production and neuromuscular compensation during sprint cycling. Am. J. Physiol.-Regul. Integr. Comp. Physiol. 291, 1457–1464.

Buono, M.J., Jechort, A., Marques, R., Smith, C., Welch, J., 2007. Comparison of infrared versus contact thermometry for measuring skin temperature during exercise in the heat. Physiol. Meas. 28, 855–859.

Buono, M. J., Holloway, B., Levine, A., Rasmussen, C., Kolkhorst, F. W., 2014. Effect of air temperature on the rectal temperature gradient at rest and during exercise. International journal of physiology, pathophysiology and pharmacology, 6(1), 61.

Byrne, C., Lim, C.L., 2007. The ingestible telemetric body core temperature sensor: a review of validity and exercise applications. British Journal of Sports Medicine 41, 126–133.

-C-

Cabanac, M., Cunningham, D.J., Stolwijk, J.A., 1971. Thermoregulatory Set Point during Exercise – Behavioral Approach. J. Comp. Physiol. Psychol. 76: 94–102.

Cabanac, M., Massonnet, B., Belaiche, R., 1972. Preferred skin temperature as a function of internal and mean skin temperature. J. Appl. Physiol., 33(6), 699-703.

Cabanac, M., 1992. Pleasure: the common currency. Journal of Theoretical Biology 155, 173–200.

Cabanac, M., Bonniot-Cabanac, M. C., 1997. De quoi serait mort le coureur de Marathon? Publication INSERM

Candas, V., Libert, J. P., Vogt, J. J., 1980. Effect of hidromeiosis on sweat drippage during acclimation to humid heat. Eur. J. Appl. Physiol. Occup. Physiol., 44(2), 123-133.

Candas, V., Libert, J.P., Brandenberger, G., Sagot, J.C., Amoros, C., Kahn, J.M., 1986. Hydration during exercise. Eur. J. Appl. Physiol. Occup. Physiol, 55(2), 113-122.

Caputa, M., 1980. Thermal gradients in the oesophagus of man during exercise and passive warming. J. Therm. Biol. 5, 249–251.

Caputa, M., Feistkorn, G., Jessen, C., 1986. Effect of brain and trunk temperatures on exercise performance in goats. Pflugers Arch. Physiol. 406: 184-189.

Carson, R. G., Riek, S., Shahbazpour, N., 2002. Central and peripheral mediation of human force sensation following eccentric or concentric contractions. The Journal of Physiology, 539(3), 913-925.

Casadio, J.R., Kilding, A.E., Cotter, J.D., Laursen, P.B., 2017. From Lab to Real World: Heat Acclimation Considerations for Elite Athletes. Sports Medicine 47, 1467–1476.

Castle, P.C., Maxwell, N., Allchorn, A., Mauger, A.R., White, D.K., 2012. Deception of ambient and body core temperature improves self paced cycling in hot, humid conditions. European Journal of Applied Physiology 112, 377–385.

Cauda, F., Cavanna, A. E., D'agata, F., Sacco, K., Duca, S., Geminiani, G. C., 2011. Functional connectivity and coactivation of the nucleus accumbens: a combined functional connectivity and structure-based meta-analysis. J. Cogn. Neurosci., 23(10), 2864-2877.

Cavagna, G. A., 1977. Storage and utilization of elastic energy in skeletal muscle. Exerc. Sport Sci. Rev., 5(1), 89-130.

Céline, C.G.-F., Monnier-Benoit, P., Groslambert, A., Tordi, N., Perrey, S., Rouillon, J.-D., 2011. The Perceived Exertion to Regulate a Training Program in Young Women: J. Strength Cond. Res. 25, 220–224.

Chalmers, S., Esterman, A., Eston, R., Bowering, K.J., Norton, K., 2014. Short-Term Heat Acclimation Training Improves Physical Performance: A Systematic Review, and Exploration of Physiological Adaptations and Application for Team Sports. Sports Medicine 44, 971–988.

Chapon, P.A., Gauthier, A., Bulla, J., Moussay, S., 2012. Calibration and performance assessment of a temperature sensor prototype using a 1-point calibration procedure. Rev. Sci. Instrum. 83, 114907.

Charkoudian, N., 2010. Mechanisms and modifiers of reflex induced cutaneous vasodilation and vasoconstriction in humans. J. Appl. Physiol., 109: 1221-1228.

Charlot, K., Tardo-Dino, P.-E., Buchet, J.-F., Koulmann, N., Bourdon, S., Lepetit, B., Roslonski, M., Jousseaume, L., Malgoyre, A., 2017. Short-Term, Low-Volume Training Improves Heat Acclimatization in an Operational Context. Frontiers in Physiology 8.

Cheung, S.S., McLellan, T.M., 1998. Heat acclimation, aerobic fitness, and hydration effects on tolerance during uncompensable heat stress. Journal of Applied Physiology 84, 1731–39.

Cheuvront, S.N., Kenefick, R.W., Montain, S.J., Sawka, M.N., 2010. Mechanisms of aerobic performance impairment with heat stress and dehydration. J. Appl. Physiol. 109, 1989–1995.

Choi, J.K., Miki, K., Sagawa, S., Shiraki, K., 1997. Evaluation of mean skin temperature formulas by infrared thermography. International Journal of Biometeorology 41, 68–75.

Christian, R.J., Bishop, D.J., Billaut, F., Girard, O., 2014. The role of sense of effort on self-selected cycling power output. Front. Physiol. 5.

Chudasama, Y., Doobay, V. M., Liu, Y. 2012. Hippocampal-prefrontal cortical circuit mediates inhibitory response control in the rat. J. Neurosci., 32(32), 10915-10924.

Ciolac, E., Mantuani, S., Neiva, C., Veradi, C., Pêssoa-Filho, D., Pimenta, L., 2014. Rating of perceived exertion as a tool for prescribing and self-regulating interval training: a pilot study. Biol. Sport 32, 103–108.

Cochrane, K., Housh, T., Bergstrom, H., Jenkins, N., Johnson, G., Schmidt, R., Cramer, J., 2015a. Physiological Responses during Cycle Ergometry at a Constant Perception of Effort. Int. J. Sports Med. 36, 466–473.

Cochrane, K.C., Housh, T.J., Jenkins, N.D.M., Bergstrom, H.C., Smith, C.M., Hill, E.C., Johnson, G.O., Schmidt, R.J., Cramer, J.T., 2015b. Electromyographic, mechanomyographic, and metabolic responses during cycle ergometry at a constant rating of perceived exertion. Appl. Physiol. Nutr. Metab. 40, 1178–1185.

Cochrane-Snyman, K.C., Housh, T.J., Smith, C.M., Hill, E.C., Jenkins, N.D.M., Schmidt, R.J., Johnson, G.O., 2016. Inter-individual variability in the patterns of responses for electromyography and mechanomyography during cycle ergometry using an RPE-clamp model. Eur. J. Appl. Physiol. 116, 1639–1649.

Cooper, K. E., Kenyon, J. R., 1957. A comparison of temperatures measured in the rectum, oesophagus, and on the surface of the aorta during hypothermia in man. Br. J. Surg., 44(188), 616-619.

Cotter, J.D., Patterson, M.J., Taylor, N.A.S., 1997. Sweat distribution before and after repeated heat exposure. Eur. J. Appl. Physiol., 76, 181-186.

Cotter, J.D., Sleivert, G.G., Roberts, W.S., Febbraio, M.A., 2001. Effect of pre-cooling, with and without thigh cooling, on strain and endurance exercise performance in the heat. Comparative Biochemistry and Physiology Part A: Molecular & Integrative Physiology 128, 667–677.

Cotter, J.D., Taylor, N.A.S., 2005. The distribution of cutaneous sudomotor and alliesthesial thermosensitivity in mildly heat-stressed humans: an open-loop approach: Local cutaneous thermosensitivity. The Journal of Physiology 565, 335–345.

Coquart, J.-B., Tourny-Chollet, C., Lemaître, F., Lemaire, C., Grosbois, J.-M., Garcin, M., 2012. Relevance of the measure of perceived exertion for the rehabilitation of obese patients. Ann. Phys. Rehabil. Med. 55, 623–640.

Coyle, E.F., Gonzalez-Alonso, J., 2001. Cardiovascular drift during prolonged exercise: new perspectives. Exerc. Sport. Sci. Rev. 29, 88–92.

Craig, A. D., Dostrovsky, J. O., 2001. Differential projections of thermoreceptive and nociceptive lamina I trigeminothalamic and spinothalamic neurons in the cat. J. Neurophysiol, 86(2), 856-870.

Craig, A. D., Krout, K.,Andrew, D., 2001. Quantitative response characteristics of thermoreceptive and nociceptive lamina I spinothalamic neurons in the cat. J. Neurophysiol., 86(3), 1459-1480.

Craig, A.D., 2002. How do you feel? Interoception: the sense of the physiological condition of the body. Nat. Rev. Neurosci. 3, 655–666.

Craig, A.D., 2009. How do you feel now? The anterior insula and human awareness. Nat. Rev. Neurosci. 10.

