

UNIVERSITE DES ANTILLES

École doctorale pluridisciplinaire

Thèse présentée pour obtenir le grade de
DOCTEUR DE L'UNIVERSITE DES ANTILLES
Groupe des disciplines du CNU : Section 74

**Activités cycliques de longue durée en climat tropical : Analyse des stratégies
d'hydratation, de thermorégulation et influence du rôle de la fatigue musculaire sur la
performance, en compétition et en laboratoire**

Présentée par

Michelle BAILLOT

Sous la direction du Pr Olivier HUE

Soutenue le 5 juillet 2016 devant un jury composé de :

N : [0000AGUY0000]

- JURY -

M. Didier CHOLLET, Professeur, Université de Rouen, **Président**

Mme Sophie ANTOINE-JONVILLE, MCF-HDR, Université des Antilles, **Assesseur**

M. Christophe HAUTIER, MCF-HDR, Université Claude Bernard Lyon 1, **Rapporteur**

M. Olivier HUE, Professeur, Université des Antilles, **Directeur**

M. Eustase JANKY, Professeur, Université des Antilles, **Assesseur**

M. Aurélien PICHON, MCF-HDR, Université de Poitiers, **Rapporteur**

Remerciements

Je remercie très chaleureusement mon directeur de thèse, monsieur le Pr Olivier Hue, qui, malgré ses nombreuses occupations, a accepté de prendre la direction de cette thèse. Je le remercie également pour la confiance qu'il m'a accordée en me laissant une très grande autonomie et liberté de choix pour mener à bien ce travail de recherche. Qu'il trouve ici l'expression de ma profonde gratitude.

Un immense merci à Sophie Antoine-Jonville qui a fait preuve de patience et de pédagogie pour m'aider à appréhender les subtilités de l'électromyographie et de l'analyse statistique des données. D'une disponibilité sans faille depuis le premier jour, je te dois beaucoup dans la réalisation de ce travail de thèse.

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à monsieur Didier Chollet, qui m'a fait l'honneur de présider le jury de thèse de doctorat. Mes plus sincères remerciements vont également à Aurélien Pichon et à Christophe Hautier qui m'ont fait l'honneur d'être rapporteurs de cette thèse.

Cette étude n'aurait pas été possible sans les nombreux athlètes qui ont accepté de participer à divers protocoles d'études, avec beaucoup d'enthousiasme. Je leur adresse tous mes remerciements.

Je dois sans hésitation à Stéphanie Le Bris le fait d'avoir entrepris ce travail de recherche, sans son impulsion, je n'aurais jamais osé prendre ce chemin difficile, mais ô combien

passionnant !Merci à Coralie pour m'avoir encouragée régulièrement dans l'avancement de mon travail, merci à Guillaume pour son précieux travail de relecture.

Je remercie chaleureusement tous les membres du laboratoire ACTES, doctorants, étudiants master ou stagiaires, professeurs d'EPS et personnel administratif pour leur soutien amical et chaleureux et qui m'ont encouragée durant ce parcours doctoral. Un remerciement plus personnel à mon ami, ThanTran qui a été un exemple de pugnacité.

Je tiens à exprimer ma reconnaissance à monsieur le Pr Tim Noakes pour son accueil chaleureux au Sport Science Institute of South Africa. Bien que l'expérience ait été trop courte, elle fut malgré tout riche d'enseignements, tant sur le plan théorique que pratique.

Merci à Philippe Connes et Xavier Waltz de m'avoir accueillie à l'UMR Inserm de Pointe-à-Pitre et de m'avoir permis d'assouvir ma curiosité en matière d'hémorhéologie.

Merci enfin à ma famille qui m'a soutenue depuis le début de mes études universitaires et plus particulièrement ma sœur Alice, avec qui j'ai passé mes premières années à la Faculté de Rennes.

Merci à mon fils Mahé, pour l'amour qu'il me témoigne et pour les moments passés à mes côtés à tenter de comprendre ce qu'est une thèse ! Les mots me manquent pour remercier Jérôme, pour son soutien indéfectible et sa patience. Merci pour tout !

RESUME

La baisse de la performance aérobie en climat tropical a été largement décrite dans de multiples activités d'endurance mais les processus responsables de cette altération restent assez méconnus. Nous nous proposons donc au travers d'études de laboratoire et de terrain, de tenter d'explorer les mécanismes responsables de cette baisse de performance aérobie en climat tropical. Si l'atteinte d'une température plafond est plutôt observée dans les protocoles de laboratoire, particulièrement à des intensités élevées, il semble que les mécanismes d'anticipation par réduction de l'intensité de l'exercice soient plus prégnants dans un environnement thermique qui exacerbe le stockage de chaleur. En effet, le climat tropical qui provoque l'augmentation du stockage de chaleur et les pertes hydriques, est un environnement susceptible de faire émerger l'un ou l'autre de ces processus (température plafond/anticipation). L'incapacité à opérer une thermorégulation optimale en raison de l'inefficacité des processus d'évaporation, mène théoriquement à une augmentation inéluctable de la température corporelle, catalysée par la déshydratation. Aussi, l'atteinte d'une température plafond pourrait être l'origine de l'arrêt de l'exercice. En même temps, l'exacerbation des stimuli liés à l'hyperthermie, en relation avec les contraintes d'humidité de l'air ambiant, est également susceptible d'accentuer le processus d'anticipation par une baisse d'intensité précoce, et donc la fatigue centrale. Ainsi, nous avons étudié sur 2 épreuves de compétition, un trail de 27 km et un half-Ironman, les relations entre les stratégies d'hydratation, l'évolution de la température gastro-intestinale et la performance des athlètes. Nous avons également testé en situations standardisées les différents paramètres pouvant être responsables de l'arrêt ou de la baisse d'intensité (i.e) en climat tropical : les paramètres cardio-respiratoires, les paramètres psychologiques, d'hydratation et de température

corporelle, la fatigue musculaire et centrale.

ABSTRACT

The decrease in aerobic performance in tropical climate has been widely described in many endurance activities, but the processes responsible for this alteration remain relatively undetermined. We therefore propose through laboratory and field studies, to explore the mechanisms responsible for this diminution in aerobic performance in tropical climate. If reaching a 40 °C core temperature is rather observed in laboratory procedures, especially with high levels of exercise intensity, it seems that the mechanisms of anticipation by reducing the intensity of exercise are more proliferious in a thermal environment intensifying heat storage and dehydration. Indeed, the tropical climate elicits a rise in heatstorage and water loss even if sweating is ineffective in releasing heat. The attainment of a critically high level of core temperature has been proposed as the main limiting factor of aerobic performance in the heat. In opposition with this hypothesis, the inability to control optimal thermoregulation in uncompensable environments could lead to central fatigue, with a reduction in power output subconsciously selected by the subjects in order to prevent core temperature from reaching dangerous levels.

Thus, we studied on 2 competition events, a 27 km-trail and a half-Ironman, relations between hydration strategies, changes in gastrointestinal temperatures and athletes'performance. We also tested in standardized conditions different factors that may be responsible for exhaustion or decreasing intensity in tropical climate: cardio-respiratory parameters, psychological parameters, hydration and body temperature, central and muscle fatigue.

TABLE DES MATIERES

Introduction	14
Partie I - revue de la litterature.....	17
Chapitre I - Equilibre thermique	18
Section I - Température corporelle et environnement thermique	18
Section II - Thermorégulation	20
Section III - Réponses physiologiques aux variations de température.....	23
Chapitre II - Hyperthermie	32
Section I - Hyperthermie et exercice à la chaleur.....	32
Section II - Le coup de chaleur d'exercice	37
Chapitre III - L'équilibre hydrique.....	39
Section I - Répartition de l'eau dans le corps humain.....	39
Section II - Pertes en liquides corporels	41
Section III - Equilibre hydrique	43
Section IV - Altération de l'équilibre hydrique.....	44
Chapitre IV - Thermorégulation, exercice physique et climat chaud, fatigue musculaire.....	45
Section I - Adaptations circulatoires	45
Section II - Sudation et déshydratation	47
Section III - Facteurs influençant la thermogénèse.....	49
Section IV - Facteurs influençant la thermolyse	50
Section V - Thermorégulation en climat tropical	53
Section VI - Fatigue musculaire	56
Perspectives.....	58
Partie II - Contribution personnelle.....	60

Chapitre V - Objectifs et hypothèses de recherche	61
Section I - Objectifs et hypothèses de recherche	61
Chapitre VI - Méthodologie générale	65
Section I - Sujets	65
Contexte d'expérimentations	66
Section II - Protocole	68
Chapitre VII - Résultats	78
Section I - Etude 1 :	78
Section II - Etude 2:	83
Section III - Etude 3	85
Partie III - Discussion générale.....	94
Conclusion.....	105
Perspectives	106
Partie IV - Travaux	108

ABREVIATIONS

ACSM : American College of Sports Medicine

ADH : Hormone antidiurétique

bmp : Battements par minutes

C : Convection

CCE : Coup de chaleur d'exercice

CLM : Course contre-la-montre

CI : Contractions involontaires

CMV: Contractions maximales volontaires

E : Evaporation de la sueur

Emax : Capacité d'évaporation de l'environnement

EREQ : Evaporation requise

FC : Fréquence cardiaque

HSI : Heat Stress Index

iEMG : Electromyographie intégrée

ITS : Index of Thermal Stress

K : Conduction

M : Masse du corps

MM : Masse musculaire

NDP : Niveau de difficulté perçue

PMA : Puissance maximale Aérobie

R : Rayonnement

S : Surface

SC : Sentiment de confort

SNC : Système Nerveux Central

ST : Sensation thermique

SWreq : Débit sudoral requis

T : Température

Ta : Température ambiante

TBWL : Perte d'eau totale du corps

TC : Température centrale

Th : Température humide

Ts : Température sèche

Tcut : Température cutanée

Uosm : Osmolalité urinaire

VES : Volume d'éjection systolique

VO_{2max} : Consommation maximale d'oxygène

WBGT : Wet Bulb Globe Temperature

WI : Ingestion de boisson

LISTE DES FIGURES

Figure 1. Température de la peau en fonction de la température ambiante et pression de la vapeur d'eau en fonction de la température ambiante, d'après Brotherwood (2008)	29
Figure 2. Puissance développée sur chaque intervalle de 5% pendant un contre-la-montre de 20 km à cadence libre en conditions chaudes (35 °C) et en conditions froides (15 °C)	62
Figure 3. Signal d'électromyographie, du signal brut au signal l'électromyographie intégrée.	74
Figure 4. Corrélation entre la différence de température (delta T_{C27}/T_{C0}), le poids au départ (BM0), l'ingestion de boisson (WI), la perte d'eau totale du corps (TBWL) et la performance ($p < 0,05$)	79
Figure 5. Corrélation entre la performance prédite et la performance réelle ($p < 0,05$)	80
Figure 6. Corrélations entre la perte d'eau totale du corps (TBWL) et la différence de température T_{C27}/T_{C0} (delta T_{C27}/T_{C0}), and différence de température T_{C11}/T_{C0} (delta T_{C11}/T_{C0}); ($p < 0,05$)	81
Figure 7. Température centrale en °C, sensation thermique (Au), sentiment de confort (Au) au cours du trail à K0 (juste avant le départ), K11 (au 11 ^{ème} kilomètre) et K27 (juste après l'arrivée)	82
Figure 8. Corrélation entre le poids avant la course (BM1) et la température centrale après la natation (T_{C2}) ($p < 0,05$)	83
Figure 9. Corrélation entre le poids avant la course (BM1) et la différence de température entre le vélo et la natation (delta T_{C2}/T_{C3}) ($p < 0,05$)	84
Figure 10. Température centrale au départ (T1), après la natation (T2), après le vélo (T3) et après la course à pied (T4).	84
Figure 11. Performance du contre-la-montre en secondes en conditions tropicales (en noir), chaudes (en gris) et neutres (en blanc). Moyennes \pm écarts à la moyenne pour 10 sujets.	86
Figure 12. Force développée en kg par le muscle vaste latéral lors des contractions maximales volontaires (en haut) et lors de stimulations électromagnétiques via le nerf fémoral (en bas) avant (en gris) vs après le contre-la-montre (en blanc) en conditions tropicales (tropical), chaudes (hot) et neutres (neutral). Moyennes \pm écart à la moyenne pour 10 sujets.	87
Figure 13. Electromyogramme intégré (iEMG) à partir du muscle vaste latéral à 3, 7, 11, 15 et 19 km au cours	

<i>du contre-la-montre en conditions tropicales (en noir), chaudes (en gris) et neutres (en blanc). Moyennes ± écart à la moyenne pour 10 sujets.</i>	<i>88</i>
<i>Figure 14. Niveau de difficulté perçue (a), température centrale (b) température cutanée (c) et taux de stockage de chaleur (d) à 0, 5, 10, 15 et 20 km au cours du contre-la-montre en conditions tropicales (en noir), chaudes (en gris) et neutres (en blanc). Moyennes ± écart à la moyenne pour 10 sujets.....</i>	<i>90</i>
<i>Figure 15. Taux de stockage de chaleur à 5, 10, 15 et 20 km au cours du contre-la-montre en conditions tropicales (en noir), chaudes (en gris) et neutres (en blanc). Moyennes ± écart à la moyenne pour 10 sujets. 91</i>	
<i>Figure 16. Fréquence cardiaque au cours du contre-la-montre (en pourcentage de la durée de l'exercice) en conditions tropicales (en noir), chaudes (en gris) et neutres (en blanc). Moyennes ± écart à la moyenne pour 10 sujets.....</i>	<i>92</i>

LISTE DES TABLEAUX

<i>Tableau 1. Consommation maximale d'oxygène en valeur absolue ($L \cdot \text{min}^{-1}$) et relative ($\text{mL} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$), puissance ($W$) et vitesse ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) à $VO_{2\text{max}}$ des athlètes de kayak en ligne, en comparaison d'autres disciplines telles que le canoë-kayak, l'aviron, la natation, le cyclisme et la course à pied (Michael et coll. 2008)</i>	<i>52</i>
<i>Tableau 2. Paramètres anthropométriques pour la population générale (moyennes et écarts-types).....</i>	<i>66</i>
<i>Tableau 3. Température ($^{\circ}\text{C}$), taux d'humidité de l'air (%) et Wet Bulb Globe Temperature ($^{\circ}\text{C}$) pour les études 1 et 2 (moyennes et écarts-types)</i>	<i>66</i>
<i>Tableau 4. Température ($^{\circ}\text{C}$), taux d'humidité de l'air (%) et Wet Bulb Globe Temperature ($^{\circ}\text{C}$) pour l'étude 3 (moyennes et écarts-types).....</i>	<i>67</i>
<i>Tableau 5. Paramètres physiologiques pour la population générale de l'étude 3 : $n = 10$ (moyennes et écarts-types)</i>	<i>70</i>
<i>Tableau 6. Température centrale ($^{\circ}\text{C}$), sensation thermique, confort thermique, poids (kg) et osmolalité urinaire ($\text{mOsm} \cdot \text{Kg}^{-1}$)</i>	<i>78</i>
<i>Tableau 7. Poids (kg) et osmolalité urinaire ($\text{mOsm} \cdot \text{kg}^{-1}$) des athlètes.</i>	<i>85</i>
<i>Tableau 8. Perte de poids corporel (kg), consommation d'eau (mL), taux de perte de poids ($\text{kg} \cdot \text{h}^{-1}$) et d'ingestion d'eau ($L \cdot \text{h}^{-1}$) au cours des CLM en conditions tropicales (tropical), chaudes (hot) et neutres (neutral). Moyennes \pm écarts-types pour 10 sujets.....</i>	<i>93</i>

Même remarque

INTRODUCTION

La performance à l'exercice prolongé en climat chaud est altérée par des paramètres de thermorégulation et de balance hydrique, à savoir l'hyperthermie et la déshydratation (Maughan 1999). L'homme étant homéotherme, il doit maintenir sa température centrale (T_C) tolérable pendant l'exercice. La chaleur métabolique produite par les muscles lors d'un exercice physique peut être transférée vers l'environnement par quatre mécanismes indépendants : la conduction (K), le rayonnement (R), la convection (C) et l'évaporation (E) (Gisolfi & Wenger 1984). De plus, à la chaleur métabolique (endogène), s'ajoute la contrainte thermique environnementale (exogène). Elles ont un impact sur l'homéostasie de l'organisme et notamment une augmentation de la T_C , ce qui va déclencher le réflexe de sudation en l'absence d'autres mécanismes (K, R, C). Dans ces conditions, l'efficacité de la thermolyse dépend ainsi de la production de sueur adéquate, ainsi que de la capacité de l'environnement à évaporer la sueur.

En cas de thermolyse rendue difficile par un fort pourcentage d'humidité de l'air, l'augmentation de la T_C du sujet peut atteindre des valeurs critiques pour le maintien de l'homéostasie. En effet, les environnements dits "incompensables" sont caractérisés par une température ambiante élevée et un fort taux d'humidité de l'air ne permettant pas d'évaporer la sueur (Montain et coll. 1994) comme c'est le cas pour le climat tropical. Dans ces conditions, la production de sueur ne s'arrête pas pour autant, bien qu'elle soit inefficace dans le processus d'évacuation de la chaleur. Elle va avoir pour conséquence une déshydratation du sujet au cours de l'exercice si les pertes de sueur ne sont pas remplacées de manière adéquate. Ainsi, en conditions chaudes et humides, une concomitance du stockage de chaleur croissant

et d'une déshydratation progressive conduit à une altération de la performance. Des études de laboratoire mettent en évidence une baisse de la performance lorsque la température ambiante atteint 30°C, avec un risque de sévère hyperthermie dans les sports à dominante aérobie, tels que le cyclisme (Maughan et coll. 1997), la course à pied (Gonzalez-Alonso et coll. 2008) et bien d'autres (Mountjoy et coll. 2012).

En outre, les mécanismes physiologiques responsables du développement de la fatigue induite par hyperthermie peuvent inclure une variété de changements homéostatiques. Ces facteurs peuvent être schématiquement divisés en (1) des changements au niveau du système nerveux central (SNC) qui conduisent à ce qu'on appelle la fatigue centrale (Nybo & Nielsen 2001a; Nybo & Secher 2004) et (2) une altération de la fonction cardio-vasculaire qui va réduire dans un premier temps l'apport sanguin vers les territoires musculaires, donc l'apport en oxygène vers les muscles. Ce phénomène est habituellement décrit comme responsable de la fatigue périphérique (Hargreaves & Febbraio 1998; Nybo et coll. 2001; Gonzalez-Alonso & Calbet 2003). L'hypothèse en relation avec le SNC semble être prédominante au cours d'exercices prolongés de faible à moyenne intensité (de 50% à 80% de VO₂max) menés dans des environnements très chauds (à partir 35 °C ou au-dessus), et surtout si des températures élevées sont combinées avec un taux d'humidité de l'air important, qui entrave la capacité d'évacuer la chaleur (Gonzalez-Alonso et coll. 1999). Cette combinaison peut élever la T_C et celle du cerveau à des valeurs supérieures à 40°C et provoquer une hyperthermie sévère (Nielsen et coll. 1993; Gonzalez-Alonso et coll. 1999; Nybo et coll. 2002).

Dans un premier temps, nous allons étudier l'impact réel des processus décrits comme limitants (hyperthermie et déshydratation) sur la performance en climat tropical au cours d'une épreuve de trail (course à pied de longue durée avec dénivelé). L'hypothèse avancée lors de cette expérimentation propose que les contraintes hydriques et thermiques ne sont en réalité pas toujours limitantes, surtout concernant les coureurs les plus rapides. Dans un deuxième temps, nous allons nous intéresser aux effets différenciés de certaines disciplines aérobies et du climat tropical sur les processus de sudation et de thermorégulation au travers

d'une étude sur un triathlon de format half-Ironman. L'hypothèse étant que bien que très puissant, l'impact du climat tropical est limité par l'effet de la discipline réalisée. Autrement dit, certaines disciplines où les possibilités de thermorégulation sont importantes et /ou la contrainte thermique est relative (i.e., natation ou cyclisme) comme a pu le montrer Hue en cyclisme(Hue 2011), permettent de limiter les effets du climat tropical (sauf dans le cas d'une natation réalisée en eau chaude où le stockage de chaleur va être accentué par la température de l'eau). Nous allons ensuite nous intéresser à l'influence des processus "température plafond" vs "anticipation" dans la baisse de performance au décours d'une épreuve aérobique de longue durée et surtout comparer les effets de ces processus au regard de 3 climats différents (neutre, chaud et sec et chaud et humide). Le climat tropical par son taux d'humidité de l'air élevé constitue un stress thermique plus prégnant qui devrait exacerber au moins l'un des processus cités plus haut.

PARTIE I - REVUE DE LA LITTERATURE

Chapitre I - Equilibre thermique

Section I - Température corporelle et environnement thermique

I. Homéothermie

L'homme est homéotherme. Cela signifie que sa température corporelle est constante. L'homme interagit avec l'environnement lorsque celui-ci varie, de manière à atteindre un niveau de confort optimal. Son adaptation peut se faire au niveau comportemental (liée au contexte), au niveau physiologique (on parle d'acclimatation) ou au niveau psychologique (on parle alors d'accoutumance liée aux attentes ou aux expériences passées) (Périard et coll. 2015). Pour notre étude, nous étudierons plus précisément les aspects physiologiques. Nous aborderons l'aspect psychologique à travers la notion de sensation de chaleur thermique (ST) et sentiment de confort (SC).

Les processus de thermorégulation utilisés par l'homéotherme afin de contrôler sa T_C , nécessaire au maintien de l'équilibre thermique, sont la thermolyse et la thermogénèse. La T_C dépend de la chaleur produite par le corps lors du métabolisme de base (cœur, cerveau et foie en majorité) et par les muscles lors d'un exercice. La régulation de la température corporelle affecte particulièrement deux compartiments : un noyau (environ 2/3 du corps) qui est le siège principal de la production de chaleur et dont la température est constante; et une enveloppe, l'écorce (comprend une partie des tissus sous-cutanés et la peau) dont la température peut varier. La température de cette enveloppe, appelée couramment température cutanée (T_{cut}) est délibérément sacrifiée au profit de celle du noyau par diminution ou par augmentation de

son irrigation sanguine, lors de l'exposition au froid ou au chaud respectivement. Le transport de chaleur du noyau vers la surface s'effectue par conduction simple ou par convection sanguine, chacun de ces transferts de chaleur étant proportionnel à la différence de température entre le noyau et la peau (Sawka et coll. 2011).