Crewe, H., Tucker, R., Noakes, T.D., 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.

Cuddy, J.S., Hailes, W.S., Ruby, B.C., 2014. A reduced core to skin temperature gradient, not a critical core temperature, affects aerobic capacity in the heat. J. Therm. Biol. 43, 7–12.

-D-

Damasio, A. R., Grabowski, T. J., Bechara, A. et al., 2000. Subcortical and cortical brain activity during the feeling of self-generated emotions. Nature Neurosci., 3(10), 1049.

Damasio, A., Carvalho, G.B., 2013. The nature of feelings: evolutionary and neurobiological origins. Nature Reviews Neuroscience 14, 143–152. https://doi.org/10.1038/nrn3403

Davies, M.J., Clark, B., Welvaert, M., Skorski, S., Garvican-Lewis, L.A., Saunders, P., Thompson, K.G., 2016. Effect of Environmental and Feedback Interventions on Pacing Profiles in Cycling: A Meta-Analysis. Frontiers in Physiology 7.

Deci, E. L., Ryan, R. M., 2008. Self-determination theory: A macrotheory of human motivation, development, and health. Canadian psychology/Psychologie canadienne, 49(3), 182.

De Dear, R., Brager, G. S., 2001. The adaptive model of thermal comfort and energy conservation in the built environment. Int. J. Biometeorol., 45(2), 100-108.

Delignières, D., 1993. La perception de l'effort et de la difficulté. In J.P. Famose (Ed.), Cognition et performance, pp. 183-218. Paris: INSEP.

De Morree, H.M., Klein, C., Marcora, S.M., 2014. Cortical substrates of the effects of caffeine and time-on-task on perception of effort. J. Appl. Physiol. 117, 1514–1523.

De Morree, H.M., Klein, C., Marcora, S.M., 2012. Perception of effort reflects central motor command during movement execution: Neurophysiology of perceived effort. Psychophysiology 49, 1242–1253.

De Morree, H.M., Marcora, S.M., 2013. Effects of isolated locomotor muscle fatigue on pacing and time trial performance. Eur. J. Appl. Physiol., 113(9), 2371–80.

De Pauw, K.D., Roelands, B., Cheung, S.S., de Geus, B., Rietjens, G., Meeusen, R., 2013. Guidelines to Classify Subject Groups in Sport-Science Research. Int. J. Sports Physiol. Perf. 8, 111–122

Deschamps, T., Hug, F., Hodges, P.W., Tucker, K. 2014. Influence of experimental pain on the perception of action capabilities and performance of a maximal single-leg hop. J. Pain., 15(3), 271.e271–277.

De Vries, HA, Moritani, T, Nagata, A, Magnussen, K., 1982. The relation between critical power and neuromuscular fatigue as estimated from electromyographic data. Ergonomics 25: 783–791.

Diaz, F.J., Bransford, D.R., Kobayashi, K., Horvath, S.M., McMurray, R.G., 1979. Plasma volume changes during rest and exercise in different postures in a hot humid environment. J. Appl. Physiol., 47(4), 798-803.

Dishman, R. K., 1994. Prescribing exercise intensity for healthy adults using perceived exertion. Med. Sci. Sport. Exerc.

Dittmar, A., Gehin, C., Delhomme, G., Boivin, D., Dumont, G., Mott, C., 2006. A non-invasive wearable sensor for the measurement of brain temperature, in: Engineering in Medicine and Biology Society, 2006. EMBS'06. 28th Annual International Conference of the IEEE. IEEE, pp. 900–902.

Dokladny, K., Zuhl, M.N., Moseley, P.L., 2016. Intestinal epithelial barrier function and tight junction proteins with heat and exercise. J. Appl. Physiol. (1985), 120(6):692–701.

Dostrovsky, J. O., Craig, A. D., 1996. Cooling-specific spinothalamic neurons in the monkey. . J. Neurophysiol, 76(6), 3656-3665.

Droit-Volet, S., Wearden, J., 2003. Les modèles d'horloge interne en psychologie du temps. L'année psychologique, 103(4), 617-654.

Dunbar, C. C., Robertson, R. J., Baun, R. et al., 1992. The validity of regulating exercise intensity by ratings of perceived exertion. Med. Sci. Sport. Exerc.

Dupont, G., Bosquet, L., 2007. Méthodologie de l'entraînement. Ellipses-Marketing.

Durnin, J.V.G.A., Womersley, J., 1974. Body fat assessed from total body density and its estimation from skinfold thickness: measurements on 481 men and women aged from 16 to 72 Years. British Journal of Nutrition 32, 77–97.

-E-

Edholm, O.G., Fox, R.H., Macpherson, R.K., 1956. The effect of body heating on the circulation in skin and muscle. J. Physiol. 134, 612–619.

Ekkekakis, P., Hall, E.E., Petruzzello, S.J., 2005. Variation and homogeneity in affective responses to physical activity of varying intensities: An alternative perspective on dose – response based on evolutionary considerations. Journal of Sports Sciences 23, 477–500.

Ekkekakis, P., 2009. Let Them Roam Free?: Physiological and Psychological Evidence for the Potential of Self-Selected Exercise Intensity in Public Health. Sports Medicine 39, 857–888.

Ekkekakis, P., Parfitt, G., Petruzzello, S.J., 2011. The Pleasure and Displeasure People Feel When they Exercise at Different Intensities: Decennial Update and Progress towards a Tripartite Rationale for Exercise Intensity Prescription. Sports Med. 41, 641–671.

El Helou, N., Tafflet, M., Berthelot, G., Tolaini, J., Marc, A., Guillaume, M., Hausswirth, C., Toussaint, J.-F., 2012. Impact of environmental parameters on marathon running performance. PLoS ONE 7, e37407.

Ely, M.R., Cheuvront, S.N., Montain, S.J., 2007a. Neither Cloud Cover nor Low Solar Loads Are Associated with Fast Marathon Performance: Med. Sci. Sports Exerc. 39, 2029–2035.

Ely, M.R., Cheuvront, S.N., Roberts, W.O., Montain, S.J., 2007b. Impact of Weather on Marathon-Running Performance: Med. Sci. Sports Exerc. 39, 487–493.

Ely, M.R., Martin, D.E., Cheuvront, S.N., Montain, S.J., 2008. Effect of ambient temperature on marathon pacing is dependent on runner ability. Med. Sci. Sports Exerc. 40, 1675–1680.

Ely, B.R., Cheuvront, S.N., Kenefick, R.W., Sawka, M.N., 2010. Aerobic Performance is Degraded, Despite Modest Hypothermia, In Hot Environments. Med. Sci. Sports Exerc.

Eshraghi, Y., Nasr, V., Parra-Sanchez, I., Van Duren, A., Botham, M., Santoscoy, T., Sessler, D.I., 2014. An Evaluation of a Zero-Heat-Flux Cutaneous Thermometer in Cardiac Surgical Patients: Anesthesia & Analgesia 119, 543–549.

Eston, R.G., Davies, B.L., Williams, J.G., 1987. Use of perceived effort ratings to control exercise intensity in young healthy adults. Eur. J. Appl. Physiol. 56, 222–224.

Eston, R., 2012. Use of Ratings of Perceived Exertion in Sports. Int. J. Sports Physiol. Perform. 7, 175–182.

Eston, R., Coquart, J., Lamb, K., Parfitt, G., 2015. Misperception: No Evidence to Dismiss RPE as Regulator of Moderate-Intensity Exercise. Medicine & Science in Sports & Exercise 47, 2676.

-F-

Farra, S.D., Cheung, S.S., Thomas, S.G., Jacobs, I., 2017. Rate dependent influence of arterial desaturation on self-selected exercise intensity during cycling. PLOS ONE 12, e0171119.

Febbraio, M. A., Carey, M. F., Snow, R. J., Stathis, C. G., Hargreaves, M., 1996. Influence of elevated muscle temperature on metabolism during intense, dynamic exercise. Am. J. Physiol. Regul. Int. Comp. Physiol., 271(5), R1251-R1255.

Febbraio, M.A., Lambert, D.L., Starkie, R.L., Proietto, J., Hargreaves, M., 1998. Effect of epinephrine on muscle glycogenolysis during exercise in trained men. J. Appl. Physiol. 84: 465-470.

Febbraio, M.A., 2001. Alterations in energy metabolism during exercise and heat stress. Sports Med. 31: 47-59.

Filingeri, D., 2016. Neurophysiology of Skin Thermal Sensations, in: Terjung, R. (Ed.), Comprehensive Physiology. John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, NJ, USA, pp. 1429–1491.

Fink, W.J., Costill, D.L., Van Handel, P.J., 1975. Leg muscle metabolism during exercise in the heat and cold. European journal of applied physiology and occupational physiology 34, 183–190.

Flood, T. R. (2018). Menthol Use for Performance in Hot Environments. Current sports medicine reports, 17(4), 135-139.

Flouris, A.D., Schlader, Z.J., 2015. Human behavioral thermoregulation during exercise in the heat: Human behavioral thermoregulation. Scand. J. Med. Sci. Sports 25, 52–64.

Fox, R.H., Solman, A.J., Isaacs, R., Fry, A.J., MacDonald, I.C., 1973. A new method for monitoring deep body temperature from the skin surface. Clin. Sci. 44, 81–86.

Friesen, B.J., Périard, J.D., Poirier, M.P., Lauzon, M., Blondin, D.P., Haman, F., Kenny, G.P., 2018. Work Rate during Self-paced Exercise is not Mediated by the Rate of Heat Storage: Med. Sci. Sports Exerc. 50, 159–168.

Fritzsche, R.G., Switzer, T.W., Hodgkinson, B.J., Coyle, E.F., 1999. Stroke volume decline during prolonged exercise is influenced by the increase in heart rate. J. Appl. Physiol. 86: 799-805.

Ftaiti, F., Grélot, L., Coudreuse, J.-M., Nicol, C., 2001. Combined effect of heat stress, dehydration and exercise on neuromuscular function in humans. European Journal of Applied Physiology 84, 87–94.

Fujii, N., Honda, Y., Ogawa, T., Tsuji, B., Kondo, N., Koga, S., Nishiyasu, T., 2012. Short-term exercise-heat acclimation enhances skin vasodilation but not hyperthermic hyperpnea in humans exercising in a hot environment. European Journal of Applied Physiology 112, 295–307.

Fukazawa, T., Havenith, G., 2009. Differences in comfort perception in relation to local and whole body skin wettedness. Eur. J. Appl. Physiol. 106: 15–24.

Fulbrook, P., 1993. Core temperature measurement in adults: a literature review. J. Adv. Nurs. 18, 1451–1460.

-G-

Gaesser, G. A., Poole, D. C., 1996. The slow component of oxygen uptake kinetics in humans. Exerc. Sport. Sci. Rev., 24(1), 35-70.

Gagge, A.P., Stolwijk, J.A.J., Saltin, B., 1969. Comfort and thermal sensations and associated physiological responses during exercise at various ambient temperatures. Environ. Res. 2, 209–229.

Gallagher, K.M., Fadel, P.J., Strømstad, M. et al., 2001. Effects of partial neuromuscular blockade on carotid baroreflex function during exercise in humans. J. Physiol. 533, 861–870.

Gandevia, S.C., Allen, G.M., Butler, J.E., Taylor, J.L., 1996. Supraspinal factors in human muscle fatigue: evidence for suboptimal output from the motor cortex. J. Physiol. 490, 529.

Garcin, M., Billat, V., 2001. Perceived exertion scales attest to both intensity and exercise duration. Perceptual Motor Skills, 93(3), 661-671.

Garcin, M., Wolff, M., Bejma, T., 2003. Reliability of Rating Scales of Perceived Exertion and Heart Rate During Progressive and Maximal Constant Load Exercises Till Exhaustion in Physical Education Students. Int. J. Sports Med. 24, 285–290.

Garcin, M., 2014. L'effort perçu : de l'échelle RPE à l'échelle ETL. Perception de l'effort: applications dans les domaines de l'éducation physique, du sport et de la santé (Séminaire C3S, Besançon). Chap. 1, pp. 11-25.

Garrett, A.T., Rehrer, N.J., Patterson, M.J., 2011. Induction and decay of short-term heat acclimation in moderately and highly trained athletes. Sports medicine 41, 757–771.

Gibson, O.R., Mee, J.A., Tuttle, J.A., Taylor, L., Watt, P.W., Maxwell, N.S., 2015. Isothermic and fixed intensity heat acclimation methods induce similar heat adaptation following short and long-term timescales. J. Therm. Biol. 49–50, 55–65.

Giles, L. V., Koehle, M. S., 2014. The health effects of exercising in air pollution. Sports Medicine, 44(2), 223-249.

Gillinov, S., Etiwy, M., Wang, R., et al., 2017. Variable Accuracy of Wearable Heart Rate Monitors during Aerobic Exercise: Medicine & Science in Sports & Exercise 49, 1697–1703.

Gisolfi, C.V., 2000. Is the GI system built for exercise? News. Physiol. Sci., 15:114–9.

Gonzalez-Alonso, J., 1998. Separate and combined influences of dehydration and hyperthermia on cardiovascular responses to exercise. Int. J. Sports Med., 19(S 2), S111-S114.

Gonzalez-Alonso, J., Teller, C., Andersen, S.L., Jensen, F.B., Hyldig, T., Nielsen, B., 1999. Influence of body temperatures on the development of fatigue during prolonged exercise in the heat. Journal of Applied Physiology 86, 1032–1039.

González-Alonso, J., Mora-Rodríguez, R., Coyle, E.F., 2000. Stroke volume during exercise : interaction of environment and hydration. American Journal of Physiology-Heart and Circulatory Physiology 278, H321–H330.

Gonzalez-Alonso, J., 2003. Reductions in systemic and skeletal muscle blood flow and oxygen delivery limit maximal aerobic capacity in humans. Circulation 107, 824–830.

Goodman, D.A., Kenefick, R.W., Cadarette, B.S., Cheuvront, S.N., 2009. Influence of sensor ingestion timing on consistency of temperature measures. Med. Sci. Sports Exerc. 41, 597–602.

Graham, T. E., Turcotte, L. P., Kiens, B., Richter, E. A., 1995. Training and muscle ammonia and amino acid metabolism in humans during prolonged exercise. J. Appl. Physiol., 78(2), 725-735.

Greenhaff, P. L., Nevill, M. E., Soderlund, K. et al., 1994. The metabolic responses of human type I and II muscle fibres during maximal treadmill sprinting. J. Physiol., 478(1), 149-155.

Guy, J.H., Deakin, G.B., Edwards, A.M., Miller, C.M., Pyne, D.B., 2014. Adaptation to hot environmental conditions : an exploration of the performance basis, procedures and future directions to optimise opportunities for elite athletes. Sports Medicine.

-H-

Haber, S. N., Knutson, B., 2010. The reward circuit: linking primate anatomy and human imaging. Neuropsychopharmacol. 35(1), 4.

Hall, D.M., Buettner, G.R., Oberley, L.W., et al., 2001. Mechanisms of circulatory and intestinal barrier dysfunction during whole body hyperthermia. Am. J. Physiol. Heart. Circ. Physiol., 280(2), 509–21.

Halperin, I., Pyne, D. B., Martin, D. T., 2015. Threats to internal validity in exercise science: a review of overlooked confounding variables. Int. J. Sports Physiol. Perf. 10(7), 823-829.

Hampson, D.B., Gibson, A.S.C., Lambert, M.I., Noakes, T.D., 2001. The influence of sensory cues on the perception of exertion during exercise and central regulation of exercise performance. Sports Med. 31, 935–952.

Hansen, J.T., Netter, F.H., 2010. Netter's Clinical Anatomy., 2nd edition Saunders Elsevier, Philadelphia.

Harding, S., 2011. The tropical agenda. J. Trop. Psychol., 1(1), 2-5.

Hardy, J. D., Soderstrom, G. F., 1938. Heat Loss from the Nude Body and Peripheral Blood Flow at Temperatures of 22° C. to 35° C. Two Figures. J. Nutr., 16(5), 493-510.

Hardy, C.J., Rejeski, W.J., 1989. Not What, but How One Feels: The Measurement of Affect during Exercise. J. Sport Exerc. Psychol. 11, 304–317.

Hart, S.G., Staveland, L.E., 2005. Development of NASA-TLX (Task Load Index): results of empirical and theoretical research. Ergonomics: Skill, Displays, Controls, and Mental Workload 2, 408.

Hartley, G.L., Flouris, A.D., Plyley, M.J., Cheung, S.S., 2012. The effect of a covert manipulation of ambient temperature on heat storage and voluntary exercise intensity. Physiol. Behav. 105, 1194–1201.

Havenith, G., Smith, C., Fukazawa, T., 2008. The skin interface – meeting point of physiology and clothing science. J. Fiber. Bioeng. Inform. 1: 93–98.

Henry, J. G., Bainton, C. R., 1974. Human core temperature increase as a stimulus to breathing during moderate exercise. Resp. Physiol., 21(2), 183-191.

Hensel H., 1981. Thermoreception and temperature regulation. Monographs of the Physiological Society. Cambridge: Academic Press, Issue 38, pp. 1-321.

Herbert, B. M., Ulbrich, P., Schandry, R., 2007. Interoceptive sensitivity and physical effort: Implications for the self-control of physical load in everyday life. Psychophysiol., 44(2), 194-202.

Herman, L., Foster, C., Maher, M. A., Mikat, R. P., Porcari, J. P., 2006. Validity and reliability of the session RPE method for monitoring exercise training intensity. South Afr. J. Sport. Med., 18(1), 14-17.

Higgins, L.W., Robertson, R.J., Kelsey, S.F., Olson, M.B., Hoffman, L.A., Rebovich, P.J., Haile, L., Orenstein, D.M., 2013. Exercise intensity self-regulation using the OMNI scale in children with cystic fibrosis. Pediatr. Pulmonol. 48, 497–505.