II. Température centrale

La T_C est le niveau moyen de l'énergie thermique de l'organisme mesuré en degré Celsius ($^{\circ}\text{C}$) à l'aide d'un thermomètre ou d'un thermocouple étalonné. Elle est contrôlée par des mécanismes physiologiques et résulte de l'équilibre entre la production et la déperdition de chaleur dans l'organisme. Les limites maximales de tolérance des cellules vivantes oscillent entre 0°C (i.e., la température de destruction cellulaire par des cristaux de glace) et 45°C (i.e., la température de coagulation intracellulaire des protéines)(Bouchama & Knochel, 2002). Le corps humain ne tolère que de petites variations de la T_C de 35 à 41°C et la zone de neutralité, sans mise en jeu des mécanismes thermorégulateurs, n'est que de $0,4^{\circ}\text{C}$ (Lopez et coll. 1994). La température du noyau que l'on associe à T_C est stable, elle fluctue quelque peu entre 36°C au milieu de la nuit et jusqu'à $37,6^{\circ}\text{C}$ au cours de la période postprandiale du déjeuner. En vue du maintien de la température interne entre ces limites, l'organisme a développé des réponses efficaces et spécialisées au stress thermique aigu.

III. Température cutanée

La température de l'enveloppe varie d'un point à l'autre et en fonction de la mesure plus ou moins externe sur la surface du corps. Les extrémités telles que les mains et les pieds ont toujours une température plus inférieure que le reste de l'enveloppe. Pour déterminer la température moyenne de l'enveloppe, il faut mesurer plusieurs points à la surface du corps, afin de calculer la T_{cut} moyenne. Il existe plusieurs méthodes de calcul de la T_{cut} en fonction du nombre de sites de mesure à la surface du corps. Nous développerons la formule de calcul

de la Tcut de Ramanathan (Ramanathan 1964), utilisée dans l'étude 3 (voir la partie "matériel et méthode").

Section II - Thermorégulation

Les échanges de chaleur entre la peau et l'environnement sont influencés par un ensemble de paramètres, tels que la température ambiante (T_a), l'humidité relative de l'air (HR), le rayonnement, la vitesse de l'air, les vêtements et l'activité du sujet (Hodder & Parsons 2007; Parsons 1999). À l'exercice, tout travail physique s'accompagne d'une chaleur métabolique produite par la dégradation des substrats énergétiques et liée aux frottements mécaniques issus du mouvement. Ainsi, les transferts de chaleur de l'organisme vers l'environnement facilitent la perte globale de chaleur. La chaleur produite par l'organisme est transférée au niveau des vaisseaux sanguins vers la peau, où elle est évacuée dans l'environnement pour éviter une élévation de la T_C . Si la production de chaleur métabolique ne peut être dissipée, elle va s'accumuler et ainsi atteindre le noyau thermique. Avec l'augmentation progressive de la T_C , sans moyen de dissipation de la chaleur, il y a un risque d'hyperthermie. Par ailleurs, la chaleur ambiante peut également s'ajouter à la charge de chaleur métabolique lorsque la température ambiante (T_a) est supérieure à T_C . En effet, il a été montré que l'exposition à un environnement thermique chaud (chaleur exogène) a un impact sur la température cutanée (T_{cut}) et centrale (T_C) au repos (Bishop 2003) et à l'exercice (Gonzalez-Alonso et coll. 2008).

I. Thermogénèse

La production de chaleur par l'organisme est largement déterminée par son activité

métabolique. Le métabolisme basal correspond à la production de chaleur par les cellules des différents tissus et organes pour assurer les fonctions vitales. Cette chaleur produite par le métabolisme cellulaire dans tous les tissus actifs est transportée via la circulation sanguine. Le débit sanguin local au niveau d'un organe est donc lié à son métabolisme et il va, par conséquent, dépendre de sa production de chaleur. Le catabolisme lié à la digestion de la nourriture participe à la thermogénèse lors de la dégradation de nutriments par l'organisme (Johnson 2007). À l'exercice, la production de chaleur métabolique par les muscles est proportionnelle à l'intensité de l'exercice et peut atteindre $5000 \text{ kJ}\cdot\text{h}^{-1}$ (Nybo et coll. 2014). On considère que pour des exercices de type aérobie, 75% de l'énergie est libérée sous forme de chaleur par l'organisme. Le rôle de la circulation sanguine est d'évacuer la chaleur produite par les organes spécifiques les plus actifs dans l'organisme afin d'homogénéiser la température du noyau.

II. Thermolyse

La transformation de l'énergie chimique en énergie mécanique au cours de la contraction musculaire, entraîne une forte production de chaleur liée à un rendement mécanique limité. Grâce à des réponses thermorégulatrices adaptées telles que les mécanismes de thermolyse, cette accumulation de chaleur est limitée de manière efficace en environnement compensable. Le processus de thermolyse peut se décomposer en deux phases qui sont plus ou moins intriquées. Tout d'abord, un premier transfert de chaleur produite par les muscles actifs va se faire vers la surface cutanée par convection via le sang, qui lui, joue un rôle de vecteur. Ensuite, il faut éliminer cette chaleur vers l'environnement extérieur. Du gradient de température entre l'environnement et la peau va dépendre cette élimination de chaleur. En effet, la chaleur va s'écouler de la zone de haute énergie (T° et P) vers la zone de basse énergie selon la 2nde loi de la thermodynamique (pour une revue, voir Billat 2003). Quand la température ambiante est supérieure à la T_{cut} , le sens des échanges va s'inverser et la charge thermique exogène (i.e., celle de l'extérieur) va s'ajouter à la charge thermique

endogène (i.e., la chaleur produite à l'exercice par les muscles).

Section III - Réponses physiologiques aux variations de température

I. Mécanismes de régulation de la température corporelle

L'hypothalamus régule la T_C par des mécanismes nerveux de rétrocontrôle. Il fonctionne comme un thermostat en intégrant l'ensemble des données thermiques provenant de la peau et des organes profonds. À la température corporelle normale de 37°C et jusqu'à 40°C, les conditions sont optimales pour l'activité enzymatique d'un sujet (Febbraio 2000). La thermorégulation corporelle est régulée par une zone de l'hypothalamus antérieur, située dans l'aire préoptique et par des récepteurs thermosensitifs. De nombreux neurones sont activés au niveau de l'aire préoptique lorsque la température augmente. D'autres neurones sont activés en réponse à un signal issu de thermorécepteurs, distribués sur tout le corps, au niveau cutané, muqueux, musculaire, central et hypothalamique. Les thermorécepteurs situés au niveau de la peau sont capables de détecter les variations de chaud et de froid. Ces signaux interagiraient avec ceux en provenance des neurones thermosensibles pour constituer un système efficace de contrôle de la température corporelle. Le fonctionnement en interaction de ces deux types d'afférences permettrait une régulation optimale de la T_C à un niveau de référence de 37,2 °C, désigné « température de consigne des mécanismes de contrôle de la température (Billat, 2005). Notons que cette température correspond à l'agitation moléculaire et particulière, à l'échelle atomique, des composants d'un corps. Il existe quatre modalités de transfert de la chaleur ; la première concerne les transferts de masse, il s'agit de la convection sanguine cutanée; les trois autres correspondent à des transferts d'énergie:(1) par contact direct entre deux particules de température différente, (2) par changement d'état, (3) par

émission/absorption de rayonnement infrarouge.

Mécanismes passifs

1. Le transfert de chaleur par conduction (K)

Ce mode de transfert thermique nécessite un contact direct entre deux surfaces d'échange. Pour l'être humain, ce transfert thermique se réalise de la peau vers les vêtements ou bien les objets avec laquelle elle est en contact (par exemple des pieds avec le sol en position debout). Il faut également prendre en compte la conduction en cas d'immersion dans l'eau puisque les échanges y sont plus importants du fait de la conductivité thermique élevée de l'eau (égale à $0,6 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$, soit environ 20 fois plus grande que celle de l'air, qui elle est équivalente à $0,0262 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$). Le transfert de chaleur par conduction se fait toujours dans le sens du gradient de température, de la particule la plus chaude vers la particule la plus froide. Il existe également un mode de conduction à travers le tissu humain où peuvent s'effectuer les transferts thermiques. En effet, une grande partie des échanges est réalisée à travers les tissus et les muscles par la circulation du sang. Ce dernier peut réchauffer ou refroidir les différents tissus corporels avec lesquels il entre en contact. De même, les différents tissus adjacents peuvent échanger de la chaleur par conduction simple.

2. Le transfert de chaleur par convection (C)

La plupart du temps, la T_{cut} de l'homme est supérieure à celle de la température ambiante. L'air situé au niveau de la peau est donc chauffé par conduction autrement dénommée convection naturelle. À l'exercice, dans des activités telles que le cyclisme ou en présence de vent ou d'un ventilateur, on parle de convection forcée. Les échanges thermiques par convection sont fonction de la vitesse de l'air et de la différence de température entre la peau et l'air. Quand la température de l'air se situe en-dessous de 35°C , la T_{cut} est supérieure à la température de l'air et la chaleur est perdue par convection. Mais à des températures de

l'air plus élevées, la température de la peau est inférieure à la température de l'air, la convection vient alors s'ajoutée à l'accumulation de chaleur endogène à l'exercice.

3. Le transfert de chaleur par rayonnement (R)

Ce mode de transfert de chaleur fonctionne par rayonnement sous forme d'onde électromagnétique. Les transferts thermiques par rayonnement sont importants lorsque la différence entre la T_{cut} et le milieu ambiant est grande. Le corps humain rayonne de la chaleur en tout point de son corps et, de la même manière, les parois de la pièce dans laquelle il se trouve émettent de la chaleur vers ce corps qui reçoit donc de la chaleur de la part de l'environnement. Le transfert thermique par rayonnement est difficile à évaluer car il dépend de l'intensité du rayonnement mais aussi de l'absorptivité de la peau, la couleur de la peau ou l'angle d'incidence entre le soleil et la position du corps (Arens & Zhang 2006). Les échanges thermiques par rayonnement concernent aussi bien des pertes de chaleur dans un environnement plus frais et des gains de chaleur dans des ambiances plus chaudes.

1. Le transfert de chaleur par évaporation

Le transfert de chaleur par changement d'état correspond au transfert de chaleur liée à l'évaporation de l'eau. Ce mode de transfert thermique se produit au niveau de la peau mais aussi des voies respiratoires. Les échanges de chaleur par évaporation sont essentiellement des pertes. Pour évaporer 1 g de sueur, il faut une énergie de 2,45 kJ. L'évaporation sudorale dépend du gradient de pression de vapeur d'eau entre la peau et l'environnement, plus l'air est chaud et surtout sec, plus elle est importante.

Évaporation cutanée :

La perspiration insensible et la sécrétion par les glandes sudoripares sont deux modes de production de sueur. La perspiration insensible est un phénomène passif de type diffusion

transépidermique. Cette production de sueur représente 6 % de la capacité sudorale maximale cutanée (Lamke et coll. 1977). La sécrétion de sueur par les glandes sudoripares est un mécanisme actif, déclenché par le système de thermorégulation.

L'évaporation au niveau des voies respiratoires :

L'air en passant par les voies respiratoires se charge en vapeur d'eau et se sature en humidité. Ce système permet une perte de chaleur liée à l'évaporation de l'eau si l'air n'est pas saturé en humidité.

Mécanismes actifs

2. Mécanismes actifs inconscients

Des osmorécepteurs et des barorécepteurs informent respectivement l'hypothalamus des changements concernant l'osmolalité plasmatique et le volume sanguin qui de ce fait, peuvent affecter la vasodilatation cutanée et la sudation en réponse à une augmentation de la T_C (Gonzalez-Alonso et coll. 2008). Lorsque T_a atteint 35 °C, les échanges de chaleur entre la peau et l'environnement sont peu importants (Brotherhood 2008) et la peau est principalement refroidie par évaporation de l'eau de la sueur à sa surface. De même, lors d'un exercice physique intense, 80% de la chaleur dissipée vers l'environnement se fait sous forme d'évaporation (Kenney 1998).

3. Mécanismes actifs conscients

L'organisme peut recevoir une certaine quantité de chaleur de l'extérieur par radiation qui dépend de la surface cutanée exposée. Ainsi, l'être humain va se couvrir ou se mettre à l'ombre afin de limiter la quantité de chaleur apportées par radiation. Une limitation de l'intensité de l'activité physique, l'aménagement de pauses et l'usage de la climatisation sont utilisés, en particulier dans le domaine professionnel, afin de limiter la thermogénèse et

faciliter la thermolyse(Malchaire 2006).

II. Lutte contre la chaleur

Quand la température ambiante est supérieure à la T_C , les mécanismes de rayonnement, de conduction et de convection deviennent des facteurs de gain de chaleur. Le seul moyen pour l'organisme de perdre efficacement de la chaleur est l'évaporation de la sueur. De la même manière, lors d'un exercice intense, même dans des conditions fraîches, les pertes de chaleur par convection et rayonnement sont généralement insuffisantes pour atteindre l'équilibre thermique, et un refroidissement supplémentaire par évaporation de la sueur (E) est nécessaire. L'exigence de refroidissement par évaporation (EREQ) pour maintenir l'équilibre thermique chez un individu est considérée comme une contrainte thermique. L'exigence d'évaporation (EREQ) est déterminée par la somme de la production de chaleur métabolique et les échanges thermiques radiatifs et convectifs.

$$EREQ = H \pm R \pm C$$

H représente la production de chaleur interne du corps en $W \cdot m^2$.

Ainsi, le refroidissement par évaporation peut être obtenu si: (1) la production de sueur est suffisante et (2) si l'environnement permet une évaporation suffisante (voir III. Difficultés de dissipation de la chaleur). Au repos toute l'énergie consacrée au métabolisme (M) est transformée en chaleur donc $H = M$, à l'exercice une partie de l'énergie liée à l'activité physique est transformée en travail mécanique (W), donc $H = M - W$.

L'équation de l'équilibre thermique est la suivante :

$$K + C + R + E - H = 0$$

La production de chaleur interne du corps est compensée par les échanges de chaleur au niveau de la peau par conduction (K), convection (C), radiation (R) et évaporation (E). Les

échanges de chaleur, par convention, sont positifs lorsqu'ils apportent de la chaleur, et négatifs lorsqu'ils permettent une perte de chaleur. Ainsi, le stockage de chaleur correspond à l'équation suivante :

$$\textit{gain de chaleur} + \textit{perte de chaleur} + \textit{production de chaleur} = \textit{stockage de chaleur}$$

$$K \pm C \pm R - E \pm M - W = S$$

S = quantité de chaleur stockée dans le corps, en $W \cdot m^2$

M = quantité de chaleur par production de chaleur métabolique, en $W \cdot m^2$

W = quantité de chaleur produite par le travail mécanique, en $W \cdot m^2$.

III. Difficultés de dissipation de la chaleur

La capacité d'évaporation de l'environnement (E_{max}) est la deuxième composante du stress thermique où E_{max} doit être au moins aussi grande que EREQ. Le refroidissement par évaporation se produit à la suite de la vaporisation de l'eau à la surface de la peau et le transfert de vapeur d'eau à l'environnement dans un processus physique semblable au transfert de chaleur par convection. L'évaporation de la sueur entraîne une perte thermique de $2,45 \text{ kJ} \cdot \text{g}^{-1}$ est le moyen le plus efficace de thermolyse. Le gradient de pression de vapeur d'eau entre la surface de la peau et l'air ambiant va déterminer le potentiel d'évaporation de la sueur. Ainsi, ce gradient devient plus important à mesure que l'air ambiant devient chaud et sec et une plus grande quantité de sueur sera évaporée. Inversement, dans des conditions où l'humidité de l'air augmente, ce gradient va diminuer et rendre les capacités d'évaporation de la sueur difficile (figure 1). Au cours de la transpiration, la pression de vapeur à surface de la peau est supposée être la pression saturée à la température de la peau. Ainsi, l'air circulant sur la peau (v) et l'humidité absolue vont déterminer les capacités d'évaporation de la sueur.

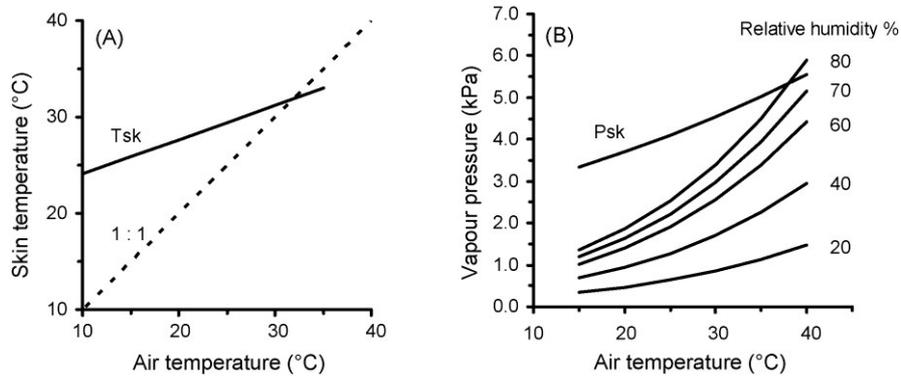


Figure 1. Température de la peau en fonction de la température ambiante à droite. Relations entre la température de l'air, l'humidité relative et la pression de vapeur d'eau (Psk) à gauche. Psk indique la pression de vapeur à la surface de la peau à la température cutanée. Le gradient de pression de vapeur entre la surface de la peau et l'air ambiant détermine le potentiel de l'évaporation de la sueur. Plus le gradient est grand, plus la sueur est évaporée. En conditions chaudes et humides, plus la pression de vapeur ambiante est élevée et plus le gradient est faible (D'après Brotherhood 2008).

IV. Débit sudoral et thermolyse

Le débit sudoral influence l'évaporation sudorale et donc la thermolyse évaporatoire. Il dépend de plusieurs facteurs, notamment le sexe du sujet, le niveau d'entraînement et l'acclimatation/acclimatation à la chaleur de l'athlète. Chez un individu entraîné et acclimaté à la chaleur, le seuil de débit de sueur est plus bas et le débit sudoral plus important. On note des débits sudoraux différents entre les athlètes de sexe et de niveau de condition physique différents, pouvant aller jusqu'à $3,7 \text{ L}\cdot\text{h}^{-1}$ avec en moyenne des débits de $1 \text{ L}\cdot\text{h}^{-1}$ pour des efforts longs et de faible intensité (Ichinose-Kuwahara et coll. 2010). Chez la femme, le débit sudoral est moindre, en raison d'un moins grand nombre de glandes sudoripares (Ichinose et coll. 2009). Le seuil de déclenchement de la sudation s'abaisse également avec le niveau d'entraînement/acclimatation chez l'athlète féminine (Buono & Sjöholm 1988). Le débit sanguin cutané et le taux de sudation chez la femme, lors d'une exposition de 40 minutes à la chaleur sèche, sont plus élevés dans la phase lutéale que dans la phase folliculaire (Lee et coll. 2014). Le débit sanguin cutané et la transpiration étant contrôlés par le système nerveux sympathique, les auteurs concluent que l'activité sympathique est accrue lors de l'exposition du corps à la chaleur dans la phase lutéale pendant un cycle menstruel régulier. Lorsqu'elles réalisent un exercice aérobic en environnement chaud et humide, les femmes ont également un taux de sudation plus important pendant la phase lutéale (Garcia et coll. 2006).

V. L'hydroméiosis

Lorsque la peau est mouillée par un important débit sudoral, une couche superficielle de sueur va se positionner à la surface de la peau. Ce phénomène est associé à une réduction progressive de la sécrétion de sueur qui est appelée hydroméiosis (Brebner & Kerslake 1969). Avec l'acclimatation à la chaleur humide, le phénomène de réduction du taux de sueur a été décrit comme étant le résultat de l'augmentation du ruissellement de la sueur sur la peau avant

que l'hydromeiosis n'apparaisse (Candas et coll. 1983). Plutôt qu'une défaillance, ce mécanisme serait donc un moyen pour l'organisme de se prémunir contre la déshydratation dans un environnement incompensable. Avec la transpiration, la peau est hydratée et gonfle au niveau de ses couches superficielles, provoquant le mécanisme d'hydroméiosis. Il a pour effet une baisse de la sécrétion de la sueur. Celui-ci est accru chez les sujets acclimatés à la chaleur humide (Candas et coll. 1980).

Chapitre II - Hyperthermie

Section I - Hyperthermie et exercice à la chaleur

L'hyperthermie correspond à une élévation de la température corporelle par saturation des mécanismes de déperdition de chaleur. L'hyperthermie peut survenir en cas de défaut de thermolyse (degré d'humidité de l'air élevé empêchant l'évaporation sudorale, ventilation faible ou inexistante, port de vêtements non respirants, qui ne permettent pas l'évaporation de la sueur)(Cheung & McLellan 1998). L'augmentation de la thermogenèse endogène (intensité de l'exercice accrue, excès alimentaires en protéines et/ou en lipides, excès d'alcool, influence d'hormones thermogènes ou de substances toxiques) et exogène (exposition solaire, chaleur radiante) peut également être responsable d'une augmentation de la T_C , conduisant à l'hyperthermie. Un dérèglement du système de thermorégulation peut alors être observé chez les personnes malades ou très âgées. Un défaut d'acclimatation peut être à l'origine de la survenue d'une hyperthermie (Nielsen 1994).

I. Contrainte thermique environnementale

La production de chaleur métabolique ainsi que l'environnement thermique provoquent des effets physiologiques distincts et indépendants (Brotherhood 2008). En effet, la T_C est largement influencée par la production de chaleur métabolique, alors que T_{cut} est largement influencée par l'environnement thermique (Adams 1977). Ces deux contraintes combinées vont déterminer le taux de transpiration adapté aux contraintes de

l'environnement. Nous avons vu que le contrôle de la T_C dépend de la production de sueur par le sujet et de la capacité de l'environnement à pouvoir évaporer cette sueur. La nature du stress thermique à l'exercice peut être évaluée par l'analyse des échanges de chaleur physiques entre le corps et l'environnement (Brotherhood 2008). Elle permet d'élaborer des recommandations par rapport à la contrainte thermique au travail ou durant des événements sportifs et de s'assurer que les contraintes environnementales ne mettent pas en danger l'intégrité physique des travailleurs ou des athlètes. Plusieurs indices de stress thermique sont utilisés pour évaluer le niveau de rayonnement ou d'intensité d'exercice et prévenir les accidents notamment dans le domaine militaire pendant les entraînements (Budd 2008).

II. Indices de contraintes ou d'astreinte thermique :

Les indices de contraintes sont définis par rapport aux paramètres liés à l'environnement alors que les indices d'astreintes intègrent l'impact sur l'organisme des différentes contraintes.

Calcul des différents indices de stress thermique

1. Indices analytiques calculés sur le bilan thermique :

Heat Stress Index (HSI)

L'indice de contrainte thermique (HSI) exprimé en pourcentage correspond au rapport entre l'évaporation requise pour maintenir l'équilibre thermique (E_{req}) et l'évaporation maximale permise par l'environnement (E_{max}) :

$$HSI = (E_{req} / E_{max}) * 100$$

Si HSI est inférieur à 100%, alors la T_C peut être régulée et l'exercice réalisé en sécurité. Lorsque HSI est supérieur à 100%, la chaleur est stockée dans l'organisme et la sudation continue sans que le refroidissement par évaporation soit efficace. La contrainte thermique ne

peut être supportée indéfiniment et à terme, elle peut aboutir à une défaillance dans la régulation des mécanismes de thermorégulation.

Index of Thermal Stress (ITS)

Cet indice est une amélioration de l'HSI, dans la mesure où la sueur ne s'évapore pas dans sa totalité. C'est une échelle de prescription allant de 0 à 100, qui indique l'importance de la contrainte thermique et donne des indications en terme de limite temps d'exposition à cet environnement.

La sudation requise (SW_{req}) ISO 7933

Sur la base du HSI et du ITS, un nouvel indice, appelé le débit sudoral requis (SW_{req}) calcule la sudation requise en $g \cdot h^{-1}$ pour réaliser l'équilibre thermique. Il préconise également des temps d'exposition en fonction de la contrainte thermique en ambiance chaude.

2. Indices empiriques :

Température effective (TE)

L'indice de température effective permettait à l'origine d'évaluer les effets de la température et de l'humidité de l'air sur le confort thermique. Un abaque permet de déterminer la TE à partir de la température de l'air, de la température humide et de la vitesse de l'air. Cependant, cet indice sous-estime l'humidité pour des températures élevées. C'est la raison pour laquelle, Bedford en 1936 a proposé la température effective corrigée (TECR), en remplaçant la température de l'air par la température de globe noir et en prenant en compte les valeurs de rayonnement. Ceci étant, cet indice soulève quelques difficultés dans la pratique car il est souvent difficile d'évaluer la vitesse de l'air. Ces deux indices ne sont plus utilisés aujourd'hui mais ils ont conduit à l'élaboration de l'indice de débit sudoral prévu sur quatre heures (P4SR).

Indice P4SR

L'indice du débit sudoral prévu sur quatre heures mesure la quantité de sueur sécrétée par l'organisme pendant quatre heures dans une tenue militaire. Il est surtout utilisé en tant qu'indice de stockage de chaleur.

3. Indices globaux

WetBulb Globe Temperature

L'indice de température humide et de globe noir (WBGT) a été établi d'après la TECR pour limiter les accidents causés par la chaleur durant l'entraînement des soldats de la marine américaine. Cet indice tient compte des radiations absorbées par l'uniforme du soldat. La mesure de l'indice WBGT est réalisée avec des instruments soumis au taux d'humidité de l'air et aux radiations, avec les coefficients suivants:

$$***WBGT = 0,7 Th + 0,2 Tr + 0,1 Ta.***$$

Th: température humide mesurée par un thermomètre recouvert d'un morceau de tissu humidifié, placé à l'air libre et soumis aux radiations
Tr : température radiante mesurée par un globe opaque noir d'un diamètre de 15 cm placé au soleil.
Ta : température sèche mesurée par un thermomètre à l'abri des radiations

III. Programmation de compétitions sportives en milieu extérieur

Comme cités précédemment, les indices qui permettent la mesure de la contrainte thermique sont nombreux mais le plus utilisé et, notamment dans la littérature anglo-saxonne, est le WBGT. Des organisations sportives comme l'American College of Sports Medicine (ACSM) recommandent l'utilisation du WBGT afin de fixer des limites de contraintes environnementales à la programmation de compétitions en environnement chaud. Ainsi, pour être valide, la mesure de WBGT doit prendre en compte la température sèche et radiante, ainsi

que l'humidité de l'air pour évaluer l'impact de l'environnement sur l'organisme. Toutefois, le calcul d'un index thermique seul qui permettrait de valider ou pas, le déroulement d'une compétition sportive a été récemment critiqué (Budd 2008). En effet, chaque « index de stress thermique » a été élaboré pour une situation particulière et dans un environnement précis. Pour mesurer l'impact du climat sur l'intégrité physique des athlètes, il est nécessaire de prendre en compte leur production métabolique, c'est-à-dire de l'intensité de l'exercice sur les différentes épreuves de compétitions sportives. Effectivement, certains auteurs ont montré que pour déterminer le stress thermique induit par l'exercice, c'est le taux de production de chaleur métabolique qui est le plus pertinent à prendre en compte et ceci, quelles que soient les conditions environnementales (Brotherhood 2008). L'indice WBGT fonctionne bien lorsqu'il est utilisé dans les populations et les circonstances définies telles que le corps des Marines pour lequel il a été développé. En revanche, il sous-estime la contrainte imposée par un fort taux d'humidité de l'air et une moindre vitesse de l'air qui tous deux limitent la perte de chaleur par évaporation (Budd 2008). Il faut par conséquent prendre en compte des facteurs comme l'intensité de l'exercice, ou encore l'habillement des athlètes, en plus des 4 éléments qui définissent classiquement le stress thermique (température sèche, humidité relative, radiations, vitesse de l'air) afin d'en apporter une mesure plus précise (Kerlake 1972). Récemment, certains auteurs ont développé un nouvel index de la contrainte thermique, nommé "Universal Thermal Climate Index" (UTCI), qui pourrait s'appliquer aux différentes pratiques sportives et aux ambiances thermiques. Ce nouvel index prend également en compte le type de vêtements portés par le sportif ainsi que les sensations thermiques de ce dernier (Fiala et coll. 2012).

Section II - Le coup de chaleur d'exercice

Parmi les accidents relatés dans la littérature, il semble que le coup de chaleur d'exercice (CCE) soit l'incident le plus fréquent (Nichols 2014). Le CCE est associé à une hyperthermie majeure et brutale ainsi qu'à des troubles neurologiques graves (hallucinations, délire, convulsions, coma). Il peut survenir lors d'un exercice physique générant une production de chaleur endogène supérieure aux capacités de dissipation de l'organisme. Différents facteurs peuvent exacerber la contrainte thermique de l'environnement comme la faible vitesse de l'air, le port de vêtements couvrants, ainsi que les équipements militaires ou sportifs (Armstrong et coll. 2007). En général, la perception de la fatigue par le sujet établirait un signal d'arrêt permettant d'éviter le coup de chaleur. Mais lorsque la compétition se déroule sous une forte contrainte thermique et qu'elle revêt un caractère de grande importance pour le sujet, la motivation de l'athlète semble avoir un fort impact sur la survenue d'accidents tels que les CCE. En effet, en milieu militaire par exemple, la plupart des CCE survient à l'occasion d'une épreuve physique ayant valeur de test ou lors d'un passage de grade. Dans le milieu sportif, les CCE s'observent souvent quand l'athlète mise énormément sur ses chances de réussite lors d'une compétition qui s'apparente à un véritable challenge (Howe & Boden 2007). Des éléments récents suggèrent que les conditions de l'accident sont susceptibles de perturber le jugement des sujets. En effet, il a été montré que l'épuisement perçu par les sujets effectuant un exercice hyperthermiant était étroitement corrélé aux variations du rapport des activités électro-encéphalographiques lentes/rapides (a/b, qui est un index de vigilance), ce qui n'est pas le cas pour une même intensité d'exercice et lorsque les conditions environnementales n'induisent pas d'hyperthermie (Nybo & Secher 2004; Nybo & Nielsen 2001c). Ainsi, une TC de 40°C est souvent fixée comme limite d'expérimentation pour des raisons déontologiques (Ely et coll. 2009). En effet, au-dessus de cette limite, l'activité des neurones ralentit et les protéines commencent à se dénaturer. À 41°C, les adultes sont pris de convulsions pouvant entraîner un coup de chaleur, puis la mort

(entre 43 et 44°C) par dérèglement de la thermorégulation(Bouchama & Knochel 2002). Lorsque l'hyperthermie est moins sévère, des lésions microvasculaires au niveau du cerveau peuvent également conduire à la mort du sujet même suite à une prise en charge visant à ramener la TC à des niveaux physiologiques acceptables.

Chapitre III - L'équilibre hydrique

On définit l'équilibre hydrique du corps, comme la différence entre la somme de la consommation d'eau et de la production d'eau endogène, moins l'ensemble des pertes hydriques. La masse hydrique peut rester constante à condition de pratiquer une activité d'intensité modérée et à des températures ambiantes tempérées. L'organisme perd de l'eau par la sueur, les urines et les selles ainsi que par les pertes insensibles (peau et poumons). Pour satisfaire l'équilibre hydrique, ces pertes doivent être contrebalancées par des apports extérieurs en fluide ou en nourriture.

Section I - Répartition de l'eau dans le corps humain

I. Masse hydrique du corps

Environ 60% du poids du corps chez l'homme est constitué d'eau. Chez la femme la masse hydrique du corps varie entre 50 et 55%. Cette valeur est en fait variable d'un sujet à l'autre et dépend principalement de la nature des tissus. Le tissu maigre comporte beaucoup plus d'eau (70%) que le tissu adipeux (10%). La masse maigre va donc conditionner la masse hydrique du corps. Un sujet avec un pourcentage de masse maigre important verra sa masse hydrique augmenter et inversement. Les athlètes de manière générale, en ayant une masse musculaire plus importante ont une masse hydrique plus élevée (Malina 2007).

II. Absorption de l'eau et répartition dans le corps

L'eau est présente dans tous les organes du corps, à l'intérieur des cellules, dans les compartiments intracellulaires et entre les cellules, c'est-à-dire dans le liquide interstitiel.

On distingue :

- le compartiment intracellulaire représente environ les deux tiers de la masse hydrique et le compartiment extracellulaire, qui contient le liquide plasmatique, un tiers de la masse hydrique (Armstrong et coll. 2006).
- le liquide interstitiel

Après ingestion, l'eau est absorbée dans le tractus gastro-intestinal. Après avoir quitté l'estomac, l'eau est absorbée principalement dans les premiers segments de l'intestin grêle, du duodénum et du jéjunum. Elle pénètre ensuite dans le système vasculaire, va dans les espaces interstitiels et est véhiculée jusqu'à chaque cellule. On la retrouve dans le sang seulement 5 minutes après ingestion (Péronnet et coll. 2012).

L'eau se déplace librement dans le compartiment interstitiel et à travers les membranes cellulaires via des voies spécifiques à l'eau, les aquaporines. Les échanges liquidiens entre les compartiments sont régulés par la pression osmotique et hydrostatique, et l'eau circule au gré des changements d'osmolalité du liquide extracellulaire (Marieb & Hoehn 2013). Le renouvellement de l'eau du corps est entretenu par l'eau ingérée qui compense les pertes constantes auxquelles celui-ci doit faire face. Cela permet au corps de maintenir son équilibre hydrique.

III. Régulation du volume cellulaire

Les membranes des cellules chez l'être humain ont la propriété d'être flexibles. En d'autres termes, leur volume est susceptible de varier en fonction de l'osmolalité du liquide extracellulaire. Ainsi, lorsqu'elle rencontre un milieu extracellulaire hypotonique, la cellule

gagne de l'eau par osmose et gonfle (on dit qu'elle est turgescente). À l'inverse, lorsqu'elle est dans un milieu hypertonique, la cellule va perdre de l'eau et va rétrécir, la membrane va se résorber (plasmolyse). Lorsqu'une cellule est turgescente, ce phénomène s'accompagne d'une sortie de particules osmotiquement actives et d'une sortie d'eau, ce qui permet à la cellule de retrouver son volume initial (Meyer 1983).

Section II - Pertes en liquides corporels

L'urine et la sueur sont les principales sources de pertes d'eau pour le corps. Ces pertes varient selon la plus ou moins grande consommation de liquides, l'alimentation, le niveau d'activité physique et la température ambiante.

I. Pertes insensibles en eau

Les pertes insensibles en eau sont les pertes en eau liées à l'évaporation cutanée et à la respiration, elles représentent 500 mL/jour chez l'adulte (Lamke et coll. 1977). Ce taux est variable en fonction de la température ambiante, la tenue vestimentaire, le taux d'humidité et la vitesse de l'air. Les pertes liées à la respiration via l'évaporation pulmonaire sont évaluées à 250 à 300 mL/jour chez les personnes sédentaires et peuvent augmenter avec l'élévation de la T_C jusqu'à 500 à 600 mL/jour (Reithner 1981). Au repos, ces pertes respiratoires sont équivalentes à la production d'eau métabolique liée à l'oxydation des nutriments (Nolte et coll. 2011).

II. Pertes en eau urinaire

Les pertes urinaires sont régulées par la fonction rénale qui vise la régulation des volumes de liquides du corps et l'élimination des déchets provenant de l'alimentation et du

métabolisme. La concentration urinaire peut varier de 250 mOsm·kg⁻¹ à 800 mOsm·kg⁻¹ (Perucca et coll. 2007). Au-delà de cette valeur maximale de la concentration urinaire, la fonction rénale va assurer l'excrétion des solutés en définissant un volume minimum adéquate (i.e., le volume d'urine obligatoire minimum destiné à l'excrétion des déchets) parfois aux dépens de la régulation des volumes de liquides corporels.

III. Pertes en eau fécale

Les pertes en eau fécales sont évaluées à environ 100 à 200 mL/jour en moyenne chez les sujets sains et peuvent s'intensifier en cas de diarrhée (Raman et coll. 2004).

IV. Production de sueur

Les glandes sudoripares situées dans le derme produisent la sueur issue de l'eau interstitielle. La sueur se compose pour 99% d'eau, 0,5 % de minéraux (potassium et chlorure de sodium) et 0,5 % d'urée et d'acide lactique (Montain et coll. 2007). La sueur est le principal mécanisme de thermolyse chez le sujet actif et la thermorégulation repose en grande partie sur le mécanisme de l'évaporation de la sueur (Gleeson 1998). Lors d'un exercice physique pratiqué à une température ambiante de 30 °C, 580 kcal peuvent être évacués par l'évaporation d'un litre de sueur (Nadel 1979). Le taux de sudation varie d'un sujet à l'autre, selon l'activité, le sexe, le niveau d'entraînement, le degré d'acclimatation à la chaleur ou l'habillement (Holmes et coll. 2011; Havenith et coll. 2008). Des facteurs environnementaux peuvent aussi influencer le taux de sudation, comme l'humidité relative, la température ambiante, le rayonnement et la vitesse de l'air (Brebner & Kerslake 1969; Saunders et coll. 2005).

La production de sueur varie en fonction de l'activité du sujet et s'accroît considérablement avec l'activité physique intense. Des auteurs ont rapportés des taux de sueur moyens de 1,5 L·h⁻¹ lors d'une épreuve de course à pied de 12 km en environnement chaud et

sec (Casa et coll. 2010) ou de 21 km, chaud et humide (Byrne et coll. 2006) et pouvant atteindre $2,6 \text{ L}\cdot\text{h}^{-1}$ dans certaines conditions (Sawka et coll. 2011). Aussi, lors d'un exercice prolongé à la chaleur la compensation des pertes sudorales doit être adaptée en fonction de l'activité et de l'intensité pour éviter un important déséquilibre de la balance hydrique qui pourrait impacter négativement la performance aérobie (Armstrong 2007, Cheuvront, 2009).

Section III - Equilibre hydrique

L'équilibre hydrique n'est pas uniquement régulé par le mécanisme de la soif, puisque la consommation de liquides intervient aussi par l'ingestion d'aliments. Mais la principale source d'apports en eau du corps reste les boissons. L'équilibre hydrique repose sur la régulation de l'excrétion de liquides par les reins, ainsi que des déchets métaboliques, avec une concentration urinaire plus ou moins importante en fonction du niveau d'hydratation de l'organisme. Les reins jouent un rôle de régulateur afin de maintenir une concentration et une composition stable des liquides extracellulaires et plus particulièrement de l'osmolalité plasmatique, à une valeur comprise entre 280 et $290 \text{ mOsm}\cdot\text{kg}^{-1}$. Au-delà de cette norme, l'hypothalamus va sécréter l'hormone antidiurétique (ADH), en réponse à l'augmentation de la concentration en sodium plasmatique. L'ADH est ensuite transportée par voie sanguine au niveau des reins et augmente la perméabilité des tubules distaux ce qui permet à l'organisme de réabsorber un important volume d'eau. Ce mécanisme permet l'excrétion d'une urine concentrée tout en permettant l'évacuation de déchets métaboliques. Inversement, lorsque l'osmolalité plasmatique diminue, il s'opère une diminution de la sécrétion de l'ADH, visant à corriger la concentration des liquides extracellulaires. La perméabilité à l'eau des néphrons va augmenter impliquant une moindre réabsorption de l'eau, et par conséquent, une plus grande quantité d'urine diluée va être excrétée (Thornton 2010). L'augmentation de l'osmolalité plasmatique est également en partie responsable du déclenchement du stimulus de la soif,

détectée par des osmorécepteurs qui vont animer des mécanismes au niveau du système nerveux central (Toto 1994).

Section IV - Altération de l'équilibre hydrique

L'équilibre hydrique dépend des entrées de liquides régulées par la soif et nos habitudes culturelles, l'alimentation, la régulation rénale, ainsi que des différentes pertes en eau, notamment par la sueur. Malgré le processus de régulation, l'équilibre hydrique peut être temporairement menacé et conduire à une hypohydratation ou une hyperhydratation. En fonction des pertes en eau et en solutés du liquide extracellulaire, on parle de déshydratation hypotonique (dilution importante de l'eau liée à la perte en sodium), hypertonique (concentration du liquide extracellulaire liée à la perte d'eau) et isotonique (pas de changement de concentration suite à une perte en eau et en sodium). Inversement, la consommation excessive d'eau en un temps assez court peut entraîner une hyperhydratation ou hyponatrémie correspondant à des taux de sodium sérique inférieurs à $135\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$. Des cas d'hyponatrémie ont été rapportés dans la littérature, notamment sur des épreuves de longue distance type marathon ou ultra-trail (Hew-Butler et coll. 2005). Ils sont provoqués par une consommation de liquides qui dépassent les pertes en eau du corps, le plus souvent chez des athlètes d'endurance qui évoluent à une faible intensité d'exercice, autrement dit chez les plus lents (Speedy et coll. 2001).

Chapitre IV - Thermorégulation, exercice physique et climat chaud, fatigue musculaire

Section I - Adaptations circulatoires

L'exercice musculaire en climat chaud sollicite de façon importante la thermorégulation puisqu'à la charge interne produite à l'exercice s'ajoute celle de l'environnement, ce qui induit une contrainte supplémentaire sur le système circulatoire. Celui-ci est composé (1) d'une "petite circulation" : la circulation pulmonaire qui a pour rôle d'oxygéner le sang provenant des veines pulmonaires vers le cœur et de conduire le sang chargé en dioxyde de carbone vers les alvéoles, via les artères pulmonaires, (2) d'une "grande circulation" : la circulation systémique chargée de l'oxygénation de tous les tissus des organes, à l'exception des poumons. A l'exercice, l'oxygénation du sang est donc réalisée par la circulation pulmonaire, tandis que l'apport en nutriments et oxygène aux muscles et le refroidissement lié à la thermorégulation s'effectue par la circulation systémique.

On définit le débit cardiaque comme étant la quantité de sang envoyé par le cœur dans le système circulatoire par unité de temps, en litres par minute ($L \cdot \text{min}^{-1}$). Il est le produit de la fréquence cardiaque (FC) en battements par minutes (bpm) et du volume d'éjection systolique (VES). Ainsi, le débit cardiaque se définit par la relation suivante :

$$Q_s = FC * VES$$

D'une part, le VES est diminué lors d'un exercice en climat chaud (Rowell et coll. 1966). En effet, la circulation sanguine, en plus de sa fonction d'irrigation des différents tissus de l'organisme, de transport des nutriments et d'oxygène aux cellules musculaires, constitue un moyen d'évacuer la chaleur produite à l'exercice par production de sueur et par vasodilatation

(Charkoudian 2010b). Alors que la production de sueur augmente afin de perdre de la chaleur en vue de refroidir l'organisme, la vasodilatation cutanée augmente le flux sanguin cutané pour perdre de la chaleur par convection, rayonnement et évaporation (Charkoudian 2010a). Le sang distribué au niveau cutané pour évacuer la chaleur ne peut apporter aux muscles actifs l'oxygène et les substrats nécessaires au travail musculaire. A l'exercice physique prolongé et pour un niveau d'intensité élevé, on observe une nette augmentation du débit sanguin au niveau des muscles actifs en raison de la demande métabolique (Tatterson et coll. 2000) et au niveau de la peau, un débit sanguin cutané pouvant être multiplié par 25 à 30 fois, de façon à pouvoir évacuer la chaleur (Gonzalez-Alonso et coll. 2008). L'augmentation du volume sanguin cutané a pour conséquence la réduction du retour veineux central. Afin de compenser cette augmentation des débits sanguins musculaire et cutané, et lorsque l'intensité de l'exercice le permet (intensité sous-maximale à modérée), le débit cardiaque augmente et le débit sanguin dans les territoires splanchniques est réduit (Gisolfi & Wenger 1984). D'autre part, un débit sudoral élevé, peut créer un désavantage physiologique lors d'un exercice prolongé en climat chaud en provoquant la déshydratation du sujet lorsque les pertes sudorales ne sont pas remplacées (Shapiro et coll. 1980). Cette perte de liquide sans compensation adéquate réduit le volume d'eau corporelle totale, et peut par conséquent, affecter le volume sanguin et par là-même, le VES. Lorsque l'organisme rencontre un état d'hypohydratation, il y a une augmentation supplémentaire de la FC afin de compenser la réduction du VES. En effet, le débit cardiaque, qui est fonction du VES et de la fréquence cardiaque, doit au moins rester constant lors d'un exercice rectangulaire, afin d'assurer ses fonctions d'apport en oxygène aux muscles et d'évacuation de la chaleur au niveau de la peau. Par conséquent, l'augmentation du volume sanguin vers les muscles et la peau et l'éventuelle réduction du VES, liée à la déshydratation, doivent être compensées par une augmentation de la FC. Les principales adaptations circulatoires en climat chaud sont de trois ordres : une augmentation de la FC, une augmentation du débit cardiaque et une diminution du VES (Gonzalez-Alonso et coll. 2008). Lors d'un exercice réalisé à une intensité sous-maximale, cet

ajustement du débit sanguin par augmentation de la FC n'est pas un facteur limitant. Il peut le devenir à des intensités d'exercice élevées, lorsque l'athlète ne dispose plus de réserve cardiaque, autrement dit, quand il ne peut plus augmenter sa FC pour compenser le volume sanguin détourné des muscles actifs vers les territoires cutanés.