Hill, N. S., 2000. Noninvasive ventilation in chronic obstructive pulmonary disease. Clin. Chest. Med., 21(4), 783-797.

Hocking, C., Silberstein, R. B., Lau, W. M., Stough, C., Roberts, W., 2001. Evaluation of cognitive performance in the heat by functional brain imaging and psychometric testing. Comparative Biochemistry and Physiology Part A: Molecular & Integrative Physiology, 128(4), 719-734.

Hori, S., 1995. Adaptation to heat. Jpn. J. Physiol., 45, 921-946.

Horowitz, M., Shimoni, Y., Parnes, S., Gotsman, M.S., Hasin, Y., 1986. Heat acclimation: cardiac performance of isolated rat heart. J. Appl. Physiol., 60, 9-13, 1986.

Horvath, S.M., Shelley, W.B., 1946. Acclimatization to extreme heat and its effect on the ability to work in less severe environments. Am J Physiol, 146, 336-343.

Houmard, J. A., Costill, D. L., Davis, J. A. et al., 1990. The influence of exercise intensity on heat acclimation in trained subjects. Med. Sci. Sports Exerc. 22(5), 615-620.

Howley, E. T., Bassett, D. R., Welch, H. G., 1995. Criteria for maximal oxygen uptake: review and commentary. Med. Sci. Sports Exerc., 27(9), 1292-1301.

Huang, M., Jay, O., Davis, S. L., 2015. Autonomic dysfunction in multiple sclerosis: implications for exercise. Autonomic Neuroscience, 188, 82-85.

Hulleman, M., De Koning, J.J., Hettinga, F.J., Foster, C., 2007. The Effect of Extrinsic Motivation on Cycle Time Trial Performance: Medicine & Science in Sports & Exercise 39, 709–715.

Hureau, T.J., Romer, L.M., Amann, M., 2018. The 'sensory tolerance limit': A hypothetical construct determining exercise performance? Eur. J. Sport Sci. 18, 13–24.

-I-J-K-

ISO Standard, 2004. 9886 Ergonomics-Evaluation of Thermal Strain by Physiological Measurements, 2nd Edition. International Standard Organization, 1-21.

Janta, M., Höschele, N., Senner, V., 2016. The Zero Heat Flux Method and Sweat Loss Modeling in Sports: Attempts of Next Generation Sports Information Systems. Procedia Engineering 147, 643–648.

Jay, O., Kenny, G.P., 2009. Current evidence does not support an anticipatory regulation of exercise intensity mediated by rate of body heat storage. J. Appl. Physiol. 107, 630–631.

Johnson, J.M., Rowell, L.B., 1975. Forearm and skin vascular responses to prolonged exercise in man. J. Appl. Physiol. 39:920–924.

Johnson, J.M., Minson, C.T., Kellogg, D.L., 2014. Cutaneous Vasodilator and Vasoconstrictor Mechanisms in Temperature Regulation, in: Terjung, R. (Ed.), Comprehensive Physiology. John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, NJ, USA, pp. 33–89.

Jones, L. A., Hunter, I. W., 1983. Effect of fatigue on force sensation. Exp Neurol, 81(3), 640–650.

Junge, N., Jørgensen, R., Flouris, A.D., Nybo, L., 2016. Prolonged self-paced exercise in the heat – environmental factors affecting performance. Temperature 3, 539–548.

Kacin, A., Golja, P., Eiken, O., Tipton, M.J., Gorjanc, J., Mekjavic, I.B., 2005. Human temperature regulation during cycling with moderate leg ischaemia. Eur. J. Appl. Physiol. 95, 213–220.

Kahneman, D., 1973. Attention and effort (Vol. 1063). Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall.

Kalsi, K.K., González-Alonso, J., 2012. Temperature-dependent release of ATP from human erythrocytes : mechanism for the control of local tissue perfusion. Exp. Physiol. no-no.

Kaufman, M.P., Hayes, S.G., 2002. The Exercise Pressor Reflex. Clin. Auton. Res. 12, 429–439.

Kayser, B., 2003. Exercise starts and ends in the brain. Eur. J. Appl. Physiol., 90, 411-419.

Keeling, W.F., Martin, B.J., 1987. Gastrointestinal transit during mild exercise. J. Appl. Physiol. 63, 978–981.

Kellogg, D.L., Johnson, J.M., Kosiba, W.A., 1990. Baroreflex control of the cutaneous active vasodilator system in humans. Circ. Res. 66, 1420–1426.

Kenefick, R.W., Sawka, M.N., 2007. Heat exhaustion and dehydration as causes of marathon collapse. Sports Med. 37: 378-381.

Kenney, W.L., Stanhewicz, A.E., Bruning, R.S., Alexander, L.M., 2014. Blood pressure regulation III: what happens when one system must serve two masters: temperature and pressure regulation? Eur. J. Appl. Physiol. 114, 467–479.

Klass, M., Roelands, B., Lévénez, M. et al., 2012. Effects of Noradrenaline and Dopamine on Supraspinal Fatigue in Well-Trained Men: Med. Sci. Sports Exerc. 44, 2299–2308.

Kollins, S. H., Shapiro, S. K., Newland, M. C., Abramowitz, A., 1998. Discriminative and participant-rated effects of methylphenidate in children diagnosed with attention deficit hyperactivity disorder (ADHD). Exp. Clinical. Psychopharmacol., 6(4), 375.

Krustrup, P., Ferguson, R.A., Kjaer, M., Bangsbo, J., 2003. ATP and heat production in human skeletal muscle during dynamic exercise: higher efficiency of anaerobic than aerobic ATP resynthesis. The Journal of Physiology 549, 255–269.

Kuno, Y., 1956. Human Perspiration. Thomas, Springfield, IL

-L-

Lacerda, A.C.R., Gripp, F., Rodrigues, L.O.C. et al., 2007. Acute heat exposure increases high-intensity performance during sprint cycle exercise. Eur. J. Appl. Physiol., 99(1), 87-93.

Ladell, W.S.S., Shephard, R.J., 1961. Aldosterone inhibition and acclimatization to heat. J. Physiol., 160.

Lafargue, G., Franck, N., 2009. Effort awareness and sense of volition in schizophrenia. Conscious. Cogn. 18, 277–289.

Lahiri, B.B., Bagavathiappan, S., Jayakumar, T., Philip, J., 2012. Medical applications of infrared thermography: A review. Infrared Physics & Technology 55, 221–235.

Lambert, E. V., St Clair Gibson, A., Noakes, T. D., 2004. Complex systems model of fatigue: integral control and defence of homeostasis during exercise in humans. Br. J. Sports. Med., 619-27.

Lander, P.J., Butterly, R.J., Edwards, A.M., 2009. Self-paced exercise is less physically challenging than enforced constant pace exercise of the same intensity : influence of complex central metabolic control. Br. J. Sports Med. 43, 789–795.

Laviolette, L., Laveneziana, P., 2014. Dyspnoea: a multidimensional and multidisciplinary approach. Eur. Resp. J., erj00926-2013.

Le Meur, Y., Hausswirth, C., Mujika, I., 2012. Tapering for competition: A review. Science & Sports 27, 77–87.

Lind, A. R., 1963. Physiological effects of continuous or intermittent work in the heat. J. Appl. Physiol., 18(1), 57-60.

Lind, E., Joens-Matre, R.R., Ekkekakis, P., 2005. What intensity of physical activity do previously sedentary middle-aged women select? Evidence of a coherent pattern from physiological, perceptual, and affective markers. Preventive Medicine 40, 407–419.

Lind, E., Ekkekakis, P., Vazou, S., 2008. The Affective Impact of Exercise Intensity That Slightly Exceeds the Preferred Level: "Pain" for No Additional "Gain." Journal of Health Psychology 13, 464–468.

Lorenzo, S., Halliwill, J.R., Sawka, M.N., Minson, C.T., 2010. Heat acclimation improves exercise performance. Journal of Applied Physiology 109, 1140–1147.

-M-

McAuley, E., Blissmer, B., 2000. Self-efficacy determinants and consequences of physical activity. Exerc Sport Sci Rev, 28(2), 85-88.

Mäkinen, T.M., Pääkkönen, T., Palinkas, L.A., Rintamäki, H., Leppäluoto, J., Hassi, J., 2004. Seasonal changes in thermal responses of urban residents to cold exposure. Comp. Biochem. Physiol. A. Mol. Integr. Physiol. 139, 229–38.

Malgoyre, A., Tardo-Dino, P.-E., Koulmann, N., Lepetit, B., Jousseaume, L., Charlot, K., 2018. Uncoupling psychological from physiological markers of heat acclimatization in a military context. Journal of Thermal Biology 77, 145–156.

Marcora, S.M., Bosio, A., de Morree, H.M., 2008a. Locomotor muscle fatigue increases cardiorespiratory responses and reduces performance during intense cycling exercise independently from metabolic stress. Am J Physiol Regul Integr Comp Physiol, 294(3):874-83.

Marcora, S.M., 2008b. Do we really need a central governor to explain brain regulation of exercise performance? Eur. J. Appl. Physiol. 104, 929–931.

Marcora, S.M., 2009a. Perception of effort during exercise is independent of afferent feedback from skeletal muscles, heart, and lungs. J. Appl. Physiol. 106, 2060–2062.

Marcora, S.M., Staiano, W., Manning, V., 2009b. Mental fatigue impairs physical performance in humans. J. Appl. Physiol., 106, 857–864.

Marcora, S.M., Staiano, W., 2010. The limit to exercise tolerance in humans: mind over muscle? Eur. J. Appl. Physiol. 109, 763–770.

Mari, I., Pouchot, J., Vinceneux, P., 1997. Mesure de la température corporelle en pratique quotidienne. La Revue de médecine interne, 18(1), 30-36.

Marino, F.E., 2004. Anticipatory regulation and avoidance of catastrophe during exercise-induced hyperthermia. Comp. Biochem. Physiol. B Biochem. Mol. Biol. 139, 561–569.

Martin, K., Meeusen, R., Thompson, K. G., Keegan, R., Rattray, B., 2018. Mental Fatigue Impairs Endurance Performance: A Physiological Explanation. Sports. Med., 1-11.

Mason, E.D., Jacob M., 1972. Variations in basal metabolic rate responses to changes between tropical and temperate climates. Hum. Biol., 44, 141-172.

Matsukawa, T., Kashimoto, S., Ozaki, M., Shindo, S., Kumazawa, T., 1996. Temperatures measured by a deep body thermometer (Coretemp®) compared with tissue temperatures measured at various depths using needles placed into the sole of the foot. European journal of anaesthesiology 13, 340–345.

Matsukawa, T., Ozaki, M., Nishiyama, T., Imamura, M., Kumazawa, T., 2000. Comparison of infrared thermometer with thermocouple for monitoring skin temperature. Crit. Care Med., 28(2), 532-536.

Maxwell, N. S., Gardner, F., Nimmo, M. A., 1999. Intermittent running: muscle metabolism in the heat and effect of hypohydration. Med. Sci. Sport Exerc., 31(5), 675-683.

Maw, G.J., Boutcher, S.H., Taylor, N.A., 1993. Ratings of perceived exertion and affect in hot and cool environments. Eur. J. Appl. Physiol. 67, 174–179.

McCloskey, D.I., 1981. Corollary discharges: motor commands and perception. Compr. Physiol.

McKenzie, J.E., Osgood, D.W., 2004. Validation of a new telemetric core temperature monitor. J. Therm. Biol. 29, 605–611.

McNaughton, L.R., Gough, L., Deb, S., Bentley, D., Sparks, S.A., 2016. Recent Developments in the Use of Sodium Bicarbonate as an Ergogenic Aid 15, 12.

Mekjavic, I.B., Rempel, M.E., 1990. Determination of esophageal probe insertion length based on standing and sitting height. J. Appl. Physiol. 69, 376–379.

Mercer, J., 2001. Glossary of terms for thermal physiology, 3rd Edition, Revised by the IUPS Thermal Comission. Jpn. J. Physiol., 51, 245–280.

Mielke, M., Housh, T.J., Malek, M.H., Beck, T.W., Schmidt, R.J., Johnson, G.O., 2008. The Development of Rating of Perceived Exertion-Based Tests of Physical Working Capacity: J. Strength Cond. Res. 22, 293–302.

Millet, G.Y, Lepers, R., Lattier, G. et al., 2000. Influence of ultra-long-term fatigue on the oxygen cost of two types of locomotion. Eur J Appl Physiol. 83, 376-80.

Millet, G., 2011. Can neuromuscular fatigue explain running strategies and performance in ultra marathon ? The flush model. Sports Med. 41, 489–506.

Mito, K., Kitahara, S., Tamura, T. et al., 2007. Effect of skin temperature on RMS amplitude of electromyogram and mechanomyogram during voluntary isometric contraction. Electromyog. Clin. Neurophysiol., 47(3), 153-160.

Moran, D., Shapiro, Y., Meiri, U., Laor, A., Epstein, Y., Horowitz, M., 1996. Exercise in the heat: individual impacts of heat acclimation and exercise training on cardiovascular performance. J. Therm. Biol., 21(3), 171-181.

Morgan, W.P., 1973. Psychological factors influencing perceived exertion. Med. Sci. Sport., 5, 97-103.

Morris, J. G., Nevill, M. E., Williams, C., 2000. Physiological and metabolic responses of female games and endurance athletes to prolonged, intermittent, high-intensity running at 30 and 16 C ambient temperatures. Eur. J. Appl. Physiol., 81(1-2), 84-92.

Morrison, S., Sleivert, G.G., Cheung, S.S., 2004. Passive hyperthermia reduces voluntary activation and isometric force production. European Journal of Applied Physiology 91, 729–736.

Mosso, A., 1894. La fatigue intellectuelle et physique. Baillière.

Munce, T. A., Kenney, W. L., 2003. Age-specific modification of local cutaneous vasodilation by capsaicin-sensitive primary afferents. J. Appl. Physiol., 95(3), 1016-1024.

Myers, J., Atwood, J.E., Sullivan, M., Forbes, S., Friis, R., Pewen, W., Froelicher, V., 1987. Perceived exertion and gas exchange after calcium and beta-blockade in atrial fibrillation. J. Appl. Physiol., 63(1), 97-104.

-N-

Nadel, E. R., Bullard, R. W., Stolwijk, J. A., 1971. Importance of skin temperature in the regulation of sweating. J. Appl. Physiol., 31(1), 80-87.

Nadel, E. R., Fortney, S., Wenger, C. B., 1980. Effect of hydration state of circulatory and thermal regulations. J. Appl. Physiol., 49(4), 715-721.

Nielsen, B., Hales, J.R., Strange, S., Christensen, N.J., Warberg, J., Saltin, B., 1993. Human circulatory and thermoregulatory adaptations with heat acclimation and exercise in a hot, dry environment. The Journal of Physiology 460, 467–485.

Nielsen, B., Hyldig, T., Bidstrup, F., González-Alonso, J., Christoffersen, G.R.J., 2001. Brain activity and fatigue during prolonged exercise in the heat. Pflügers Archiv 442, 41–48.

Noakes, T.D., 2012. Fatigue is a brain-derived emotion that regulates the exercise behavior to ensure the protection of whole body homeostasis. Front. Physiol. 3.

Noakes, T.D., 2004. Linear relationship between the perception of effort and the duration of constant load exercise that remains. J. Appl. Physiol. 96, 1571–1573.

Noble, B. J., & Robertson, R. J., 1996. The Borg scale: development, administration, and experimental use. Perceived exertion. Champaign: Human Kinetics, 59-89.

Northgraves, M.J., Peart, D.J., Jordan, C.A., Vince, R.V., 2014. Effect of Lactate Supplementation and Sodium Bicarbonate on 40-km Cycling Time Trial Performance: J. Strength Cond. Res. 28, 273–280.

Nose, H., Mack, G.W., Shi, X.R., Nadel, E.R., 1988. Role of osmolality and plasma volume during rehydration in humans. J. Appl. Physiol., 65, 325-331.

Nybo, L., Nielsen, B., 2001a. Hyperthermia and central fatigue during prolonged exercise. 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.

Nybo, L., Møller, K., Volianitis, S., Nielsen, B., Secher, N.H., 2002. Effects of hyperthermia on cerebral blood flow and metabolism during prolonged exercise in humans. J. Appl. Physiol. 93, 58–64.

Nybo, L., Secher, N.H., 2004. Cerebral perturbations provoked by prolonged exercise. Progress in Neurobiology 72, 223–261.

Nybo, L., Rasmussen, P., 2007. Inadequate cerebral oxygen delivery and central fatigue during strenuous exercise. Exerc. Sport Sci. Rev. 35: 110-118.

Nybo, L., 2012. Brain temperature and exercise performance. Experimental Physiology 97, 333–339.

Nybo, L., Rasmussen, P., Sawka, M.N., 2014. Performance in the heat : physiological factors of importance for hyperthermia-induced fatigue. Comprehensive Physiology 657–689.

-O-P-

O'Connor, P.J., Cook, D.B., 2001. Moderate-intensity muscle pain can be produced and sustained during cycle ergometry: Med. Sci. Sports Exerc. 33, 1046–1051.

Öngür, D., Price, J. L., 2000. The organization of networks within the orbital and medial prefrontal cortex of rats, monkeys and humans. Cerebral cortex, 10(3), 206-219.

Otani, H., Kaya, M., Tamaki, A., Watson, P., 2016. Separate and combined effects of exposure to heat stress and mental fatigue on endurance exercise capacity in the heat. Eur. J. Appl. Physiol.

Pageaux, B., Lepers, R., Dietz, K.C., Marcora, S.M., 2014. Response inhibition impairs subsequent self-paced endurance performance. Eur. J. Appl. Physiol. 114, 1095–1105.