Section II - Sudation et déshydratation

La survie dépend du bon équilibre hydroélectrolytique de l'athlète (Barr 1999; Gonzalez-Alonso et coll. 1998). Cet équilibre est perturbé lors de l'exercice, du fait de la redistribution compartimentale de l'eau et des électrolytes, mais aussi des pertes cutanées inhérentes à la sudation. Le terme « euhydratation » désigne la teneur normale en eau corporelle, alors que le terme « hypohydratation » fait référence au déficit en eau corporelle. Le terme plus commun « déshydratation » dénote une dynamique de perte en eau ou encore, le passage de l'état d'euhydratation à celui d'hypohydratation (Sawka & Greenleaf 1992).

La sudation réduit la teneur en eau de l'organisme si une quantité adéquate de liquide n'est pas ingérée afin de remplacer l'eau perdue. En climat chaud, une grande quantité de sueur est perdue par la sécrétion des glandes eccrines afin d'assurer le refroidissement par évaporation de l'organisme. Quoique des débits sudoraux d' $1 \text{ L}\cdot\text{h}^{-1}$ soient communs (Sawka & Montain 2000), des débits très élevés (de l'ordre de $3,7 \text{ L}\cdot\text{h}^{-1}$) ont été rapportés dans la littérature, notamment lors de marathons (Noakes 2003).

Selon certains auteurs, une déshydratation suffisante pour réduire le débit sanguin cutané peut être responsable de l'altération de la performance (Kenefick et coll. 2007). Ainsi, une perte hydrique équivalente ou supérieure à 2% de la masse totale de l'athlète serait à l'origine d'une baisse de performance à l'exercice prolongé en climat neutre ou chaud (Kenefick et coll. 2010). Dans une expérimentation dont le but était d'examiner les effets du remplacement des pertes liquidiennes sur les variables de la thermorégulation et de la

performance en cyclisme dans des conditions chaudes et humides, six cyclistes masculins ont exécuté six courses contre la montre (CLM) de 80 km (Dugas et coll. 2009). Plusieurs modalités d'hydratation ont été testées : les sujets ont (1) rincé leur bouche à chaque 10 km, les sujets ont remplacé (2) 0 %, (3) 33 %, (4) 66 %, (5) 100 % du poids perdu ou les sujets ont (6) bu "ad libitum". Des taux d'ingestion de fluide plus importants qu'"ad libitum" n'ont pas montré une amélioration de la performance, alors que des taux moins importants ont impacté négativement la performance. La conclusion de l'étude est que l'ingestion de liquide "ad libitum" est optimale. Par ailleurs, lorsque l'athlète est autorisé à boire « ad libitum » comme c'est le cas en compétition, et que des volumes de fluides sont disponibles en quantité suffisante sur le parcours, on ne connaît pas de cas de déshydratation telle que celle-ci soit à l'origine d'une réduction du volume sanguin. Selon ces auteurs, le design des études de laboratoire ne correspond pas à la réalité de terrain et l'hypohydratation existe lorsque les sujets ne sont pas autorisés à boire ou lorsqu'ils sont déshydratés par un traitement diurétique avant l'expérimentation, ce qui n'est jamais le cas dans le champ de la compétition n'imposant pas de jauge de poids. Toutefois, en condition écologique, lors d'un effort prolongé à la chaleur, certains athlètes acclimatés peuvent présenter des statuts de déshydratation pendant l'exercice. C'est le cas, notamment dans des conditions qui limitent ou empêchent la thermolyse, soit parce que l'humidité relative est très importante, soit parce que les athlètes ou les professionnels portent une tenue couvrante, non respirante, qui ne permet pas à la sueur de s'évaporer (football américain ou pompiers par exemple)(Kalyani & Jamshidi 2009). Leur production de sueur, bien que pouvant être élevée, s'avère inefficace d'un point de vue de l'évacuation de la chaleur, ce qui induit une déshydratation plus rapide que chez les sujets non acclimatés (Sawka & Montain 2000). Enfin, il a été montré que des sujets acclimatés perçoivent de manière plus tardive les effets de l'hyperthermie sur leur organisme (Tikuisis et coll. 2002). Quelles sont les raisons qui permettent à l'athlète de mieux supporter la chaleur? Est-ce son niveau d'entraînement qui lui permet notamment de s'adapter à une T_C plus élevée? Ou ses spécificités anthropométriques qui limiteraient une production de chaleur

métabolique, ou encore une meilleure capacité mentale à supporter un stockage de chaleur plus important?

Nous allons passer en revue les différents facteurs qui sont susceptibles d'influencer le stockage de chaleur à l'exercice prolongé en climat chaud et sec et par conséquent, altérer la performance à l'exercice prolongé dans ces conditions. Nous classerons ces différents paramètres en deux catégories. Tout d'abord, les facteurs permettant une moindre production de chaleur métabolique et les facteurs qui vont influencer la thermolyse.

Section III - Facteurs influençant la thermogénèse

I. Influence de la masse musculaire de l'athlète

Il existe des facteurs aggravant les risques liés à l'accumulation de chaleur, telle qu'une masse de l'athlète plus importante (Dennis & Noakes 1999). La production de chaleur d'un coureur correspond à environ 4kJ/kg/km (Nielsen 1996). En comparaison, la production de chaleur d'un coureur plus léger, quelle que soit sa vitesse, est inférieure à celle d'un coureur plus lourd. En réalité, c'est de la masse musculaire de l'athlète par rapport à sa masse totale que dépend la production de chaleur (Wright et coll. 2002). La production de chaleur à l'exercice augmente proportionnellement avec la masse musculaire à une intensité donnée (Nielsen et coll. 1997). Ainsi, des sujets entraînés, ayant une moindre masse musculaire, sont capables de maintenir un effort plus longtemps à une même intensité relative, par rapport à des sujets aussi entraînés, mais dont la MM est plus importante (Selkirk & McLellan 2001). Cependant, une moindre masse musculaire n'est pour autant pas un avantage absolu, puisque les sujets les plus minces sont moins capables de stocker la chaleur que des sujets plus lourds (Marino et coll. 2004).

Section IV - Facteurs influençant la thermolyse

I. Influence du sexe et de l'âge de l'athlète

Le sexe

Les seuils de transpiration et vasoconstriction sont environ 0,3 à 0,5 °C plus élevés chez les femmes que chez les hommes, même pendant la phase folliculaire correspondant aux dix premiers jours du cycle menstruel (Shapiro et coll. 1980). Les différences sont encore plus marquées au cours de la phase lutéale. Il est généralement admis que les femmes ont une T_C plus élevée, d'environ 0.4 °C pendant la phase lutéale, par rapport à la phase folliculaire du cycle menstruel (Kolka & Stephenson 1997). Cette élévation de la T_C pendant la phase lutéale constitue un désavantage, d'autant plus que les femmes ont une capacité réduite à stocker la chaleur et donc à supporter une augmentation de T_C pendant l'exercice (Wright et coll. 2002). En revanche, les femmes entraînées ont sensiblement les mêmes capacités de thermorégulation. En effet, l'aménorrhée et l'altération des sécrétions hormonales pendant le cycle menstruel permettrait d'expliquer qu'il n'y ait pas d'élévation de la T_C pendant la phase lutéale chez la femme entraînée, et que les seuils de sudation et vasoconstriction soient similaires aux hommes (Ichinose-Kuwahara et coll. 2010).

D'un point de vue quantitatif, on considère souvent les capacités de thermorégulation des femmes comme étant limitées en climat chaud par rapport aux hommes, en raison d'un taux de sudation moins important (Frye & Kamon 1981). En revanche, d'un point de vue qualitatif, leur rapport surface/masse leur confère un avantage d'un point de vue de la thermolyse, quand l'évaporation de la sueur est rendue possible par les conditions environnementales (Wright et coll. 2002).

L'âge

Dans des conditions d'environnement chaud et sec, les réponses thermorégulatrices de l'enfant

sont similaires à celles de l'adulte, même si les mécanismes utilisés sont différents. Les enfants perdent de la chaleur principalement par radiation et convection, contrairement aux adultes qui utilisent l'évaporation comme principal moyen de thermolyse. En revanche, en milieu chaud et humide, le stockage de chaleur par unité de masse corporelle est plus élevé chez l'enfant par rapport à l'adulte(Sinclair et al. 2007). Toutefois, ces résultats ont été mesurés soit au repos ou dans des conditions de marche ou de course à pied. Lorsque les protocoles sont réalisés sur ergocycle, les enfants ne présentent pas de différence de température centrale ou de stockage de chaleur par rapport aux adultes. Cette divergence de résultat peut s'expliquer par un coup métabolique lors de la marche et la course à pied qui est plus élevé chez l'enfant que chez l'adulte et que le ne le ne retrouve pas en cyclisme(Inoue et coll. 2004). En conclusion, dans des ambiances neutres ou chaudes et sèches, les capacités de thermorégulation de l'enfant sont équivalentes, mais les stratégies utilisées différentes. En revanche, dans des conditions chaudes et humides, les possibilités d'évacuer la chaleur par évaporation sont limitées par un taux de sudation moindre chez l'enfant(De Paula Viveiros et coll. 2012).

II. Influence de la nature de l'activité

De la même manière que la production de chaleur métabolique est proportionnelle à la masse musculaire, la nature de l'activité va être responsable d'une plus ou moins grande production de chaleur endogène. Plus exactement, la part des groupes musculaires qui participent principalement au travail dans une activité spécifique est responsable de la chaleur métabolique produite à l'exercice. Ainsi, le kayakiste atteint une puissance maximale à VO_2max qui sera moindre par rapport à celle d'un cycliste comme l'indique le tableau 1. En effet, le kayakiste utilise principalement les groupes musculaires supérieurs de plus faible section que les groupes musculaires inférieurs. Il a été montré sur une épreuve maximale réalisée sur un ergocycle, qu'il produit 57% de la PMA d'un cycliste. La chaleur métabolique

qui en résulte est par conséquent plus faible (Billat et coll. 1996).

Sport	Authors	VO ₂ max (absolute) (L·min ⁻¹)	VO ₂ max (relative) (ml·kg ⁻¹ ·min ⁻¹)	Power and Velocity at VO ₂ max *
Kayaking	Tesch, 1983	4.7	58.8	
	Hahn et al., 1988	4.62	58.5	
	Fry and Morton, 1991	4.78	58.9	
	Billat et al., 1996	4.01	53.8	239 W
Canoeing	Hahn et al., 1988	3.49	44.2	
	Bunc and Heller, 1991	4.17	51.9	
Rowing (heavy weight; ~ 85kg)	Di Prampero et al. 1971	5.0	58.8	
	Secher, 1990	6.0	68.2	
	Lakomy and Lakomy, 1993	4.8	60	
Swimming (400m)	Billat et al. 1996	4.41	59.6	1.46 m·s ⁻¹
	Lavoie et al. 1981	4.31	58.4 (5.6)	
	Roels et al. 2005	5.6	58.4	
Road Cycling	Billat et al. 1996	5.61	72.4	419 W
	Lee et al. 2002	5.45	73.0	
	Lucia et al. 1999	5.10	74.0	
Running (up to 3000m)	Billat et al. 1996	5.11	74.9	6.22 m·s ⁻¹
	Draper and Wood, 2005	5.0	68.9	
	Caputo and Denadai, 2004	6.3	68.8	

Note: all athletes studies were male and of professional and elite calibre.

* Power output and velocity at VO₂ max obtained from Billat et al. (1999).

Tableau 1. Consommation maximale d'oxygène en valeur absolue (L·min⁻¹) et relative (mL·kg⁻¹·min⁻¹), puissance (W) et vitesse (m·s⁻¹) à VO₂max des athlètes de kayak en ligne, en comparaison d'autres disciplines telles que le canoë-kayak, l'aviron, la natation, le cyclisme et la course à pied (Michael et coll. 2008)

D'autre part, certaines activités permettent une thermolyse plus efficace que d'autres. En fonction de la vitesse de l'air par exemple, on peut prédire le taux de chaleur évacué par le cycliste sur un terrain plat (Saunders et coll. 2005). Il sera d'autant plus important que la vitesse de déplacement augmente. En revanche, en course à pied sur des épreuves d'ultra-trails, où les vitesses de déplacements sont assez faibles, la faible vitesse de l'air n'autorise peu ou pas de mécanismes de thermolyse par convection (Adams et coll. 1992).

Enfin, en natation par exemple, la conductivité de l'eau étant élevée, les pertes de chaleur de l'organisme sont non négligeables. Dans une eau dont la température est inférieure à 33,5 °C, le sujet perd de la chaleur par conduction et par convection (Srámek et coll. 2000). En revanche, lorsque la température de l'eau dépasse 33,5 °C, le nageur gagne de la chaleur par rayonnement et par conduction, ceci entraînant une augmentation de la T_C et de la T_{cut}(Nadel et coll. 1974).

Section V - Thermorégulation en climat tropical

1. Difficultés de thermolyse liées à l'humidité de l'air

Dans des conditions environnementales tempérées, les mécanismes d'échange de chaleur permettent la régulation de la T_C à l'exercice, quelle que soit l'intensité ou la durée. La thermorégulation peut cependant être altérée dans certaines conditions environnementales, c'est le cas du climat tropical qui se traduit par une combinaison de chaleur importante et un haut degré d'humidité de l'air. Par ailleurs, il faut souligner que la performance aérobie est altérée en conditions chaudes et humides, même chez les sujets natifs ou acclimatés (Voltaire et coll. 2003). Plus le degré d'humidité de l'air est important, plus il devient le principal obstacle à la thermorégulation. La difficulté d'adaptation lors de l'exposition en climat chaud et humide provient du fait que la grande nécessité de refroidissement requise par l'organisme excède la capacité d'évaporation que permet l'environnement (Shapiro et coll. 1980). En effet, les stratégies employées par l'organisme en climat chaud et sec, à savoir la réduction du stockage de chaleur par augmentation de la sudation, sont rendues inefficaces en climat chaud et humide. Dans ces conditions, du fait du pourcentage élevé d'humidité de l'air en climat tropical, les gouttelettes de sueur vont ruisseler sur la peau ne permettant pas d'évacuer la chaleur. Pour autant, ce mécanisme de sudation ne disparaît pas et peut entraîner une hypohydratation chez le sujet qui ne remplace pas ses pertes d'eau de manière adéquate. Cette déshydratation peut être néfaste pour la performance aérobie. En effet, on considère qu'à une température ambiante de 40°C et au-dessus de 60 % d'humidité relative, un coureur ne peut maintenir sa capacité à équilibrer la balance thermique (Nielsen 1996). La sudation perd l'essentiel de son efficacité, mais elle ne s'arrête cependant pas pour autant. Les possibilités du sujet en matière de thermolyse étant réduites par l'humidité de l'air, l'accumulation de chaleur augmente dans l'organisme. Au fur et à mesure de l'exercice, la sudation inefficace renforce l'hyperthermie, si les pertes de sueur ne sont pas compensées de manière adéquate. Puisque la

sueur ne peut s'évaporer du fait d'une humidité relative trop importante, empêchant ainsi le mécanisme de thermolyse, le seul compromis possible entre les gains et les pertes de chaleur réside dans la réduction de la production de chaleur métabolique, donc de l'intensité de l'exercice (Sawka et coll. 1983). En climat sec, la dissipation de chaleur dépend de la surface corporelle de l'athlète (Kerslake 1972). Des coureurs Africains de poids et de taille inférieurs à des coureurs Caucasiens voient leur performance moins altérée en climat chaud et humide par rapport au climat chaud et sec, mettant en évidence l'effet potentiel du rapport S/M dans les processus de thermorégulation (Marino et coll. 2004). En effet, les coureurs caucasiens, du fait de leur plus large surface corporelle seraient capables de mieux évacuer la chaleur produite à l'exercice en climat tempéré et en climat chaud et sec.

II. Acclimatation

Définitions

On distingue l'acclimatement par rapport à l'acclimatation. La première méthode consiste à reproduire les conditions du climat de manière artificielle (en chambre calorifique ou en laboratoire), alors que la deuxième se réalise dans des conditions naturelles.

Mécanismes de l'acclimatation

1. Aspects physiologiques

L'acclimatation à l'exercice à la chaleur a un impact sur la transpiration en augmentant le taux de sudation, en diminuant le délai de sudation et en favorisant l'équilibre hydro-électrolytique (on observe une diminution de la perte en minéraux limitant le risque de déshydratation) (Pandolf 1998).

D'un point de vue cardio-vasculaire, on obtient une expansion du volume plasmatique et une augmentation du volume sanguin total, permettant une meilleure élimination de la chaleur par

le mécanisme de la sudation et une réduction du volume sanguin au niveau des territoires sous cutanés au profit des muscles (Sawka et coll. 1996). Enfin, on observe une diminution de la FC à l'exercice, qui a pour conséquence une diminution de la production métabolique et par conséquent de la chaleur produite sous-jacente (Nielsen et coll. 1993). On considère qu'une semaine constitue le délai d'apparition du phénomène d'adaptation à l'exercice à la chaleur. L'acclimatation est complète ou quasi-complète après 12 jours, en ce qui concerne les paramètres cardio-vasculaires et les mécanismes de thermorégulation (Hue et coll. 2007; Lorenzo et coll. 2010). Les auteurs s'accordent sur le fait que les athlètes de haut-niveau développent plus rapidement des adaptations, telles que l'abaissement de la T_{cut} et T_C , l'augmentation du taux de sudation, ou la diminution de la FC (Houmard et coll. 1990). Les protocoles d'acclimatation sont très divers, ils nécessitent une durée d'une heure par jour au minimum et des exercices impliquant une élévation de la T_{cut} et T_C . L'intensité et la durée de l'exercice doivent également favoriser les mécanismes de sudation (Pandolf 1998). Lorsque des athlètes doivent se rendre sur des compétitions en climat chaud et sec ou chaud et humide, l'acclimatation à l'exercice à la chaleur a un impact positif sur la performance aérobie sous maximale et maximale (Hue 2011).

2. Aspects psychologiques

Sur un exercice de marche en environnement très chaud (40°C, 30% HR), les évolutions comparées de l'épuisement perçu, de T_C et de l'index d'astreinte physiologique ont été analysées (Tikusis et coll. 2002). Les résultats ont montré que les sujets très entraînés sous-estimaient systématiquement leur niveau physiologique d'astreinte et leur T_C , alors qu'ils étaient capables de maintenir l'effort longtemps. Ces résultats corroborent ceux de Selkirk et McLellan (Selkirk & McLellan 2001) qui ont montré que des sujets minces et entraînés étaient capables de maintenir un effort plus longtemps en conditions chaudes et humides, les amenant à un niveau de T_C plus élevé que des sujets aussi minces et moins bien entraînés.

Section VI - Fatigue musculaire

La fatigue musculaire est évaluée par l'enregistrement de la force développée et le recueil de l'activité électromyographique (EMG) lors d'une tâche motrice, dont l'amplitude du signal EMG (EMG intégré ou enveloppe "Root Mean Square" (RMS) du signal EMG) est sensiblement augmentée (Bigland & Lippold 1954). Cette augmentation témoigne d'un recrutement des unités motrices plus important avec l'effort (Bigland-Ritchie et coll., 1986).

La fatigue peut être définie comme une diminution de la capacité du muscle à produire une force à la suite d'un exercice (Gandevia et coll., 1995) et dépend de la charge de travail réalisée (Fuglevand et coll., 1993). La diminution du niveau de force ainsi que les changements de l'activité électrique peuvent être observés au cours de contractions maximales ou sous-maximales, volontaires ou évoquées électriquement. Ces modifications reflètent une réduction de l'efficacité du système neuromusculaire, résultant d'une combinaison de facteurs périphériques (localisés au niveau des muscles effecteurs) et centraux.

I. Fatigue périphérique

La fatigue périphérique traduit une altération des processus physiologiques situés entre la jonction neuromusculaire et les propriétés contractiles du muscle. La composante périphérique de la fatigue musculaire peut être étudiée à travers les changements de la réponse motrice M_{max} à la stimulation nerveuse périphérique supra-maximale (un simple « Twitch » dans notre étude 3), enregistrée avant et après un exercice fatigant. Elle peut se traduire par des déséquilibres électrolytiques et calciques, une modification de la formation des ponts actine-myosine, un déficit énergétique (Westerblad et coll. 1991). La première étape de la fatigue périphérique se traduit par une altération de la transmission des potentiels d'action (PA) le long du sarcolemme, liée à une modification du fonctionnement des pompes sodium-potassium (Fuglevand et coll. 1993). La performance peut être affectée par une diminution de l'endurance, de la contractilité et de l'excitabilité musculaire, liée à cette altération des pompes

sodium-potassium (Clausen& Nielsen 2008).

II. La fatigue centrale

Elle se définit par une diminution progressive de l'activation volontaire des muscles au cours d'un exercice (Gandevia et coll. 1995), dont l'origine implique les centres moteurs supérieurs et la moelle épinière (Gandevia 2001). La commande motrice musculaire est indirectement régulée par les centres moteurs supérieurs (c'est-à-dire supra-spinaux) et ceux de la moelle épinière (spinaux), sur lesquels des boucles de rétroaction peuvent agir (Bigland-Ritchie 1981).

La perte de force maximale après un exercice prolongé de cyclisme a été associée à une réduction de l'activité électromyographique des muscles vastuslateralis (VL) (Lepers et coll. 2002).