Pageaux, B., 2014. The psychobiological model of endurance performance : An effort-based decision-making theory to explain self-paced endurance performance. Sports Med. 44, 1319–1320.

Pageaux, B., Marcora, S.M., Rozand, V., Lepers, R., 2015. Mental fatigue induced by prolonged self-regulation does not exacerbate central fatigue during subsequent whole body endurance exercise. Front. Neurosci.

Pageaux, B., Gaveau, J., 2016. Studies using pharmacological blockade of muscle afferents provide new insights into the neurophysiology of perceived exertion: Journal Club. J. Physiol. 594, 5049–5051.

Pageaux, B., 2016. Perception of effort in Exercise Science: Definition, measurement and perspectives. Eur. J. Sport Sci. 16, 885–894.

Pandolf, K.B., 1979. Effects of physical training and cardiorespiratory physical fitness on exercise-heat tolerance: Recent observations. Med. Sci. Sport., 11, 60-65.

Pandolf, K.B., 1982. Differentiated ratings of perceived exertion during physical exercise: Med. Sci. Sports Exerc. 14, 397-405.

Pandolf, K. B., Cadarette, B. S., Sawka, M. N., Young, A. J., Francesconi, R. P., Gonzalez, R. R., 1988. Thermoregulatory responses of middle-aged and young men during dry-heat acclimation. J. Appl. Physiol. 65(1), 65-71.

Pandolf, K. B., 1997. Aging and human heat tolerance. Experimental aging research, 23(1), 69-105.

Parfitt, G., Rose, E.A., Burgess, W.M., 2006. The psychological and physiological responses of sedentary individuals to prescribed and preferred intensity exercise. British Journal of Health Psychology 11, 39–53.

Parfitt, G., Evans, H., Eston, R., 2012. Perceptually Regulated Training at RPE13 Is Pleasant and Improves Physical Health: Med. Sci. Sports Exerc. 44, 1613–1618

Parfitt, G., Olds, T., Eston, R., 2015. A hard/heavy intensity is too much: The physiological, affective, and motivational effects (immediately and 6 months post-training) of unsupervised perceptually regulated training. J. Exerc. Sci. Fit. 13, 123–130.

Parkin, J.M., Carey, M.F., Febbraio, M.A., 1999. Effect of ambient temperature on human skeletal muscle metabolism during fatiguing submaximal exercise. J. Appl. Physiol. 86: 902-908.

Paulson, T.A., Bishop, N.C., Eston, R.G., Goosey-Tolfrey, V.L., 2013. Differentiated Perceived Exertion and Self-Regulated Wheelchair Exercise. Arch. Phys. Med. Rehabil. 94, 2269–2276.

Pearson, J., Low, D.A., Stohr, E., Kalsi, K., Ali, L., Barker, H., Gonzalez-Alonso, J., 2011. Hemodynamic responses to heat stress in the resting and exercising human leg: insight into the effect of temperature on skeletal muscle blood flow. AJP Regul. Integr. Comp. Physiol. 300, R663–R673.

Peiffer, J.J., Abbiss, C.R., 2011. Influence of environmental temperature on 40 km cycling time-trial performance. Int. J. Sports Physiol. Perform. 208–220.

Périard, J.D., Cramer, M.N., Chapman, P.G., Caillaud, C., Thompson, M.W., 2011a. Cardiovascular strain impairs prolonged self-paced exercise in the heat. Exp. Physiol. 96, 134–144.

Périard, J.D., Cramer, M.N., Chapman, P.G., Caillaud, C., Thompson, M.W., 2011b. Neuromuscular function following prolonged intense self-paced exercise in hot climatic conditions. European Journal of Applied Physiology 111, 1561–1569.

Périard, J.D., Racinais, S., Sawka, M.N., 2015. Adaptations and mechanisms of human heat acclimation: Applications for competitive athletes and sports: Adaptations and mechanisms of heat acclimation. Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports 25, 20–38.

Périard, J. D., Racinais, S., Timpka, T. et al., 2017. Strategies and factors associated with preparing for competing in the heat: a cohort study at the 2015 IAAF World Athletics Championships. Br J Sports Med, 51(4), 264-270.

Place, N., 2004. Twitch potentiation is greater after a fatiguing submaximal isometric contraction performed at short vs. long quadriceps muscle length. J. Appl. Physiol. 98, 429–436.

Plews, D.J., Laursen, P.B., Stanley, J., Kilding, A.E., Buchheit, M., 2013. Training Adaptation and Heart Rate Variability in Elite Endurance Athletes: Opening the Door to Effective Monitoring. Sports Medicine 43, 773–781.

Poirier, M.P., Gagnon, D., Friesen, B.J., Hardcastle, S.G., Kenny, G.P., 2015. Whole-Body Heat Exchange during Heat Acclimation and Its Decay. Med. Sci. Sports. Eexerc. 47, 390–400.

Pryor, R.R., Roth, R.N., Suyama, J., Hostler, D., 2015. Exertional Heat Illness: Emerging Concepts and Advances in Prehospital Care. Prehospital Disaster Med. 30, 297–305.

-R-

Racinais, S., Oksa, J., 2010. Temperature and neuromuscular function. Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports 20, 1–18.

Racinais, S., Girard, O., 2012. Neuromuscular failure is unlikely to explain the early exercise cessation in hot ambient conditions : voluntary exercise cessation in a hot environment. Psychophysiol. 49, 853–865.

Racinais, S., PéRiard, J.D., Karlsen, A., Nybo, L., 2015. Effect of Heat and Heat Acclimatization on Cycling Time Trial Performance and Pacing: Medicine & Science in Sports & Exercise 47, 601–606.

Ramanathan, N.L., 1964. A new weighting system for mean surface temperature of the human body. Journal of applied physiology 19, 531–533.

Rasmussen, P., Stie, H., Nielsen, B., Nybo, L., 2006. Enhanced cerebral CO2 reactivity during strenuous exercise in man. Eur. J. Appl. Physiol., 96(3), 299-304.

Rasmussen, P., Nybo, L., Volianitis, S., Moller, K., Secher, N.H., Gjedde, A., 2010. Cerebral oxygenation is reduced during hyperthermic exercise in humans. Acta Physiol (Oxf) 199: 63-70.

Ravanelli, N.M., Cramer, M.N., Molgat-Seon, Y., Carlsen, A.N., Jay, O., 2014. Do greater rates of body heat storage precede the accelerated reduction of self-paced exercise intensity in the heat? Eur. J. Appl. Physiol. 114, 2399–2410.

Ray, C. A., Gracey, K. H., 1997. Augmentation of exercise-induced muscle sympathetic nerve activity during muscle heating. J. Appl. Physiol., 82(6), 1719-1733.

Reilly, T., Waterhouse, J., Edwards, B., 2005. Jet lag and air travel: implications for performance. Clinics in sports medicine, 24(2), 367-380.

Ring, E. F. J., Ammer, K., 2000. The technique of infrared imaging in medicine. Thermol. Internat., 10(1), 7-14.

Rivas, E., Rao, M., Castleberry, T., Ben-Ezra, V., 2017. The change in metabolic heat production is a primary mediator of heat acclimation in adults. Journal of Thermal Biology 70, 69–79.

Roach, G.D., Sargent, C., Darwent, D., Kennaway, D.J., Ferguson, S.A., 2010. Lost in transit: the journey of ingestible temperature sensors through the human digestive tract. Ergonomia 32, 49–61.

Robertson, R.J., Goss, F.L., Dubé, J. et al., 2004. Validation of the Adult OMNI Scale of Perceived Exertion for Cycle Ergometer Exercise: Med. Sci. Sport. Exerc. 36, 102–108.

Roberts, M.F., Wenger, C.B., Stolwijk, J.A., Nadel, E.R., 1977. Skin blood flow and sweating changes following exercise training and heat acclimation. J. Appl. Physiol., 43, 133-137.

Roberts, W.O., 2007. Exercise-associated collapse care matrix in the marathon. Sports Med. 37: 431-433.

Robertson, R.J., Falkel, J.E., Drash, A.L. et al., 1986. Effect of blood pH on peripheral and central signals of perceived exertion. Med. Sci. Sport. Exerc. 18: 114-122, 1986.

Robertson, C.V., Marino, F.E., 2016. A role for the prefrontal cortex in exercise tolerance and termination. J. Appl. Physiol. 120, 464–466.

Roelands, B., Hasegawa, H., Watson, P. et al., 2008. The Effects of Acute Dopamine Reuptake Inhibition on Performance: Med. Sci. Sports Exerc. 40, 879–885.

Roelands, B., de Koning, J., Foster, C., Hettinga, F., Meeusen, R., 2013. Neurophysiological determinants of theoretical concepts and mechanisms involved in pacing. Sports Med. 43, 301–311.

Roelands, B., De Pauw, K., Meeusen, R., 2015. Neurophysiological effects of exercise in the heat: Exercise and the brain. Scand. J. Med. Sci. Sports 25, 65–78.

Roelands, B., Meeusen, R., 2010. Alterations in central fatigue by pharmacological manipulations of neurotransmitters in normal and high ambient temperature. Sports Med. 40, 229–246.

Romanovsky, A.A., 2006. Thermoregulation : some concepts have changed. Functional architecture of the thermoregulatory system. AJP Regul. Integr. Comp. Physiol. 292, R37–R46.

Romero, D. H., Lacourse, M. G., Lawrence, K. E., Schandler, S., Cohen, M. J., 2000. Event-related potentials as a function of movement parameter variations during motor imagery and isometric action. Beh. Brain. Res., 117(1-2), 83-96.

Rowell, L.B., Marx, H.J., Bruce, R.A., Conn, R.D., Kusumi, F., 1966. Reductions in cardiac output, central blood volume, and stroke volume with thermal stress in normal men during exercise. Journal of Clinical Investigation 45, 1801.

Rowell, L.B., Kraning, K.K., Kennedy, J.W., Evans, T.O., 1967. Central circulator responses to work in dry heat before and after acclimatization. J. Appl. Physiol., 22, 509-518.

Rowell, L. B., Brengelmann, G. L., Blackmon, J. R., Twiss, R. D., Kusumi, F., 1968. Splanchnic blood flow and metabolism in heat-stressed man. J. Appl. Physiol., 24(4), 475-484.

Rowell, L.B., Brengelmann, G., Detry, J-M., Wyss, C., 1971. Venomotor responses to local and remote thermal stimuli to skin in exercising man. J. Appl. Physiol. 30: 72-77.

Rowell, L.B., 1974. Human cardiovascular adjustments to exercise and thermal stress. Physiol. Rev., 54(1) : 75–159.

Rozand, V., Lepers, R., 2016. Influence de la fatigue mentale sur les performances physiques. Mov. Sport Sci. - Sci. Mot.

Rudolf, J., Douglass, J., Baron, J., Lewandrowski, K., 2015. Evaluation of the i-STAT point-of-care capillary whole blood hematocrit and hemoglobin: Comparison to the Siemens RAPIDLab 1200, Sysmex XE5000, and manual spun hematocrit. Clinica Chimica Acta 446, 37–42.

Rutkove, S.B., 2001. Effects of temperature on neuromuscular electrophysiology. Muscle & nerve 24, 867–882.

-S-

Saint Clair Gibson, A., Baden, D. A., Lambert, M. I., Lambert, E. V., Harley, Y. X., Hampson, D., Noakes, T. D., 2003. The conscious perception of the sensation of fatigue. Sport. Med., 33(3), 167-76.

Saint Clair Gibson, A., 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.

Saint Clair Gibson, A., Lambert, E.V., Rauch, L.H., Tucker, R., Baden, D.A., Foster, C., Noakes, T.D., 2006. The role of information processing between the brain and peripheral physiological systems in pacing and perception of effort. Sports Med. 36, 705–722.

Saltin, B., Rådegran, G., Koskolou, M. D., Roach, R. C., 1998. Skeletal muscle blood flow in humans and its regulation during exercise. Acta Physiol. Scand., 162(3), 421-436.

Sargeant, A.J., 1987. Effect of muscle temperature on leg extension force and short term power output in humans. Eur. J. Appl. Physiol., 56:693–698

Sato, F., Owen, M., Mattes, R., Sato, K., Gisolfi, C.V., 1990. Functional and morphological changes in the eccrine sweat with heat acclimation. J. Appl. Physiol., 69, 232-236.

Sato, K., 1977. The physiology, pharmacology, and biochemistry of the eccrine sweat gland. Rev. Physiol. Bioch., 79, 51-131.

Sawka, M.N., Pandolf, K.B., Avellini, B.A., Shapiro, Y., 1983a. Does heat acclimation lower the rate of metabolism elicited by muscular exercise? Aviat. Space. Environ. Med., 54, 27-31.

Sawka, M.N., Francesconi, R.P., Pimental, N.A., Pandolf, K.B., 1984. Hydration and vascular fluid shifts during exercise in the heat. J. Appl. Physiol., 56(1), 91-96.

Sawka, M.N., Young, A.J., 2006. Physiological systems and their responses to conditions of heat and cold (No. MISC-03-12).

Sawka, M.N., Leon, L.R., Montain, S.J., Sonna, L.A., 2011. Integrated physiological mechanisms of exercise performance, adaptation, and maladaptation to heat stress. Comprehensive Physiology.

Schlader, Z.J., Simmons, S.E., Stannard, S.R., Mündel, T., 2011. The independent roles of temperature and thermal perception in the control of human thermoregulatory behavior. Physiol. Behav. 103, 217–224.

Schmit, C., Duffield, R., Hausswirth, C., Coutts, A.J., Le Meur, Y., 2016. Pacing adjustments Associated with Familiarisation: Heat *vs.* Temperate Environments. Int. J. Sports Physiol. Perf. 1–18.

Schmit, C., Duffield, R., Hausswirth, C., Brisswalter, J., Le Meur, Y., 2017. Optimizing Heat Acclimation for Endurance Athletes: High- vs Low-Intensity Training. Int. J. Sports Physiol. Perform.

Selkirk, G.A., McLellan, T.M., Wright, H.E., Rhind, S.G., 2008. Mild endotoxemia, NF-kappaB translocation, and cytokine increase during exertional heat stress in trained and untrained individuals. Am. J. Physiol. 295: 611-623.

Shapiro, Y., Moran, D., Epstein, Y., 1998. Acclimatization strategies – preparing for exercise in the heat. Int. J. Sports. Med., 19, 161-163

Shibasaki, H., Hallett, M., 2006. What is the Bereitschaftspotential? Clin. Neurophysiol. 117.

Shibasaki, M., Crandall, C. G., 2010. Mechanisms and controllers of eccrine sweating in humans. Front. Biosci., 2, 685.

Skorski, S., Thompson, K.G., Keegan, R.J., Meyer, T., Abbiss, C.R., 2017. A Monetary Reward Alters Pacing but Not Performance in Competitive Cyclists. Frontiers in Physiology 8.

Smirmaul, B. d. P.C., 2012. Sense of effort and other unpleasant sensations during exercise: clarifying concepts and mechanisms. Br. J. Sports Med. 46, 308–311.

Smits, B.L.M., Pepping, G.-J., Hettinga, F.J., 2014. Pacing and Decision Making in Sport and Exercise: The Roles of Perception and Action in the Regulation of Exercise Intensity. Sports Med. 44, 763–775.

Smutok, M. A., Skrinar, G. S., Pandolf, K. B., 1980. Exercise intensity: subjective regulation by perceived exertion. Archives of physical medicine and rehabilitation, 61(12), 569-574.

Soriano-Maldonado, A., Romero, L., Femia, P., Roero, C., Ruiz, J., Gutierrez, A., 2013. A Learning Protocol Improves the Validity of the Borg 6–20 RPE Scale During Indoor Cycling. Int. J. Sports Med. 35, 379–384.

Spring, J.N., Place, N., Borrani, F., Kayser, B., Barral, J., 2016. Movement-Related Cortical Potential Amplitude Reduction after Cycling Exercise Relates to the Extent of Neuromuscular Fatigue. Front. Hum. Neurosci. 10.

Stanley, C. T., Pargman, D., Tenenbaum, G., 2007. The effect of attentional coping strategies on perceived exertion in a cycling task. J. Appl. Sport. Psychol., 19(3), 352-363.

Stolwijk, J. A., 1971. A mathematical model of physiological temperature regulation in man.

Sunderland, C., Morris, J.G., Nevill, M.E., 2008. A heat acclimation protocol for team sports. British Journal of Sports Medicine 42, 327–333.

Swart, J., Lamberts, R.P., Lambert, M.I. et al., 2009. Exercising with reserve: evidence that the central nervous system regulates prolonged exercise performance. Br. J. Sports Med. 43, 782–788.

-T-

Takahashi, N., Nakamura, T., Kanno, N., Kimura, K., Toge, Y., Lee, K.-H., Tajima, F., 2011. Local heat application to the leg reduces muscle sympathetic nerve activity in human. Eur. J. Appl. Physiol. 111, 2203–2211.

Takamata, A., Yoshida, T., Nishida, N., Morimoto, T., 2001. Relationship of osmotic inhibition in thermoregulatory responses and sweat sodium concentration in humans. Am. J. Physiol. Regul. Integrative Comparative Physiol., 280(3), R623-R629.

Tatterson, A.J., Hahn, A.G., Martin, D.T., Febbraio, M.A., 2000. Effects of heat stress on physiological responses and exercise performance in elite athletes. J. Sci. Med. Sport 3, 186–193.

Taylor, W.F., Johnson, J.M., Kosiba, W.A., Kwan, C.M., 1988. Graded cutaneous vascular responses to dynamic leg exercise. J. Appl. Physiol. 64: 1803-1809.

Taylor, N.A.S., Cotter, J.D., 2006. Heat adaptation: Guidelines for the optimisation of human performance. Int. J. Sport. Med., 7, 33-57.

Taylor, N.A.S., 2014. Human heat adaptation. Comprehensive Physiology 325–365.