Etage supra-spinal

Au niveau supra-spinal, on observe une diminution de la commande nerveuse centrale vers les motoneurones α associés ou non à une réduction du recrutement des unités motrices (Newham et coll. 1983). Les perturbations de l'équilibre homéostasique du système nerveux central ont alors été proposées comme facteurs responsables de l'altération de la commande centrale. Les réponses thermodynamiques au niveau du cerveau, la disponibilité des substrats énergétiques ou encore la perfusion sanguine sur la fatigue supra-spinale seraient également impliqués (Nybo & Secher 2004).

Etage spinal

Au niveau spinal, la fatigue centrale peut se traduire de différentes manières : des signaux afférents peuvent provenir des muscles actifs, du système cardio-vasculaire ou des articulations via des boucles réflexes qui modifient l'excitabilité du pool de motoneurones α .

Perspectives

Les femmes seraient avantagées à l'exercice aérobie en climat tropical, par leur masse musculaire et leur taux de sudation plus faibles. D'une part, leur plus petite masse musculaire induit une plus faible production de chaleur et d'autre part, leur plus faible taux de sudation pourrait malgré tout constituer un atout en climat tropical (Frye & Kamon 1983). En effet, la sueur ne permet pas d'évacuer la chaleur du fait de la saturation en humidité de l'air mais au contraire, induit une déshydratation du sujet susceptible d'altérer la performance. Alors que les moins bonnes performances aérobies des femmes dans ces conditions ont été attribuées à leurs difficultés de thermorégulation, cette altération de la performance serait essentiellement due à une moindre masse musculaire pour un poids identique, comparativement aux hommes (Wright et coll. 2002). Ainsi, dans la perspective de nos travaux de thèse, il nous semble important de vérifier les capacités de thermorégulation des femmes en milieu chaud et humide.

Nous avons par ailleurs un projet de prototype destiné à limiter le taux de chaleur stockée par les athlètes sur les courses de trail et d'ultra-trail qui se développent en Guadeloupe en particulier, mais aussi en Europe sur la saison estivale. Il s'agit de mettre au point un gilet comprenant des vessies remplies de liquide congelé et qui fondrait au fur et à mesure de du parcours, par radiation et conduction (gilet en contact avec le dos et le sternum principalement). En plus de permettre à l'athlète de s'hydrater quelque soit le parcours, le port d'un gilet glacé pourrait retarder l'augmentation de la T_C . Ainsi, cet équipement permettrait de participer aux compétitions en répondant aux consignes de l'organisation (l'emport d'un minimum de volume d'eau est souvent rendu obligatoire), tout en optimisant la performance, notamment en climat chaud ou tropical. Nous pourrions par la suite, si les résultats de nos

recherches confirment l'impact positif de cette veste "hydro-refroidissante" sur la performance, l'étendre à des activités nautiques où le port du gilet de sauvetage est obligatoire.

PARTIE II - CONTRIBUTION PERSONNELLE

Chapitre V - Objectifs et hypothèses de recherche

Section I - Objectifs et hypothèses de recherche

Si l'on considère l'hypothèse mettant en cause des modifications au niveau du SNC, deux mécanismes majeurs sont mis en avant pour tenter d'expliquer la baisse de performance ou l'arrêt de l'exercice prolongé à la chaleur : Selon certains auteurs, ce serait l'atteinte d'une T_C critique (température plafond proche de 40°C) qui conduit à l'épuisement et/ou à l'arrêt de l'exercice (Gonzalez-Alonso et coll. 1999; Walters et coll. 2000). Cette augmentation importante de la T_C jusqu'à une valeur trop élevée mettrait en danger certains mécanismes nécessaires à l'homéostasie de l'organisme (Nybo & Nielsen 2001a). Le deuxième mécanisme responsable de l'altération de la performance aérobique en climat chaud est un processus d'anticipation qui serait lié à la capacité du SNC à analyser la contrainte thermique métabolique et environnementale supportable par l'organisme. Assimilé à un "gouverneur central", T.D. Noakes propose que le SNC régule l'intensité de l'exercice de façon à limiter l'hyperthermie (Noakes et al. 2001). Cette théorie du "central governor" s'oppose au modèle de Hill qui invoquait une origine uniquement périphérique de la fatigue. Ainsi, des afférences liées à divers paramètres physiologiques ou à la durée de l'exercice, permettraient de planifier différentes intensités d'exercice tout au long de l'épreuve (Tucker et coll. 2006). Le sujet, sous la double contrainte thermique exogène et endogène, diminuerait la puissance de l'exercice alors même que sa T_C n'a pas encore atteint des valeurs critiques (Marino et coll. 2004; Tucker et coll. 2004). En laboratoire, la fatigue induite par hyperthermie se traduit par une réduction de la puissance lors d'exercices de CLM (Tucker et coll. 2004; Watson et coll. 2005) ou au cours d'exercices où les sujets doivent maintenir un certain niveau de difficulté

perçue (NDP) (Tucker et coll. 2006). Cette baisse de la puissance émerge avant même que le NDP déclaré par les sujets ne s'infléchisse, ce qui fait dire aux auteurs qu'il existe un mécanisme d'anticipation visant à limiter le stockage de chaleur lié à la production métabolique et à la contrainte environnementale.

Lors d'une expérimentation visant à étudier l'évolution du recrutement neuromusculaire pendant un exercice dynamique (20 kilomètres CLM sur ergocycle), la puissance de l'exercice et l'activité neuromusculaire du quadriceps reflétée par l'iEMG (Fig. 2), diminuent à partir du tiers de l'épreuve en climat chaud. Cette baisse intervient alors même qu'aucune hyperthermie n'est constatée (i.e., la T_C du sujet n'a pas atteint des valeurs supérieures à $38,5^{\circ}\text{C}$) (Tucker et coll. 2004). Ainsi, par un mécanisme d'anticipation, le sujet opèrerait une régulation de l'intensité de l'effort avant que ses capacités de thermorégulation soient inefficaces afin d'éviter tout risque d'hyperthermie.

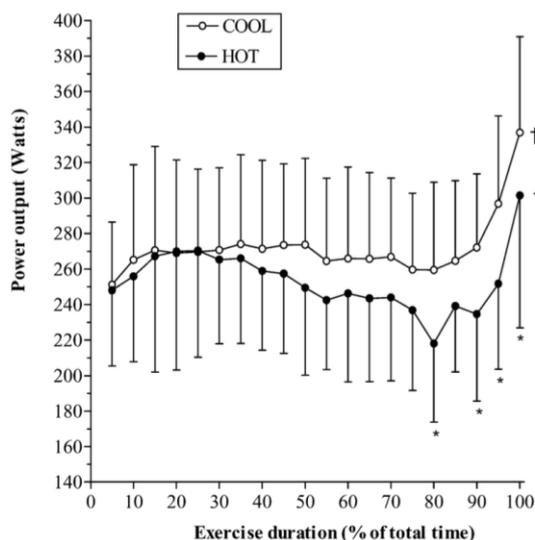


Fig. 1 Power output at intervals of 5% of the total duration of a self-paced, 20-km cycling time-trial at 35°C (HOT) or 15°C (COOL). Means \pm SD for ten subjects. * $P < 0.05$ vs. COOL; † $P < 0.05$ vs. preceding time intervals within the same environmental condition

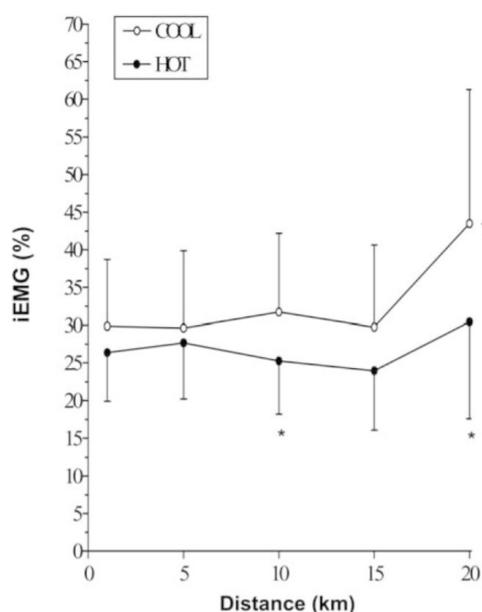


Fig. 5 Integrated electromyogram (iEMG) from the vastus lateralis muscle at 1, 5, 10, 15 and 20 km during trials in HOT (35°C) and COOL (15°C) conditions. Means \pm SD for eight subjects. * $P < 0.05$ vs. COOL; † $P < 0.05$ vs. other points during COOL

Figure 2. Puissance développée sur chaque intervalle de 5% et électromyogramme intégré tous les 5 kilomètres pendant un contre-la-montre de 20 km à cadence libre en conditions chaudes (35°C) et en conditions froides (15°C)

* $p < .05$ vs. COOL; † $p < .05$ vs. l'intervalle précédent dans la même condition (Tucker et coll. 2004)

Dans une autre expérimentation, les sujets réalisent une épreuve de pédalage sur ergocycle où ils doivent maintenir la puissance de l'exercice à un NDP fixé à 16 sur l'échelle de Borg entre "difficile" et "très difficile" (Tucker et coll. 2006). Ils réalisent un sprint de 30 secondes à la suite du CLM. Les résultats de l'EMGi enregistrée pendant l'exercice dynamique montrent qu'en environnement chaud, l'activité neuromusculaire décroît de manière significative tout au long de l'épreuve. Toutefois, on constate une nette augmentation du niveau de recrutement neuromusculaire pendant le sprint final. Les auteurs concluent que l'on ne peut imputer la diminution de puissance et de performance à l'érosion du capital d'activation neuromusculaire des fibres squelettiques, i.e. à la capacité de produire une puissance en relation avec une stabilité de potentiel d'action (PA). L'hypothèse de l'anticipation en relation avec les capacités de stockage de chaleur semble corroborée lors de cette étude par des taux de chaleur stockée non significativement différents, quelles que soient les conditions (froid, tempéré, chaud). La réduction de la puissance dès le début de l'exercice permettrait le maintien du NDP à un niveau stable sur l'échelle de Borg en limitant le taux de chaleur stockée. Les auteurs aboutissent à la conclusion qu'il semble que le maintien de l'équilibre thermique soit réalisé de manière anticipatoire, par la diminution de la puissance de l'exercice, afin d'éviter une trop grande accumulation de chaleur. Plusieurs études menées en conditions réelles de compétition mettent en évidence ce phénomène de limitation du stockage de chaleur au regard des températures centrales mesurées notamment chez les athlètes les plus lents (Noakes 2003). Chez les plus rapides en revanche, ils semblerait que l'intensité de l'exercice subisse peu d'inflexion, quand bien même T_c atteint des valeurs proches de 40°C (Ely et coll. 2009; Lee et coll. 2010). Il existe de nombreuses études sur la réponse physiologique à l'exercice prolongé en climat chaud et sec (Tattersson et coll. 2000; Tucker et coll. 2004; Tucker et coll. 2006; Wright et coll. 2002; Dennis & Noakes 1999; Sawka et coll. 2011). S'ils ont été bien décrits dans ces conditions, les 2 mécanismes cités précédemment ont été peu étudiés en climat tropical. On dispose de quelques travaux

concernant les adaptations physiologiques de l'organisme à l'exercice aérobie en climat chaud et humide en laboratoire (Voltaire et coll. 2003) mais ils sont moins nombreux en conditions écologiques. Nous avons voulu dans un premier temps, étudier les stratégies d'hydratation des athlètes acclimatés et qui participent à des compétitions officielles d'endurance en climat tropical. Par la suite, nous avons élaboré un protocole de laboratoire visant à étudier l'émergence d'une fatigue périphérique et/ou centrale qui serait responsable de l'apparition d'une baisse de performance, ou de l'arrêt de l'exercice en comparant 3 CLM en climat neutre, chaud et sec, et chaud et humide.

Chapitre VI - Méthodologie générale

Section I - Sujets

Les 49 sujets masculins participant à nos expérimentations étaient des triathlètes et des cyclistes amateurs dotés d'une bonne condition physique, avec un minimum de 10 heures et jusqu'à 20h d'entraînement par semaine (toutes activités physiques confondues). Les sujets étaient acclimatés, c'est-à-dire vivant en climat tropical depuis plus de deux ans (Saat et coll. 2005). Les trois études ont été approuvées par le comité d'éthique de l'université de formation et de la recherche en Sciences et Techniques des Activités Sportives de la Guadeloupe. Tous les sujets ont rempli un questionnaire médical et ont donné leur consentement éclairé avant le déroulement des études, conformément à la Déclaration d'Helsinki. Les sujets devaient s'abstenir d'effort intense et d'ingestion d'alcool ou de caféine avant chaque épreuve. La taille des sujets a été mesurée par l'usage d'une toise (Tanita HR001, Tanita Europe B.V., Amsterdam, the Netherlands) à 0,01 m près. Les sujets ont été pesés à l'aide d'une balance impédancemètre (Tanita BC-418MA, Tokyo, Japan) avant et après l'expérimentation pour l'étude 3. La masse des athlètes, vêtus uniquement de leur short, a été mesurée au début et 10 minutes après la fin de l'épreuve à 0,1 kg près (Seca 881, Seca Vogel & Halke GmbH & Co, Hamburg, Germany) pour les études 1 et 2.

Etude	N	Age (années)	Taille (cm)	Poids (kg)	FC max (bpm)	VO2max (ml/min/kg)
1	20	39,5 ± 9,0	177 ± 7	72,9 ± 9,3	179 ± 10	
2	19	39,1 ± 6,9	180 ± 7	72,6 ± 7,9	169 ± 10	
3	10	36,0 ± 9,3	177 ± 5	70,8 ± 8,3	178 ± 7	61,8 ± 6,3

Tableau 2. Paramètres anthropométriques pour la population générale (moyennes et écarts-types).

Contexte d'expérimentations

I. Conditions environnementales

Etude 1 et 2:

Ces deux études se sont déroulées en conditions écologiques. L'indice WBGT a été enregistré pendant toute la durée de l'épreuve (QUESTemp° 32 Portable Monitor, QUEST Technologies, Oconomowoc, WI, USA). La température de l'eau de mer a été mesurée pendant toute la durée de l'épreuve de natation avec un thermomètre équipé d'une sonde (YSI409AC, Yellow Springs Instruments, Yellow Springs, Ohio, USA).

étude	Température ambiante (°C)	Humidité de l'air (%)	WBGT (°C)	Température de l'eau (°C)
1	25,7 ± 0,6	78,0 ± 0,0	23,6 ± 0,9	-
2	27,2 ± 0,5	80,2 ± 2,0	25,2 ± 0,1	29,5

Tableau 3. Température (°C), taux d'humidité de l'air (%) et Wet Bulb Globe Temperature (°C) pour les études 1 et 2 (moyennes et écarts-types)

Etude 3:

Afin de reproduire les trois conditions climatiques, nous avons utilisé deux chauffages d'appoint, un déshumidificateur électrique et un climatiseur électrique. Les paramètres de température ambiante de d'humidité de l'air ont été mesurés à l'aide d'un thermo-hygromètre (Littoclimate, Modèle EMR812HG, Caen, France).

étude 3	Climat	Température ambiante (°C)	Humidité de l'air (%)	WBGT (°C)
	Neutre	23,2 ± 0,7	56,3 ± 3,3	19,7 ± 0,5
	Chaud et sec	32,8 ± 1,6	46,2 ± 5,5	27,6 ± 1,1
	Tropical	29,7 ± 0,5	90,4 ± 6,5	29,4 ± 0,6

Tableau 4. Température (°C), taux d'humidité de l'air (%) et Wet Bulb Globe Temperature (°C) pour l'étude 3 (moyennes et écarts-types)

1. Condition neutre

La climatisation générale à l'ensemble des locaux, couplée à un climatiseur électrique portatif a permis d'obtenir une température ambiante d'environ 20 °C dans la pièce au début de l'épreuve. La température ambiante a augmenté au fur et à mesure de l'exercice. Concernant l'hygrométrie, nous avons dû coupler un chauffage de la salle deux heures avant l'expérimentation pour assécher l'air avec un déshumidificateur électrique, afin d'obtenir des valeurs d'hygrométrie comprises entre 50% (au début de l'épreuve) et 60% (à la fin de l'épreuve) d'humidité de l'air. Le test d'habituance s'est également déroulé en conditions neutres (20,2 ± 0,44 °C; 66,4 ± 5,3% HR).

2. Condition chaude et sec

Afin d'obtenir une température élevée, nous avons chauffé la salle avec plusieurs appareils : deux chauffages d'appoint et un appareil de chauffage portable développant une puissance de 2000 Watts. Ces deux procédés ont suffi à abaisser le taux d'hygrométrie par séchage de l'air ambiant.

3. Condition chaude et humide

L'obtention du climat tropical dans des conditions de laboratoire a nécessité deux procédés. Nous avons utilisé deux bouilloires pendant l'heure précédant l'épreuve (elles

fonctionnaient en continu), jusqu'à atteindre un pourcentage d'humidité d'au moins 90 %. D'autre part, nous avons chauffé la pièce (par chauffage électrique) pour atteindre une température d'environ 30°C.

Section II - Protocole

Design expérimental

1. Etude 1:

Les athlètes prenaient part à la compétition du trail de 27 km à la pointe des châteaux (édition 2012), à Saint-François, Guadeloupe, dont le départ était donné à 16h. Avant le début, à la fin de l'épreuve et au ravitaillement du 11ème km, les sujets devaient répondre à un questionnaire de confort et de chaleur.

2. Etude 2:

Les triathlètes ont été étudiés dans le cadre d'une participation à un Half-Ironman triathlon, pendant la première édition 2012 à Saint-François, Guadeloupe, dont le départ était donné à 11h. Ils devaient parcourir 1,9 km de natation (deux boucles de 0,95 km), suivis de 92 km de vélo (trois boucles de 30,6 km) et 21 km de course à pied (trois boucles de 7 km sur terrain plat).

3. Etude 3:

Les sujets ont réalisé un contre-la-montre sur ergocycle dans trois conditions climatiques différentes comme décrit par la figure 2 : climat neutre, climat chaud et sec et climat tropical, avec 7 jours d'intervalle entre chaque session. L'épreuve consistait à parcourir

les 20 km le plus vite possible.

Matériel et méthodes

4. Mesure des paramètres physiologiques

Etudes 1 et 2:

Température gastro-intestinale

La température gastro-intestinale a été mesurée avant la course, lors du 11ème km et juste après la fin de la course avec un système CorTemp™ 2000 ambulatoire de télédétection (HQ Inc., Palmetto, FL, USA). Les sujets ont ingéré les pilules au moins 6 heures avant la course, afin d'éviter les variations de température liées à l'ingestion de fluide ou de nourriture. Un contrôle télémétrique a été effectué juste avant la course afin de vérifier que le capteur de température transmettait un signal pour chaque sujet.

Osmolalité urinaire :

Les urines des athlètes ont été collectées avant et après la compétition, afin d'évaluer d'éventuels changements de l'osmolalité urinaire (U_{osm}). Nous avons utilisé $U_{osm} > 800$ mOsm·kg⁻¹ pour indiquer un état hypohydraté, norme fréquemment utilisée en expérimentation (Shirreffs & Maughan 1998). Les échantillons doublés ont été envoyés au laboratoire de biochimie du Centre Hospitalier Universitaire de Pointe-à-Pitre, afin d'analyser l'osmolalité urinaire et évaluer le niveau d'hydratation des sujets.

Etude 3:

Lors de l'expérimentation de laboratoire, l'heure de passage des sessions (11h) était similaire afin d'éviter toutes perturbations liées aux rythmes circadiens et les sessions ont été

randomisées.

Test de VO₂max et test d'habituat

En amont de l'expérimentation, un test maximal aérobie (VO₂max) a été réalisé pour chaque sujet. Après un échauffement de 10 minutes à allure libre, les sujets ont commencé un test incrémental sur un ergocycle (MonarkWeightErgometer 814 E, Varberg, Sweden) à la puissance correspondant à 30 W. La charge a été augmentée de 30W/min jusqu'à l'épuisement. Il a été demandé aux sujets de rester assis durant toute la durée de l'exercice. Le test s'est déroulé en conditions tempérées (22°C, 50% HR) dans une salle climatisée. Les critères d'atteinte de la VO₂max correspondaient à (1) un quotient respiratoire >1,10 (2) l'atteinte de la fréquence cardiaque maximale prédite ($210 - [0,65 \cdot \text{age}] \pm 10\%$) (3) une augmentation de la VO₂ inférieure à 100 ml (4) l'incapacité du sujet à maintenir une cadence de 60 tours par minutes (Beaver et coll. 1986). Les résultats de la mesure de FC et de la puissance développée au seuil ventilatoire1 (SV1) et au seuil ventilatoire2 (SV2) déterminés par la méthode de Wasserman (Wasserman et coll. 1973), ainsi qu'à VO₂max sont données dans le tableau 5.

	SV1	SV2	à VO ₂ max
FC (bpm)	92 ± 49	164 ± 10	177 ± 10
Puissance (Watts)	148 ± 10	253 ± 67	290 ± 59

Tableau 5. Paramètres physiologiques pour la population générale de l'étude 3 : n = 10 (moyennes et écarts-types)

Le test d'habituat

était nécessaire avant chaque épreuve, afin de contrôler la pression des pneus. On a demandé aux sujets de parcourir 20 km le plus vite possible. La seule information dont ils disposaient était le nombre de km restants à parcourir.

Température rectale et cutanées

La température rectale (TR) a été mesurée par une sonde (YSI409AC, Yellow Springs Instruments, Yellow Springs, Ohio, USA) installée 10 cm à l'intérieur du sphincter anal (Saltin & Hermansen 1966). Les T_{cut} ont été mesurées par cinq sondes thermocouples (YSI 427, modèle skin pediatric, Ohio, USA) installées et maintenues par ruban adhésif médical sur les sujets. Les sondes étaient positionnées sur le sternum, l'avant-bras, la cuisse et le mollet. À la fin de l'échauffement, les T_{cut} , TR et les conditions climatiques (T_a et HR) ont été relevées et enregistrées toutes les 5 minutes.

Taux de stockage de chaleur

Les températures du sternum, de l'avant-bras, du mollet, et du quadriceps et la TR ont été enregistrées afin de calculer le taux de chaleur stockée à l'aide des formules suivantes (Mitchell & Wyndham 1969) :

La T_{cut} a été obtenue en appliquant la formule suivante :

$$T_{cut} = 0,3 (T_{thorax} + T_{bras}) + 0,2 (T_{front} + T_{jambe})$$

La température corporelle a été calculée en utilisant la formule suivante (Colin et coll. 1971) :

$$T_{corps} = 0,79 (T_{rectale}) + 0,21 (T_{peau})$$

Le taux de chaleur a été calculé selon l'équation suivante (Ramanathan 1964) :

$$Q_c = T_{corps} \times m \times 3,47$$

où Q_c est le taux de chaleur, m la masse du sujet et 3,47 une constante mesurée en $\text{kJ} / ^\circ\text{C} / \text{kg}$

Le taux de stockage de chaleur a été calculé en utilisant la formule suivante :

$$Q_s = Q_c T_2 - Q_c T_1$$

où Q_s est le stockage de chaleur en kJ, Q_{cT1} le taux de chaleur à T1 et Q_{cT2} le taux de chaleur à T2.

Contractions maximales volontaires

Les sujets ont réalisé une série de quatre contractions maximales volontaires (CMV) avec 2 minutes de récupération entre chaque, avant et après l'exercice des 20 km CLM sur ergocycle lors de l'étude 3. En position semi-allongée, la jambe droite des sujets était reliée à un dynamomètre par une sangle passant juste au-dessus de la malléole. Les sujets étaient encouragés verbalement pour produire une force maximale. La force maximale volontaire (FMV) du muscle vaste latéral a été évaluée par l'intermédiaire d'un dynamomètre pendant une contraction isométrique de 3 secondes.

Contractions involontaires

La stimulation des tissus nerveux par des champs magnétiques permet d'évaluer la fonction neuromusculaire. L'application d'un champ magnétique sur le nerf fémoral permet l'induction d'un courant électrique, qui à son tour peut dépolariser la membrane cellulaire des structures nerveuses ciblées. Par l'intermédiaire d'une bobine électromagnétique double, en huit (Inomed, Magstim 200, Whitland, Whales, U.K), nous avons stimulé de manière non-invasive, les voies motrices à la fois au niveau périphérique et au niveau central. Ainsi, la mesure de réponses électromyographiques comparées, avant et après un CLM de 20 km dans les 3 conditions environnementales nous a permis d'étudier les mécanismes contractiles, spinaux et supraspinaux de la fatigue. La valeur de la réponse au niveau de l'unité neuromusculaire a été appréciée à partir de la contraction musculaire ainsi provoquée. L'acquisition des paramètres de l'EMGi et de la force a été réalisée par le système

d'acquisition système d'acquisition Biopac (modèle MP 30 system, Santa Barbara, CA, Etats-Unis) et le logiciel Acknowledge (modèle 3.2 acquisition software BiopacSystems, Santa Barbara, CA, Etats-Unis) avec un boîtier de numérisation des signaux et un dynamomètre. Les sujets étaient stimulés en position semi-allongée sur un plan incliné, afin d'appliquer la bobine au niveau du nerf fémoral. La recherche de la position de la bobine a été réalisée de 70% à 100% de l'intensité maximale et a nécessité environ 3 stimulations. Suite à la recherche de la position optimale, nous avons indiqué la position de la bobine sur la peau du sujet, à l'aide d'un feutre et nous avons enregistré trois stimulations consécutives.

Electromyographie de surface

Les phénomènes électriques de la contraction musculaire pendant l'exercice dynamique, lors des contractions musculaires volontaires et involontaires ont été enregistrés lors de l'étude 3. Lorsqu'une fibre musculaire se contracte, elle est le siège d'une activité électrique propagée, c'est le PA. Au niveau du muscle, la somme de l'activation des éléments contractiles qui le composent est recueillie au moyen de deux électrodes fixées sur la peau à 2 cm l'une de l'autre : c'est l'électromyogramme (EMG). Lors d'une contraction isométrique volontaire, l'amplitude de l'EMG de surface (SEMG) croît avec l'augmentation de la force musculaire (Akataki et coll. 2004).

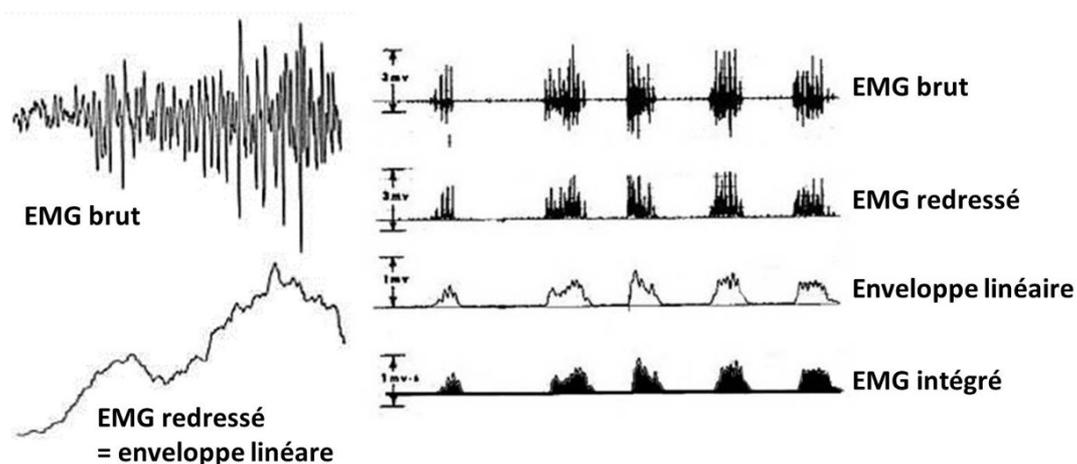


Figure 3. Signal d'électromyographie, du signal brut à l'électromyogramme intégré.

Pendant les les CMV et CI, l'électromyogramme intégré (iEMG) a été enregistrée à partir du muscle vaste latéral. Pendant l'exercice dynamique, nous avons enregistré l'iEMG sur le muscle vaste latéral et sur l'ischio-jambier au km 3, 7, 11, 15 et 19, pendant trente secondes. L'enregistrement bipolaire a été effectué par des électrodes de surface (prégélifiées de type Ag–AgCl, 3M Health Care, modèle 2223, Neuss, Germany) placées sur la jambe droite du sujet après une préparation de la peau (rasage, nettoyage à un mélange alcool-éther) sur le ventre du muscle lors de sa contraction (Kay et coll. 2001). Les deux câbles d'électrodes étaient munis de 3 connecteurs reliés aux électrodes : une masse, une partie inférieure et une partie supérieure. Les signaux ont ensuite été amplifiés à la source ($\times 600$), filtrés (filtre passe-bande 8-500 Hz) et stockés. La durée d'acquisition était de 30 secondes et une analyse temporelle d'EMG a aussi été effectuée sur une 10 bouffées concernant l'enregistrement EMG de l'exercice dynamique. L'amplitude moyenne de l'EMG (en μV) a été calculée après avoir redressé et rectifié le signal.

Afin d'étudier l'activité neuromusculaire de ce muscle, nous avons normalisé le signal d'iEMG à partir de la moyenne de la force maximale réalisée sur les CMV. La validité de cette méthode de normalisation du signal d'iEMG a été démontrée, en particulier en climat chaud et humide (Schabort et coll. 1998; Nielsen et coll. 1997).

Paramètres cardio-respiratoires

La FC a été enregistrée tout au long des épreuves, toutes les 5 secondes à l'aide d'un cardio-fréquence-mètre (PolarVantage, Polar Electro Oy, Kempele, Finland). Les données ont été recueillies par le logiciel adéquat. La consommation d'oxygène a été évaluée toutes les 15 minutes, pendant 5 minutes avec le logiciel Vmax(Vmax, SensorMedics, Anaheim, CA, USA).

5. Mesure des paramètres psychologiques

Etudes 1 et 2:

Sentiment de confort et de chaleur

Les athlètes ont été familiarisés avec une échelle de sensation thermique (ST) et de sentiment de confort (SC) adaptée (Hodder & Parsons 2007), constituée de 7 items pour la chaleur (allant de "très froid" pour 1 à "très chaud" pour 7) et de 4 items pour le confort (allant de "confortable" pour 1 à "très inconfortable" pour 4). Au début et à la fin de l'épreuve, ainsi qu'au 11^{ème} km lors du ravitaillement, les sujets devaient indiquer à l'expérimentateur leur ST et SC ressentis. En effet, il a été montré que la perception thermique au cours de l'exercice à la chaleur affecte la stratégie de course, au niveau de la cadence et de l'intensité de l'exercice (Cheung 2007).

Etude 3:

Niveau de difficulté perçue :

Le sujet devait évaluer son NDP toutes les deux minutes sur une échelle de Borg de 6 à 20 (Borg 1982).

6. Mesure de la performance

Etudes 1 et 2 :

La performance a été mesurée de manière officielle par les organisateurs des deux compétitions (Sport Timing Caraïbes).

Etude 3 :

Lors du CLM sur 20 km, les sujets avaient la possibilité de régler la puissance de

l'exercice et de changer le développement du vélo. La performance a été mesurée en secondes, la vitesse en km/h et la distance en km toutes les 2 minutes par une montre Polar et un compteur (Modèle S725X cycling computer, Polar Electro Oy, Kempele, Finlandia) placés sur le vélo.

7. Mesure de l'ingestion de boisson

Etudes 1 et 2:

En milieu écologique, la prise de boisson (ad libitum) a été évaluée par la différence de poids de la vessie contenue dans le sac à dos des sujets avant et après la course, additionnée au volume d'eau ingérée pendant les ravitaillements.

Etude 3 :

Les sujets étaient autorisés à boire ad libitum. Le volume d'eau ingéré à chaque essai a été calculé à l'aide d'un verre mesureur.

Analyse statistique

Pour réaliser les analyses statistiques de nos trois études, nous avons utilisé le logiciel de statistiques pour les sciences sociales (SPSS, version 19, Chicago, IL, USA). Nous avons testé la normalité des données en utilisant les tests de Skewness et Kurtosis (respectivement asymétrie et aplatissement) et l'homogénéité des variances pour les trois études, avec des valeurs de Z comprises entre +1 ou -1.

8. Etudes 1 et 2:

Tous les calculs statistiques ont été effectués à l'aide Systat 12. Une fois l'hypothèse de normalité basée sur des tests d'asymétrie et d'aplatissement confirmée, des tests paramétriques ont été effectués. Pour analyser T_C , ΔT_C , la performance, la FC et l'osmolalité urinaire, nous avons utilisé une analyse de variance (ANOVA) à une voie à mesures répétées. Des contrastes par paires ont été utilisés lorsque cela était nécessaire pour déterminer des

différences significatives. Des régressions linéaires multiples ont été utilisées pour déterminer les relations entre les variables liées à la T_C , la performance et l'état d'hydratation. Les données sont affichées sous forme de moyenne \pm écart-type, et la significativité statistique a été fixée à $p < 0,05$.

1. Etude 3:

Une fois l'hypothèse de normalité confirmée, les données ont été analysées selon une analyse de variance (ANOVA) avec mesures répétées à deux voies pour les données de températures, de stockage de chaleur, de la force développée par le quadriceps lors des CMV, de la force développée par le quadriceps lors des stimulations électromagnétiques via le nerf fémoral, d'iEMG, de FC, de NDP, de vitesse et de VO_{2max} , afin de déterminer l'interaction du climat et du temps (exercice), et selon une ANOVA avec mesures répétées à une voie pour le BML et le volume d'eau ingérée. Lorsqu'un effet significatif a été confirmé, des tests de comparaisons par paires de Tuckey ont été réalisés. Un t-test pour échantillons appariés a été utilisé pour étudier l'effet du climat sur la performance. Pour toutes les analyses, la signification a été fixée à $p < 0,05$. Les données sont présentées sous forme de moyenne \pm écart à la moyenne.

Chapitre VII - Résultats

Section I - Etude 1:

Les paramètres de T_C , la sensation thermique, le confort thermique, le poids et l'osmolalité urinaire pendant les essais sont représentés dans le tableau 6.

	K0	K11	K27
Température centrale (°C)	37,3 ± 1,0	38,5 ± 1,1*	38,3 ± 0,9*
Sensation thermique (AU)	2,1 ± 1,1	3,7 ± 1,4**	3,3 ± 1,1**
Confort thermique (AU)	1,2 ± 0,5	2,8 ± 1,1†	2,7 ± 0,9†
Poids (kg)	73,0 ± 9,3		71,1 ± 9,3‡
Osmolalité urinaire (mOsm·Kg ⁻¹)	647,3 ± 262,0		614,6 ± 197,7

Tableau 6. Température centrale (°C), sensation thermique, confort thermique, poids (kg) et osmolalité urinaire (mOsm·Kg⁻¹)

* significativement différent de la valeur de départ (p <0,05), ** significativement différent de la valeur de départ (p <0,05), † significativement différent de la valeur de départ (p <0,05), ‡ significativement différent de la valeur de départ (p <0,05)

Nous avons montré une corrélation entre la différence de température ($\Delta T_{C27}/T_{C0}$), le poids au départ (BM0), l'ingestion de boisson (WI), la perte d'eau totale du corps (TBWL) et la performance, comme nous pouvons le voir en figure 4.

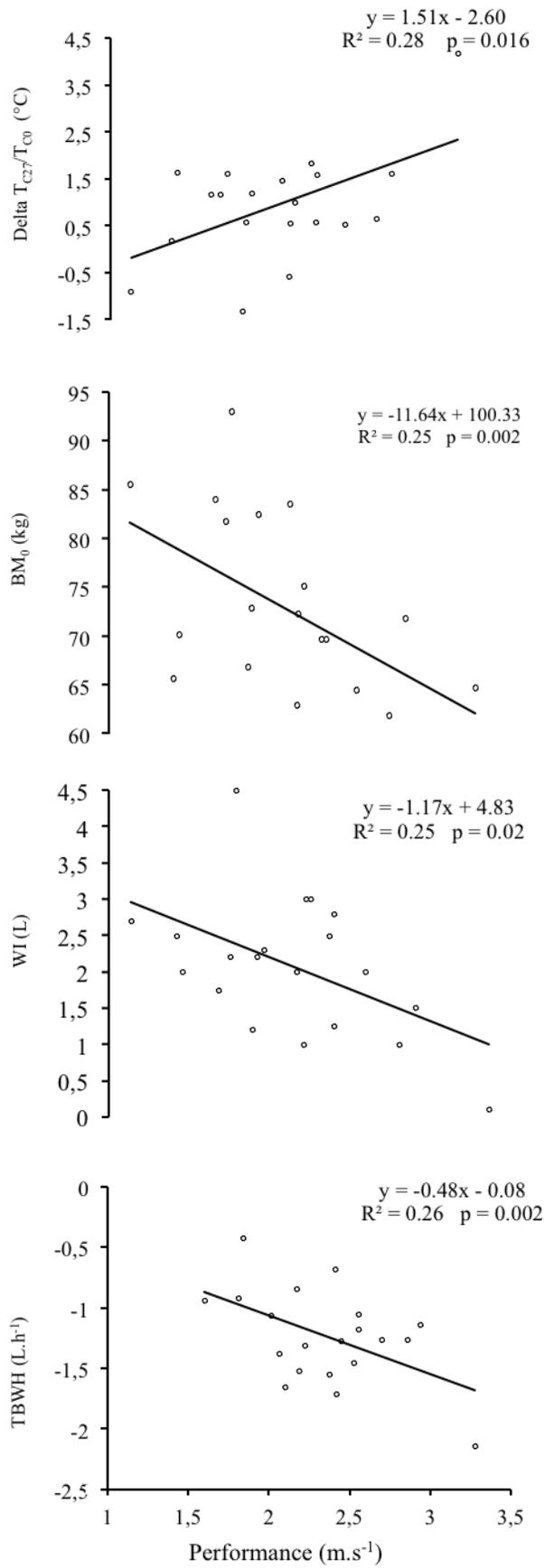


Figure 4. Corrélation entre la différence de température (delta T_{C27}/T_{C0}), le poids au départ (BM₀), l'ingestion de boisson (WI), la perte d'eau totale du corps (TBWL) et la performance (p <0,05)

Nous avons observé une corrélation entre la performance prédite et la performance réelle comme le montre la figure 5. Cette corrélation indique que les coureurs les plus rapides étaient ceux qui étaient les plus légers, avec un faiblesentiment de chaleur à l'arrivée (TS27) et qui ont expérimenté un delta T_{C27}/T_{C0} le plus élevé tout au long d l'épreuve.

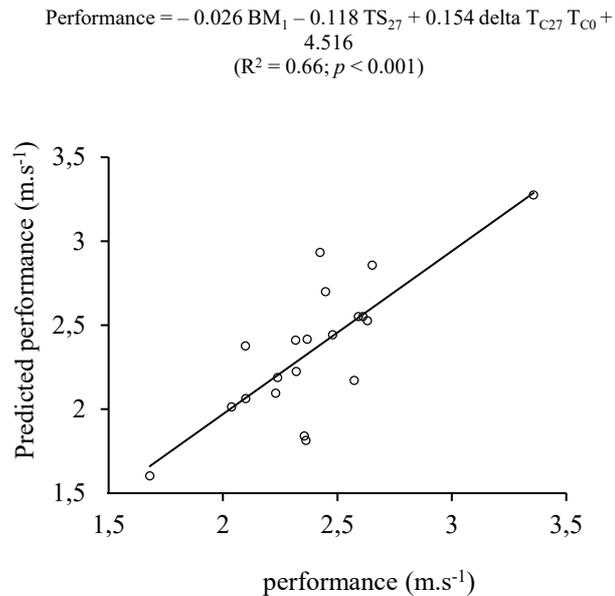


Figure 5. Corrélation entre la performance prédite et la performance réelle ($p < 0,05$)

Nous avons mis en évidence une corrélation entre la perte d'eau totale du corps (TBWL) et la différence de température T_{C27}/T_{C0} (delta T_{C27}/T_{C0}) en haut et la corrélation entre la perte d'eau totale du corps (TBWL) et la différence de température T_{C11}/T_{C0} (delta T_{C11}/T_{C0}) en bas comme le présente la figure 6.

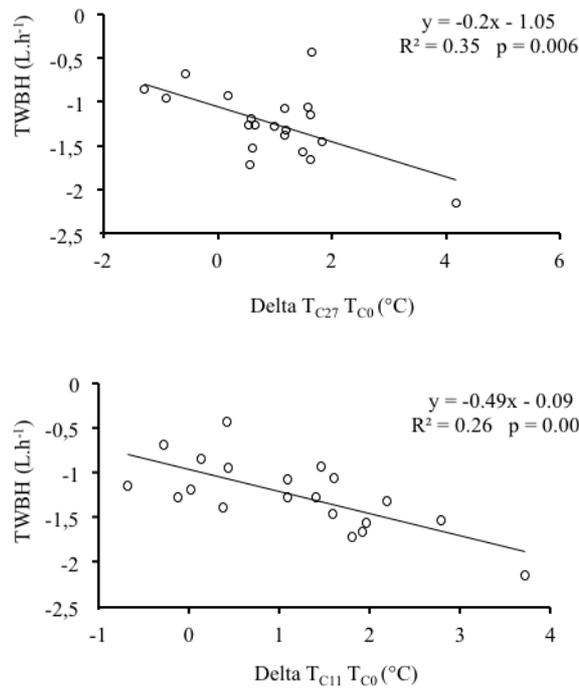
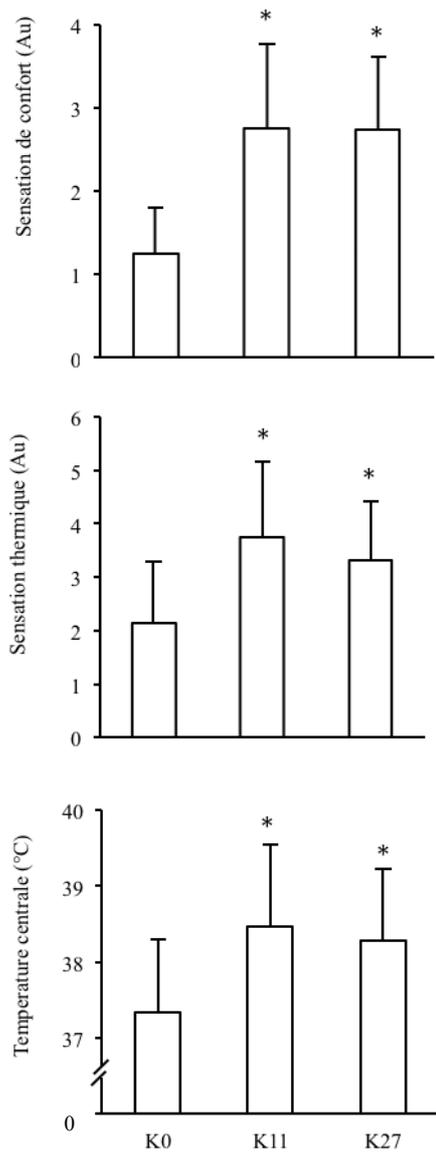


Figure 6. Corrélations entre la perte d'eau totale du corps par heure (TBWLH) et la différence de température T_{C27}/T_{C0} (delta T_{C27}/T_{C0}) en haut, et entre la perte d'eau totale du corps par heure (TBWLH) et la différence de température T_{C11}/T_{C0} (delta T_{C11}/T_{C0}) en bas; ($p < 0,05$)

Nous observons comme illustrée par la figure 7, l'évolution de la T_C , TS et CS au cours de l'épreuve à K0, K11 et K27. Les résultats de l'ANOVA ont montré un effet kilomètre sur T_C , TS et CS avec une différence entre T_{C27}/T_{C0} et T_{C11}/T_{C0} , mais aucune différence significative n'a été observée entre T_{C27}/T_{C0} et T_{C27}/T_{C11} .



**Figure 7. Température centrale en °C, sensation thermique (Au), sentiment de confort (Au) au cours du trail à K0 (juste avant le départ), K11 (au 11^{ème} kilomètre) et K27 (juste après l'arrivée)
*Significativement différent de la valeur de départ (p < 0,05)**

Section II - Etude 2:

Nous avons montré sur la figure 8, une corrélation entre le poids avant la course et la T_C après la natation ($p < .05$; $R^2 = .50$). Plus les athlètes étaient lourds et plus ils ont terminé la natation avec une T_C élevée. Ce résultat est en accord avec la littérature en particulier avec l'étude de Marino, qui montrent que plus les athlètes qui ont une masse musculaire importante, plus ils produisent de chaleur métabolique à l'exercice aérobique (Marino et coll. 2004).