Taylor, N.A.S., Tipton, M.J., Kenny, G.P., 2014. Considerations for the measurement of core, skin and mean body temperatures. Journal of Thermal Biology 46, 72–101.

Terry, P.C., Lane, A.M., Fogarty, G.J., 2003. Construct Validity of the Profile of Mood States - Adolescents for use with Adults. Psychology of Sport and Exercise 4, 125–39.

Teunissen, L.P.J., Klewer, J., de Haan, A., de Koning, J.J., Daanen, H.A.M., 2011. Non-invasive continuous core temperature measurement by zero heat flux. Physiological Measurement 32, 559–570.

Thomas, M.M., 2005. Voluntary muscle activation is impaired by core temperature rather than local muscle temperature. Journal of Applied Physiology 100, 1361–1369.

Thornley, L.J., Maxwell, N.S., Cheung, S.S., 2003. Local tissue temperature effects on peak torque and muscular endurance during isometric knee extension. Eur. J. Appl. Physiol. 90, 588–594.

Tikuisis, P., McLellan, T.M., Selkirk, G.A., 2002. Perceptual versus physiological heat strain during exercise heat stress. Medicine & Science in Sports & Exercise 34, 1454–1461.

Todd, G., Butler, J.E., Taylor, J.L., Gandevia, S.C., 2005. Hyperthermia: a failure of the motor cortex and the muscle. The Journal of Physiology 563, 621–631.

Todd, G., Gordon, C.J., Groeller, H., Taylor, N.A.S., 2014. Does intramuscular thermal feedback modulate eccrine sweating in exercising humans? Acta Physiol. 212, 86–96.

Todnem, K., Knudsen, G., Riise, T., Nyland, H., Aarli, J. A., 1989. The non-linear relationship between nerve conduction velocity and skin temperature. J. Neurol. Neurosurg. Psychiatry, 52(4), 497-501.

Togashi, K., Hara, Y., Tominaga, T., Higashi, T., Konishi, Y., Mori, Y., Tominaga, M., 2006. TRPM2 activation by cyclic ADP-ribose at body temperature is involved in insulin secretion. The EMBO journal, 25(9), 1804-1815.

Travers, G.J.S., Nichols, D.S., Farooq, A., Racinais, S., Périard, J.D., 2016. Validation of an ingestible temperature data logging and telemetry system during exercise in the heat. Temperature 3, 208–219.

Tucker, R., Rauch, L., Harley, Y.R., Noakes, T., 2004. Impaired exercise performance in the heat is associated with an anticipatory reduction in skeletal muscle recruitment. Eur. J. Physiol. 448.

Tucker, R., Marle, T., Lambert, E.V., Noakes, T.D., 2006. 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., 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.

-U-V-

Ulmer, H.-V., 1996. Concept of an extracellular regulation of muscular metabolic rate during heavy exercise in humans by psychophysiological feedback. Experientia 52, 416–420.

Utter, A.C., Kang, J., Nieman, D.C. et al., 2003. Ratings of perceived exertion throughout an ultramarathon during carbohydrate ingestion. Percept Mot Skills, 97, 175-184.

Van Beaumont, W., Bullard, R. W., 1966. Sweating exercise stimulation during circulatory arrest. Science, 152(3728), 1521-1523.

Van Cutsem, J., De Pauw, K., Buyse, L., Marcora, S., Meeusen, R., Roelands, B., 2017. Effects of Mental Fatigue on Endurance Performance in the Heat. Med. Sci. Sports Exerc. 49, 1677–1687.

Van Damme, S., Becker, S., Van der Linden, D., 2018. Tired of pain? Toward a better understanding of fatigue in chronic pain: PAIN 159, 7–10.

Vargas, N., Marino, F., 2017. Neuroinflammation, cortical activity, and fatiguing behaviour during self-paced exercise. Pflüg. Arch. - Eur. J. Physiol.

Vassort, G., Fauconnier, J., 2008. Les canaux TRP (transient receptor potential)-Une nouvelle famille de canaux à expression variée. médecine/sciences, 24(2), 163-168.

Venhorst, A., Micklewright, D., Noakes, T.D., 2017. Towards a three-dimensional framework of centrally regulated and goal-directed exercise behaviour: a narrative review. Br. J. Sports Med. bjsports-2016-096907.

Vihma, T., 2010. Effects of weather on the performance of marathon runners. Int. J. Biometeorol. 54.

-W-X-Y-Z-

Wallin, B. G., Fagius, J., 1988. Peripheral sympathetic neural activity in conscious humans. Ann. Eev. Physiol., 50(1), 565-576.

Walton, M.E., Kennerley, S.W., Bannerman, D.M., Phillips, P.E.M., Rushworth, M.F.S., 2006. Weighing up the benefits of work: Behavioral and neural analyses of effort-related decision making. Neural Netw. 19, 1302–1314.

Warburton, D. E., Haykowsky, M. J., Quinney, H. A., Blackmore, D., Teo, K. K., & Humen, D. P. (2002). Myocardial response to incremental exercise in endurance-trained athletes: influence of heart rate, contractility and the Frank-Starling effect. Exp. Physiol., 87(5), 613-622.

Weiser, P.C., Wojciechowicz, V., Funck, A., Robertson, R.J., 2007. Perceived Effort Step-up Procedure for Self-Regulating Stationary Cycle Exercise Intensity by Patients with Cardiovascular Disease. Percept. Mot. Skills 104, 236–253.

White, A. T., VanHaitsma, T. A., Vener, J., Davis, S. L., 2013. Effect of passive whole body heating on central conduction and cortical excitability in multiple sclerosis patients and healthy controls. J. Appl. Physiol., 114(12), 1697-1704.

Williamson, J.W., McColl, R., Mathews, D., Mitchell, J.H., Raven, P.B., Morgan, W.P., 2001. Hypnotic manipulation of effort sense during dynamic exercise: cardiovascular responses and brain activation. J. Appl. Physiol. 90, 1392.

Wilmore, J. H., 1968. Influence of motivation on physical work capacity and performance. J. Appl. Physiol., 24(4), 459-463.

Wilson, T.E., Cui, J., Zhang, R., Crandall, C.G., 2006. Heat stress reduces cerebral blood velocity and markedly impairs orthostatic tolerance in humans. Am. J. Physiol. 291: 1443-1448.

Wilson, T.E., Crandall, C.G., 2011. Effect of thermal stress on cardiac function. Exerc. Sport Sci. Rev. 39, 12–17.

Wilkinson, D.M., Carter, J.M., Richmond, V.L., Blacker, S.D., Rayson, M.P., 2008. The effect of cool water ingestion on gastrointestinal pill temperature. Med. Sci. Sports Exerc. 40, 523–528.

Wingfield, G.L., Gale, R., Minett, G.M., Marino, F.E., Skein, M., 2016. The effect of high versus low intensity heat acclimation on performance and neuromuscular responses. J. Therm. Biol. 58, 50–59.

Wittekind, A.L., Micklewright, D., Beneke, R., 2011. Teleoanticipation in all-out short-duration cycling. Br. J. Sports Med. 45, 114–119.

Wyndham, C.H., Benade, A.J., Williams, C.G., Strydom, N.B., Goldin, A., Heyns, A.J., 1968. Changes in central circulation and body fluid spaces during acclimatization to heat. J. Appl. Physiol., 25.

Yamakage, M., Iwasaki, S., Namiki, A., 2002. Evaluation of a newly developed monitor of deep body temperature. Journal of anesthesia 16, 354–357.

Yamamoto, S., Iwamoto, M., Inoue, M., et al., 2007. Evaluation of the effect of heat exposure on the autonomic nervous system by heart rate variability and urinary catecholamines. J. Occup. Health., 49(3):199–204.

Yamazaki, F., Hamasaki, K., 2003. Heat acclimation increases skin vasodilation and sweating but not cardiac baroreflex responses in heat-stressed humans. J. Appl. Physiol., 95(4), 1567-1574.

Yao, Y., Lian, Z., Liu, W., Shen, Q., 2007. Experimental Study on Skin Temperature and Thermal Comfort of the Human Body in a Recumbent Posture under Uniform Thermal Environments. Indoor Built Environ. 16, 505–518.

Young, A. J., Sawka, M. N., Levine, L. et al., 1995. Metabolic and thermal adaptations from endurance training in hot or cold water. J. Appl. Physiol., 78(3), 793-801.

Zeiner, A., Klewer, J., Sterz, F. et al., 2010. Non-invasive continuous cerebral temperature monitoring in patients treated with mild therapeutic hypothermia: An observational pilot study. Resuscitation 81, 861–866.

Zenon, A., Sidibe, M., Olivier, E., 2015. Disrupting the Supplementary Motor Area Makes Physical Effort Appear Less Effortful. J. Neurosci. 35, 8737–8744.

Zhang, H., Arens, E., Huizenga, C., Han, T., 2010. Thermal sensation and comfort models for non-uniform and transient environments, Part III: whole-body sensation and comfort. Build. Environ. 45: 399–410.