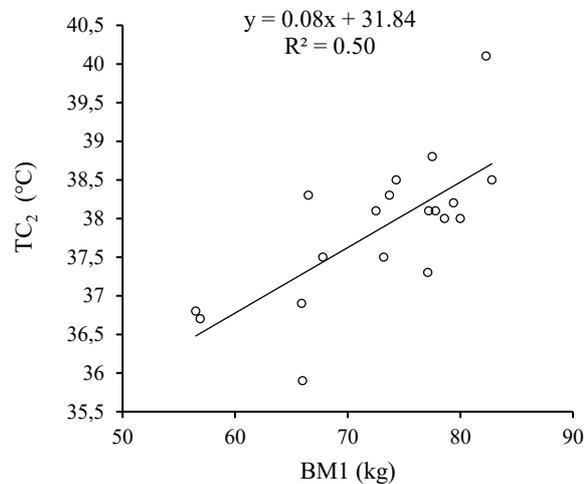


Figure 8. Corrélation entre le poids avant la course (BM1) et la température centrale après la natation (T_{C2}) ($p < .05$)

Nous avons montré sur la figure 9, une corrélation entre le poids avant la course et la différence de T_C entre le vélo et la natation ($p < .05$; $R^2 = .32$). Ce résultat suggère que plus les athlètes étaient lourds au départ et plus ils ont expérimenté une différence de T_C importante entre la fin de la natation et la fin du cyclisme. Nous pouvons interpréter ce résultat en avançant l'hypothèse que, d'une part, les sujets plus lourds produisent un taux de chaleur métabolique à l'exercice plus important. D'autre part, lors de la phase de cyclisme, nous supposons que par leur grande taille, le ratio surface corporelle/masse élevé a permis aux triathlètes d'évacuer un important taux de chaleur par convection.

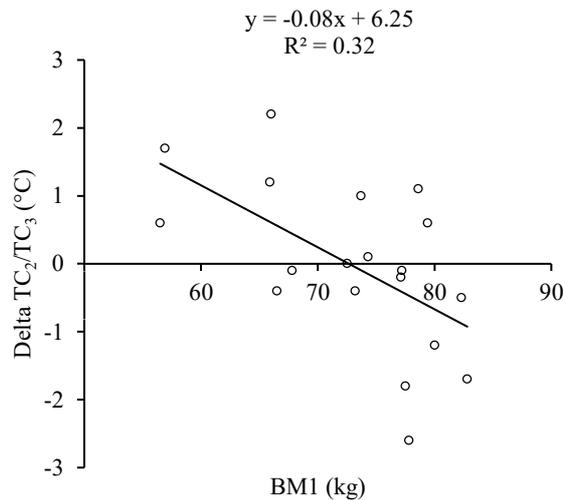


Figure 9. Corrélation entre le poids avant la course (BM1) et la différence de température entre le vélo et la natation (delta TC₂/TC₃) (p <0,05)

La figure 10 nous indique l'évolution de la T_C en fonction du temps, avec une augmentation de 0,7 °C après la natation, pas de différence de T_C pendant le vélo et une augmentation de T_C après le course à pied de 0,6 °C. L'absence d'augmentation de T_C pendant la phase de cyclisme s'explique par la possibilité de thermolyse par convection qu'offre cette activité. De plus, le parcours était relativement plat, aussi la vitesse de progression était importante, et par conséquent l'évacuation de la chaleur également.

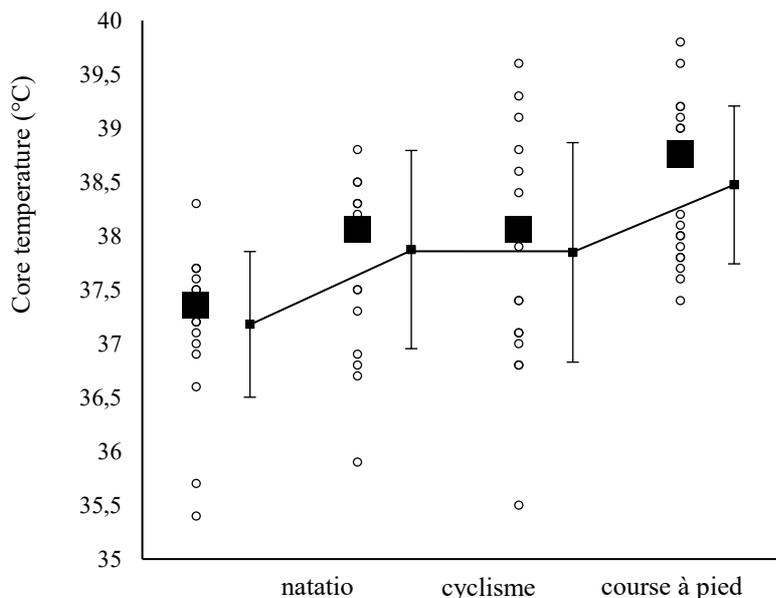


Figure 10. Température centrale au départ (T1), après la natation (T2), après le vélo (T3) et après la course à pied (T4).

	Départ	Arrivée
Poids (kg)	72,6 ± 7,9	69,0 ± 7,3*
Osmolalité urinaire (mOsm.kg ⁻¹)	491,6 ± 300,6	557,9 ± 207,9

Tableau 7. Poids (kg) et osmolalité urinaire (mOsm.kg⁻¹) des athlètes.

* Significativement différent de la valeur de départ (p <0,05)

Nous constatons, une différence significative entre le poids de l'athlète à l'arrivée et celui de départ. En revanche, nous n'avons pas mis en évidence de différence significative entre l'osmolalité urinaire des athlètes au début et à la fin du half-Ironman, comme représenté dans le tableau 7. Cela indique qu'aucun athlète ne présentait de statut hypohydraté.

Section III - Etude 3

I. Performance

La performance sur le 20 km CLM était significativement plus élevée en climat tropical (TROP) et en climat chaud et sec (HOT) qu'en climat neutre (NEUTRAL) (p <0,05), comme le représente la figure 10.

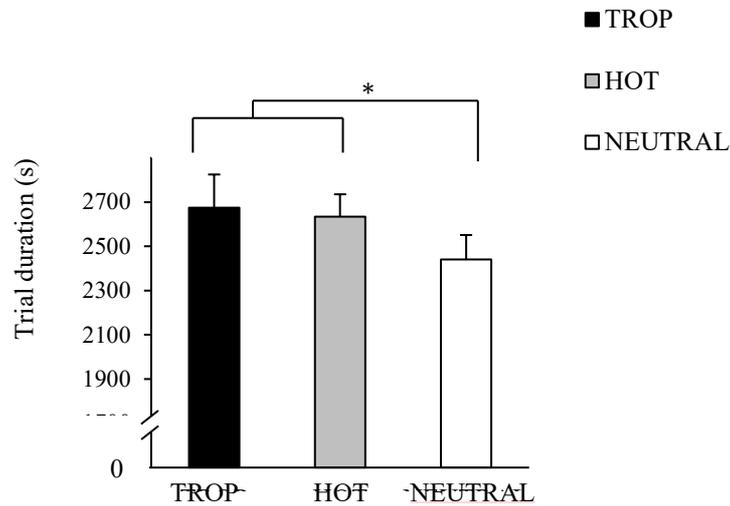


Figure 11. Performance du contre-la-montre en secondes en conditions tropicales (en noir), chaudes (en gris) et neutres (en blanc). Moyennes \pm écarts à la moyenne pour 10 sujets. *Significativement différent de neutre($p < .05$)

II. Réponses musculaires

Contractions maximales volontaires et contractions involontaires

L'exercice affecte les contractions maximales volontaires (CMV) après l'exercice par rapport aux CMV avant l'exercice dans la même amplitude, quelle que soit la condition dans laquelle sont réalisées les CMV, comme le montre la figure 12 (en haut). Les résultats des CMV montrent que dans les trois conditions, la force développée par le muscle vaste latéral est amoindrie après l'exercice ($p < .05$).

Les analyses statistiques n'ont pas montré de différence significatives concernant les contractions involontaires(CI), comme indiqué par la figure 12 (en bas). Les CI avant le CLM par rapport aux CI après le CLM ne sont ni affectées par le temps ou la condition dans laquelle ont été réalisées les stimulations électromagnétiques.

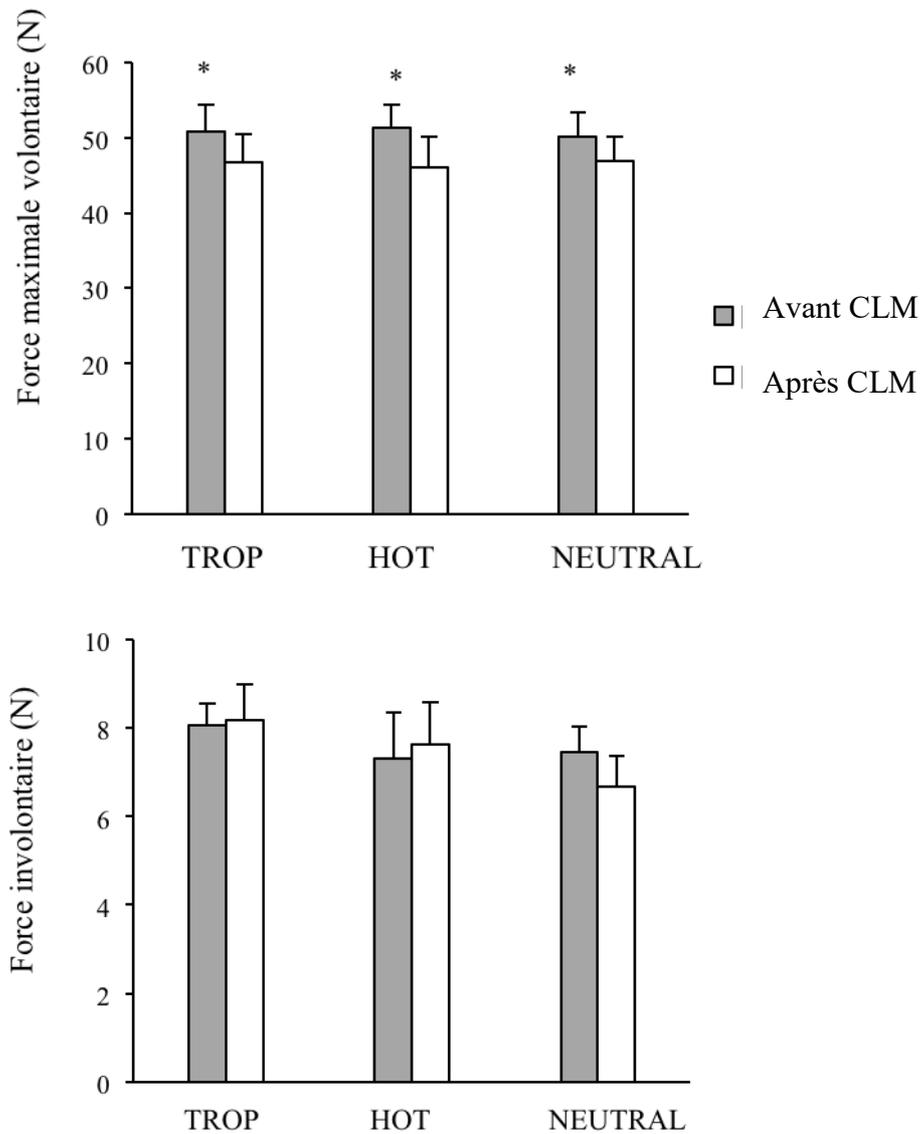


Figure 12. Force développée en kg par le muscle vaste latéral lors des contractions maximales volontaires (en haut) et lors de stimulations électromagnétiques via le nerf fémoral (en bas) avant (en gris) vs après le contre-la-montre (en blanc) en conditions tropicales (trop), chaudes (hot) et neutres (neutral). Moyennes \pm écart à la moyenne pour 10 sujets.

*Significativement différent de post CLM ($p < 0.01$)

Activité neuromusculaire pendant l'exercice dynamique

Il y avait un effet temps et un effet d'interaction temps-condition ($p < 0,05$). Autrement dit, l'évaluation de l'activité neuromusculaire dépend de la condition dans laquelle on se trouve.

Nous constatons sur la figure 13 que le %iEMG était plus faible en TROP qu'en NEUTRAL de 10 km à 20 km et plus faible en TROP qu'en HOT à 15 km et 20 km ($p < 0,05$).

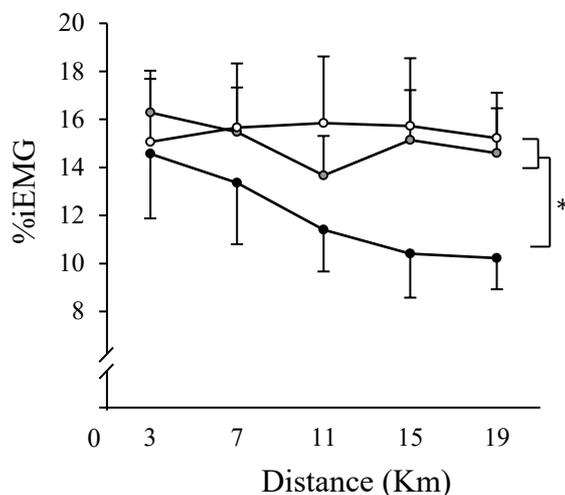


Figure 13. Electromyogramme intégré (iEMG) à partir du muscle vaste latéral à 3, 7, 11, 15 et 19 km au cours du contre-la-montre en conditions tropicales (en noir), chaudes (en gris) et neutres (en blanc). Moyennes \pm écart à la moyenne pour 10 sujets.

*Significativement différent de neutral ($P \leq 0.05$) †Significativement différent de hot ($P \leq 0.05$)

III. Niveau de difficulté perçue et réponses

thermorégulatrices

Niveau de difficulté perçue:

Nous avons montré que NDP a été affecté par le temps et a augmenté au fil du temps dans les trois conditions ($p < .01$), comme le présente la figure 14 a. De plus, NDP a été affecté par la condition ($p = .002$), NDP en TROP était significativement supérieur à NDP en NEUTRAL ($p = .006$) et significativement supérieur à NDP en HOT ($p = .025$), mais il n'y avait pas de différence significative du NDP entre les conditions NEUTRAL et HOT.

Température centrale :

Il y avait un effet temps ($p < .001$), un effet condition ($p = .015$) et la TR a été affectée par un effet d'interaction temps-condition ($p = .046$). Nous avons montré comme indiqué par la figure 14 b, que T_C en TROP était supérieure à T_C en NEUTRAL à Km 15 et à Km 20 et était supérieure à T_C en HOT à Km 20 ($p < .05$).

Température cutanée :

Il y avait un effet temps ($p < .001$), un effet condition ($p < .001$) et la T_{cut} a été affectée par un effet d'interaction temps-condition ($p = .005$). T_{cut} en TROP et HOT était supérieure à T_{cut} en NEUTRAL pendant toute la durée du CLM et T_{cut} en TROP était supérieure à T_{cut} en HOT à Km 15 et à Km 20 ($p < .01$) comme indiqué sur la figure 14 c.

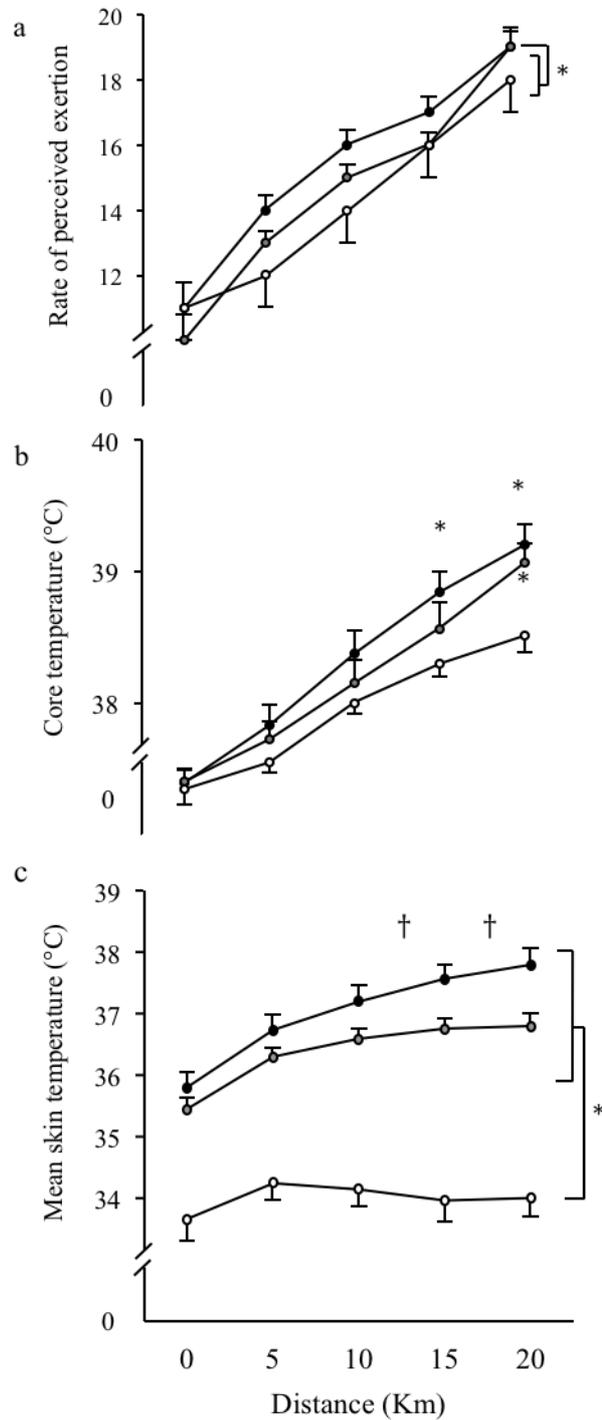


Figure 14. Niveau de difficulté perçue (a), température centrale (b) température cutanée (c) et taux de stockage de chaleur (d) à 0, 5, 10, 15 et 20 km au cours du contre-la-montre en conditions tropicales (en noir), chaudes (en gris) et neutres (en blanc). Moyennes \pm écart à la moyenne pour 10 sujets. *Significativement différent de neutral ($p < .01$) † TROP significativement différent de HOT ($p < .05$)

Stockage de chaleur :

Nous pouvons constater sur le graphe de la figure 15, un effet temps ($p < .001$), un effet condition ($p < .001$) et un effet d'interaction temps-condition ($p = .005$) concernant le stockage de chaleur (Qs). Nous avons montré que Qs était inférieur au Km15 et Km20 par rapport au

Km5 dans toutes les conditions (effet temps, $p < .001$) Q_s en CT et CS étaient significativement supérieur à Q_s en CN ($p < .01$), mais il n'y avait pas de différence significative de Q_s entre HOT et TROP.

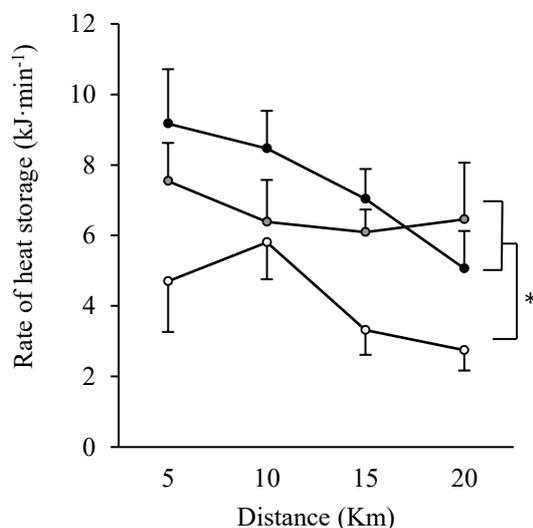


Figure 15. Taux de stockage de chaleur à 5, 10, 15 et 20 km au cours du contre-la-montre en conditions tropicales (en noir), chaudes (en gris) et neutres (en blanc). Moyennes \pm écart à la moyenne pour 10 sujets. *Significativement différent de neutral ($p \leq .01$) † TROP significativement différent de HOT ($p \leq .05$)

IV. Rythmes cardiaques

Comme illustré à la figure 16, FC a été affectée par le temps ($p < .001$) et par la condition ($p = .003$). Nous constatons que FC a augmenté de la même manière dans les trois conditions au fil du temps et que FC en TROP et HOT était significativement supérieure à FC en NEUTRAL.

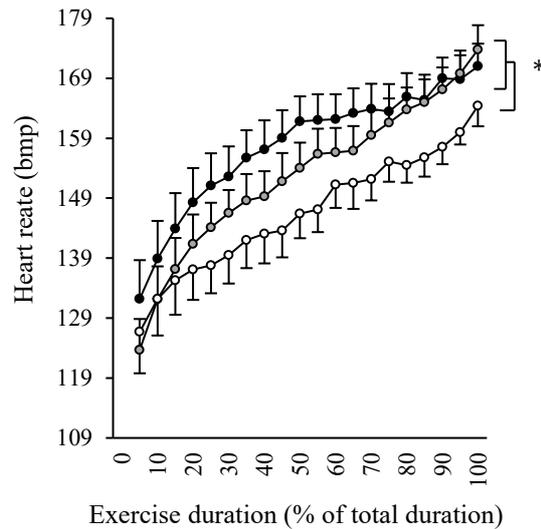


Figure 16. Fréquence cardiaque au cours du contre-la-montre (en pourcentage de la durée de l'exercice) en conditions tropicales (en noir), chaudes (en gris) et neutres (en blanc). Moyennes \pm écart à la moyenne pour 10 sujets.

**Significativement différent de neutre ($p < .01$)

V. Quantité d'eau ingérée et perte de poids

La perte de poids de corps, la quantité d'eau ingérée, le taux de perte de poids de corps et d'ingestion d'eau pendant les trois conditions sont présentés dans le tableau 9. Il n'y avait pas de différence significative dans le poids des sujets avant et après l'épreuve entre les trois conditions. La consommation d'eau et le taux d'ingestion d'eau en TROP et HOT étaient significativement supérieurs à NEUTRAL ($p < .005$). Les pertes de poids de corps et le taux de perte de poids de corps en TROP étaient significativement supérieurs à ceux en NEUTRAL ($p < .005$).

	tropical	hot	neutral	p
Change in body mass (kg)	1,9 \pm 0,3*	1,8 \pm 0,6	1,1 \pm 0,3	.027
Fluidintake (mL)	810 \pm 522**	975 \pm 1102 **	370 \pm 230	.002

Rate of mass loss (kg·h ⁻¹)	2,6 ± 0,5*	2,5 ± 0,9	1,7 ± 0,5	.017
Rate of water intake (L·h ⁻¹)	1,1 ± 0,6*	1,3 ± 1,2*	0,5 ± 0,3	.010

Tableau 8. Perte de poids corporel (kg), consommation d'eau (mL), taux de perte de poids (kg·h⁻¹) et d'ingestion d'eau (L·h⁻¹) au cours des CLM en conditions tropicales (tropical), chaudes (hot) et neutres (neutral). Moyennes ± écarts-types pour 10 sujets

***Significativement différent de neutral (p ≤ .05), **Significativement différent de neutral (p ≤ .01)**

PARTIE III - DISCUSSION GENERALE

La température ambiante élevée rencontrée en climat tropical est aggravée par un fort pourcentage d'humidité de l'air. Dans ces conditions, la thermorégulation, due aux faibles possibilités de thermolyse qu'offre le climat tropical, limite les performances à l'exercice aérobic (Voltaire et coll. 2003; Hue 2011). Cela est particulièrement vrai pour le trail étant donné la faible vitesse de progression et la faible convection, ce qui ne constitue pas un moyen efficace de perdre de la chaleur. La meilleure façon de parvenir à un équilibre entre le gain de chaleur et la dissipation de la chaleur dans ces conditions est de réduire la production de chaleur métabolique, c'est-à-dire l'intensité de l'exercice (Marino et coll. 2004). De plus, la déshydratation à l'exercice en climat chaud et sec peut conduire à une réduction du flux sanguin musculaire (Gonzalez-Alonso et coll. 1998). En climat chaud/humide, la l'évaporation de la sueur ne permet pas de réelle thermolyse et va qui plus est, déshydrater les athlètes réalisant un exercice de longue durée (Maughan et coll. 2012), ce qui est néfaste pour la performance aérobic (Kenefick et coll. 2010).

Prise hydrique

Quelles que soient les performances des coureurs, nous n'avons pas constaté de cas de déshydratation dans les études 1 et 2, comme confirmé par l'absence de changement significatif dans l'osmolalité urinaire des sujets. Dans l'étude 3, nous n'avons pas réalisé de prélèvement urinaire, car les sujets étaient autorisés à *boire ad libitum* et les coureurs devaient ingérer 600 mL de boisson avant d'arriver au laboratoire. De plus, l'épreuve à réaliser sur le CLM n'excédait pas une heure. Ces résultats suggèrent deux points importants : (1) la

modalité "*ad libitum*" semble être un moyen efficace pour maintenir l'euhydration parmi les coureurs rapides et lents et (2) les coureurs les plus rapides semblent en mesure de maintenir un taux métabolique élevé tout au long du parcours, tout en étant moins hydratés que les coureurs les plus lents. Il a été rapporté dans la littérature, que des pertes de masse corporelle de 2 kg peuvent se produire avant que les effets attendus de la perte d'eau soient détectables dans l'urine (Noakes 2007). Les auteurs évoquent l'existence d'un volume d'eau libre dans le tractus gastro-intestinal, ce qui suggère que les coureurs pourraient réduire le volume d'eau dont ils ont besoin pour réaliser de telles compétitions en plein air. En effet, même si ils n'ont pas pris de grandes quantités d'eau, en particulier chez les coureurs les plus rapides qui ont également perdu plus d'eau, le niveau d'hydratation de nos coureurs est resté dans les limites physiologiques, comme l'ont montré les échantillons d'urine. La moyenne relative de prise hydrique ($WI \cdot h^{-1}$) était de $0,6 \pm 0,3 L \cdot h^{-1}$. Ces résultats sont en accord avec les recommandations actuelles de l'American College of Sports Medicine (Sawka et coll. 2007), qui encourage les coureurs à boire 0,4 à 0,8 $L \cdot h^{-1}$ pendant l'exercice, en particulier dans des conditions tropicales. Ce taux de consommation d'eau relativement faible est plus élevé que pour une course sur route de 21 km dans un environnement chaud et humide, i.e. $0,25 L \cdot h^{-1}$ (Byrne et coll. 2006). Néanmoins, les coureurs dans notre étude n'ont pas maintenu leur poids de corps dans la fourchette actuellement recommandée de - 2 % par l'ACSM ($-2,6 \% \pm 1,6\%$) et cela n'a pas eu d'incidence sur les performances, même parmi les coureurs les plus rapides. Dans l'étude 3, le taux d'ingestion d'eau en $L \cdot h^{-1}$ était de 1.1 ± 0.6 , 1.3 ± 1.2 , 0.5 ± 0.3 en climat tropical, chaud et sec, et neutre, respectivement. Par ailleurs, nous avons mis en évidence que le taux d'hydratation des athlètes étaient plus élevés en climat tropical et chaud et sec, qu'en climat neutre ($p=0.010$), ceci vraisemblablement, afin de compenser les pertes en eau liées au taux de sudation plus important en conditions chaudes. Si l'on compare les valeurs entre les études de terrain et celle de laboratoire, il est intéressant de souligner que lors du CLM, les cyclistes ont tendance à boire plus, peut-être parce que l'eau est facilement disponible et que le fait de boire ne constitue pas une perte de temps sur un ergocycle. Ils ont

tendance à boire moins en compétition, car cela perturbe la vigilance et constitue une perte de temps. Nous pouvons mettre ces résultats en rapport avec ceux mis en évidence lors de courses de marathon chez des athlètes de haut-niveau. Dans des conditions écologiques, il a démontré que les marathoniens les plus performants ont bu "ad libitum" (selon ce que leur dicte la soif) pour moins de 60 s, à un taux d'ingestion de liquide extrapolé de $0,55 \pm 0,34 \text{ L}\cdot\text{h}^{-1}$, suggérant que les meilleurs coureurs étaient ceux qui passent le moins de temps à boire et qui ingèrent les plus faibles volumes de fluide (Beis et coll. 2012). Ainsi, dans les activités « outdoor », le maintien de l'équilibre hydrique ne semble pas indispensable pour le maintien de la fonction physiologique (Noakes 2003). Pour conclure sur les stratégies d'hydratation, la modalité "ad libitum" a été démontrée comme efficace et permettant d'assurer un taux optimal d'absorption de liquide, aussi bien en laboratoire que sur des expérimentations écologiques (Dugas et coll. 2009).

Perte de masse corporelle

Dans l'étude 3, le taux de BML était significativement plus élevé en climat tropical et chaud qu'en climat neutre ($p=0,017$). De récentes études réalisées en conditions écologiques ont indiqué que la perte de masse corporelle n'est pas directement liée à la diminution de la performance aérobie (Beis et coll. 2012). Dans l'étude 1, nous avons rapporté que les athlètes qui déclaraient une plus faible sensation thermique, ont également perdu plus d'eau pendant le trail de 27 km, avec une diminution de $3,9 \pm 1,1\%$ de perte de masse corporelle. Les résultats de plusieurs études de terrain, notamment en compétition, sont en contradiction avec les conclusions d'études réalisées en laboratoire. En outre, Sharwood et coll. (Sharwood et coll. 2004) ont spéculé que si le coureur n'a pas soif, un niveau de "déshydratation" allant même jusqu'à -11% de la masse corporelle (BM) pourrait ne pas altérer la performance physique. Le fait de porter de l'eau sur un trail est une charge supplémentaire et les coureurs ont donc tendance à en emporter le moins possible. La modalité "ad libitum" dans ce cas serait certainement suffisante pour maintenir les variables physiologiques, même dans des

conditions tropicales (Noakes 2007). De même, dans l'étude 2, lors d'un half-Ironman en climat chaud et humide, nous avons montré que les athlètes ne maintiennent pas leur masse corporelle dans la norme actuellement recommandée, mais que pour autant, les sujets n'étaient pas déshydratés à l'arrivée (Shirreffs&Maughan, 1998). Enfin, dans l'étude 2, nous avons observé une diminution de la BML de $2,6 \pm 0,5 \text{ kg}\cdot\text{h}^{-1}$ lors du CLM en TROP (équivalent à $2,7 \pm 0,5\%$ de perte de masse corporelle). Ce résultat indique par ailleurs, que bien que l'évaporation de la sueur soit inefficace, la sudation ne cesse ou ne diminue pas, même chez les sujets acclimatés.

Conditions environnementales

Les conditions environnementales représentées par l'indice WBGT lors de l'étude 1 et 2 étaient respectivement de $23,6 \pm 0,9 \text{ }^\circ\text{C}$ et $25,2 \pm 0,1 \text{ }^\circ\text{C}$. Des températures plus élevées sont attendues en environnement tropical, mais cette valeur est une mesure composite de la température ambiante, de l'humidité et la charge solaire pendant la course en conditions écologiques. En conséquence, le stress thermique, comme indiqué à la fois par la T_c et ST , était moindre pour les athlètes les plus lents, qui ont donc terminé le parcours dans un environnement plus frais que celui subi par les coureurs les plus rapides, aussi bien en trail que lors du half-Ironman. En effet, Parise et Hoffman [18] ont noté que, parce que les sentiers sont parfois difficiles en trail, les courses se déroulent sur une période de temps prolongée par rapport aux marathons, faisant fluctuer de manière importante les températures ambiantes du début à la fin de la course. Dans l'étude 3, nous avons obtenu des valeurs de WBGT équivalentes à $19,7 \pm 0,5 \text{ }^\circ\text{C}$ en climat neutre, $27,6 \pm 1,1 \text{ }^\circ\text{C}$ en climat chaud et sec et $29,4 \pm 0,6 \text{ }^\circ\text{C}$ en climat tropical. Dans ces conditions standardisées, nous avons obtenu des valeurs de WBGT en climat tropical plus importantes qu'en environnement extérieur. Cette différence s'explique par une moindre fluctuation de T_a dans notre étude 3, située aux alentours de $30 \text{ }^\circ\text{C}$ (i.e. $29,7 \pm 0,5$) et un taux d'humidité de l'air également supérieur par rapport à ceux rencontrés au mois de janvier en Guadeloupe ($90,4 \pm 6,5 \%$).

Poids des athlètes

Les résultats ont aussi montré que plus les coureurs étaient rapides et plus ils étaient légers au départ. Dans une étude comparant des coureurs à pied, Marino et coll. ont montré que les athlètes Africains plus légers produisent et stockent moins de chaleur du fait d'une plus faible MM par rapport à des coureurs Caucasiens plus lourds et plus grands. Même s'ils ne disposent pas d'une grande surface leur permettant de multiplier les échanges avec l'environnement, ceci leur confère un avantage en climat tropical. En effet, la dissipation de chaleur y est rendue très limitée du fait d'un fort pourcentage d'humidité de l'air et les gains de chaleur accrus dus à une T_a élevée. De ce fait, les auteurs mettent en évidence qu'en conditions chaudes et humides, les Africains de taille et de MM moindres, sont capables de courir plus vite que les Caucasiens en raison d'une moindre production de chaleur métabolique (environ $1,5 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ plus vite et pour un même niveau d'acclimatation (Marino et coll. 2004). Ceci pourrait expliquer que plus nos sujets étaient légers, plus ils étaient rapides. Nous n'avons pas mis en évidence cette corrélation lors de l'étude 3. Cela est probablement lié au fait que dans l'étude de laboratoire, il s'agit de cyclisme, où l'athlète ne doit pas porter son poids contrairement à la course à pied. Une moindre masse pourrait constituer un avantage en situation écologique, sur un parcours comportant du dénivelé, ce qui n'est pas le cas de notre CLM sur ergocycle.

L'altération de la performance aérobie à la chaleur serait liée à une augmentation significative de la T_c jusqu'à des valeurs critiques et responsable de perturbations homéostasiques. Mais, certains auteurs avancent que cette fatigue périphérique ainsi provoquée et impliquée dans l'incapacité du muscle à maintenir une contraction à une intensité donnée (Nybo & Nielsen 2001a), ne seraient pas la cause de la baisse des performances aérobies en environnement chaud, mais qu'il s'agirait plutôt d'une «fatigue centrale» (Nybo & Nielsen 2001). Celle-ci se traduit par une diminution de la stimulation au niveau du motoneurone périphérique, mais aussi une altération de la commande motrice à

l'étage cortical et/ou spinal. L'étude de la part du cortex moteur primaire et des mécanismes spinaux dans la causalité de la fatigue font l'objet de nombreuses publications récentes (McNeil et coll. 2009; Kennedy et coll. 2014), mais elle n'est pas encore déterminée.

Concernant l'hypothèse qui implique l'atteinte d'une température critique conduisant à l'épuisement (Gonzalez-Alonso et coll. 1999; Walters et coll. 2000), elle n'a pas été corroborée par nos études, puisque les sujets ont terminé les épreuves sans atteindre une T_C critique, comme présenté ci-dessous.

Température centrale

Même si le climat tropical a été démontré délétère à la performance aérobie en augmentant le stockage de la chaleur, nous n'avons pas observé dans l'étude 1, de fortes valeurs de T_C . En effet, T_{C11} n'a pas dépassé une moyenne de $38,5 \pm 1,1^\circ\text{C}$, avec une valeur maximale individuelle relevée de $39,9^\circ\text{C}$. De plus, il faut noter que cette valeur a diminué de $1,5^\circ\text{C}$ (i.e., $38,3 \pm 0,9^\circ\text{C}$) après K11. Ce chiffre est inférieur aux valeurs observées après une course sur route de 21 km dans des conditions environnementales chaudes et humides (Byrne et coll. 2006). Lors de l'étude 2 sur le half-Ironman, les valeurs moyennes de T_C ont atteint $37,1 \pm 0,7^\circ\text{C}$ au départ de la course, $37,8 \pm 0,9^\circ\text{C}$ après la natation, $37,8 \pm 1,0^\circ\text{C}$ après le vélo, et $38,4 \pm 0,7^\circ\text{C}$ après la course à pied.

Les moyennes de TR atteintes lors de l'étude 3 étaient de $38,5 \pm 0,4^\circ\text{C}$ en climat neutre, $39,1 \pm 0,5^\circ\text{C}$ en climat chaud et sec et $39,2 \pm 0,5^\circ\text{C}$ en climat tropical. Ces valeurs de TR ne peuvent être considérées comme "critiques" (i.e. $T_C > 40^\circ\text{C}$, Fig. 15) et pouvant conduire à un échec de l'homéostasie. Les sujets n'ont par ailleurs présenté aucun signe de coup de chaleur à la fin des CLM.

Cependant, il est difficile de comparer les valeurs de T_C obtenues dans les trois études, puisque les distances et les disciplines sont différentes et que les valeurs de TR correspondent également à un WBGT plus important dans notre étude 3. En revanche, le fait que, dans toutes les études, aucun sujet n'ait présenté de symptômes liés au coup de chaleur, nous

indique que l'hypothèse de l'atteinte d'une température plafond ne semble pas expliquer les mécanismes de régulation de l'intensité de l'exercice. Au contraire, nous avons mis en évidence lors de l'étude 1, que plus les coureurs étaient rapides et plus ils ont expérimenté un delta de T_C élevé entre le début et la fin du trail. Des auteurs ont mis en évidence que la capacité à supporter un taux d'accumulation de chaleur pourrait être un déterminant important de la performance à l'exercice en environnement chaud (Tucker et coll. 2004). La capacité de soutenir une température centrale élevée est probablement l'un des paramètres de la performance en climat tropical. Nos résultats sont cohérents avec les observations des athlètes bien entraînés qui réalisent des performances de haut-niveau sur des compétitions sportives internationales, malgré la présence de T_C élevées (Hue 2011). Nous avons mesuré que les coureurs les moins performants sont ceux qui ont évalué un taux de chaleur élevé sur l'échelle sans avoir encore atteint une T_C élevée. Ce mécanisme d'anticipation permettrait d'éviter une augmentation du stockage de chaleur chez les coureurs les plus lents afin de protéger le sujet de l'hyperthermie, comme l'explique la théorie de la régulation d'anticipation et d'évitement (Lee et coll. 2010). Ainsi, une autre tentative d'explication de la baisse de performance aérobie impliquant le système nerveux central, propose que le sujet réduit la puissance de l'exercice pour limiter l'augmentation de la T_C et éviter l'hyperthermie et ses conséquences sur l'homéostasie. En effet, certains auteurs avancent que le sujet va réduire la puissance de l'exercice par anticipation, contenant ainsi la production de chaleur métabolique, en raison de la contrainte thermique environnementale, même si sa T_C n'a pas encore atteint des valeurs critiques (Marino et coll. 2004; Tucker et coll. 2004).

Paramètres psychologiques

Dans notre étude 3, il est intéressant de souligner que le NDP, paramètre subjectif déclaré par le sujet, était significativement supérieur en climat tropical par rapport au climat chaud et sec et par rapport au climat neutre ($p < 0,05$). Des auteurs ont rapporté une corrélation positive entre le NDP au cours d'un exercice dynamique et la T_C (Galloway & Maughan 1997;

Nybo & Nielsen 2001b). Par ailleurs, la performance était plus faible en climat tropical et chaud et sec par rapport à neutre, tout en ayant un NDP plus élevé en climat tropical par rapport au climat chaud et sec. Ainsi, l'exercice du CLM en climat tropical est perçu comme plus difficile par les sujets. Nous allons passer en revue les facteurs physiologiques qui pourraient témoigner de cette contrainte plus importante du climat chaud et humide.

Fatigue et performance

Dans l'étude 3, nous avons mis en évidence une altération des CMV par l'exercice (Fig. 12). Or, lors des stimulations électromagnétiques du nerf fémoral, la force produite au niveau du muscle vaste latéral est restée inchangée par l'exercice. Nous pouvons en déduire que la fatigue périphérique ne semble pas être la cause de l'altération des MVC après le CLM. Il a été démontré que la fatigue périphérique, définie comme la diminution de la capacité des muscles à produire une force, ne serait pas la cause directe de la baisse de la performance aérobie, mais que la «fatigue centrale» pourrait en être responsable (Nybo & Nielsen 2001). En effet, l'évaluation de l'activité neuromusculaire réalisée pendant l'exercice par EMG intégrée, montre que cette activité est dépendante de la condition dans laquelle est réalisée l'exercice. Autrement dit, %iEMG (qui est le rapport de l'iEMG sur la moyenne de la force maximale produite lors des MVC) en climat tropical, était inférieur au %iEMG en climat neutre du 11^{ème} au 19^{ème} km, et inférieur au %iEMG en climat chaud et sec du 15^{ème} au 19^{ème} km. Cette baisse de l'activité neuromusculaire serait liée à une baisse de la commande motrice centrale au niveau cortical et/ou spinal, puisque les CI n'ont pas été affectées par l'exercice. Il faut souligner que T_C était significativement plus élevée en climat tropical qu'en neutre à partir du 15^{ème} Km et qu'en climat chaud et sec à la fin du CLM. Il y a donc une baisse de l'activité neuromusculaire qui se produit en TROP bien avant que les T_C soient différentes entre les 3 conditions. T_C est généralement considérée comme ayant un impact plus important que T_{cut} sur l'altération de la performance aérobie (Sawka et coll. 2011). En effet, un 1 °C de variation de la T_C provoque une variation de ~ 70% à 90% dans la réponse

circulatoire au niveau de la peau et du taux de transpiration dans la régulation des mécanismes de thermorégulation (Roberts et coll. 1977). Néanmoins, au cours de l'exercice à la chaleur, une élévation de la T_{cut} ne va pas seulement déclencher des mécanismes de thermorégulation, mais pourrait initier des signaux afférents issus des thermorécepteurs situés dans les tissus cutanés, qui pourraient être responsables de la perception thermique et donc, influencer la thermorégulation. Il a été montré qu'une corrélation entre une T_{cut} élevée et l'inconfort thermique pourrait jouer un rôle important dans la sélection de l'intensité lors d'un exercice prolongé (Schlader et coll. 2011). Dans notre étude, nous avons trouvé que T_{cut} était plus élevée en climat tropical et chaud et sec par rapport au climat neutre, et en climat tropical par rapport au climat chaud et sec entre 15 et 20 km (Fig. 5). Une augmentation de T_{cut} (plus importante en climat tropical) pourrait ainsi générer un signal afférent au niveau du SNC, responsable d'une réduction dans le recrutement des unités motrices des muscles squelettiques. Ceci pourrait expliquer la diminution du % iEMG en climat tropical par rapport au climat neutre à 11, 15 et 19 km, et par rapport au climat chaud et sec, à 15 et 19 km. En effet, il a été suggéré que le CNS combine plusieurs signaux afférents de différents systèmes impliquant le cœur, le système respiratoire, les muscles et les thermorécepteurs, et ajuste la commande motrice afin de protéger l'intégrité de l'organisme lors de l'exercice (Kayser 2003). L'élévation de T_{cut} est proportionnelle à l'augmentation de T_a (Galloway & Maughan 1997) et T_c augmente avec la production métabolique, i.e. l'intensité de l'exercice. Par conséquent, le gradient de température entre T_c et T_{cut} sera toujours plus faible en environnement chaud par rapport à un environnement tempéré. En outre, il est probable que les températures des muscles squelettiques actifs soient constamment plus élevées au cours de l'exercice dans un environnement chaud. Par conséquent, la fatigue induite par hyperthermie peut être associée avec une variété de différences d'élévations de température du corps (T_c , T_{cut} , T_{musc}) et l'augmentation des différentes combinaisons de températures corporelles pourrait être responsable d'une altération de la performance aérobie. C'est pourquoi il faut envisager une approche plurifactorielle dans l'étude des mécanismes responsables de l'apparition de la

fatigue à l'exercice prolongé. Une limitation de notre travail dans l'étude 3, est que la température interne du muscle vaste latéral n'a pas pu être mesurée. Elle pourrait fournir des indications supplémentaires dans la compréhension des mécanismes responsables de l'émergence de la fatigue, notamment d'un point de vue thermodynamique.

Une autre limite dans cette étude est l'absence de convection (par un ventilateur par exemple) qui empêche la thermolyse. Nous avons montré, dans notre deuxième expérimentation, que le stockage de chaleur durant un half-Ironman était en lien direct avec l'activité réalisée. En effet, la figure 10 permet de mettre en évidence un équilibre entre la thermolyse et la thermogénèse liée à l'exercice de pédalage en vélo. Ainsi, la vitesse de progression importante en cyclisme a permis de limiter le stockage de chaleur grâce à la convection, contrairement aux phases de natation ou de course à pied.

Pour conclure, les CMV ont été affectées par l'exercice, mais les CI n'ont pas subi d'altération suite au CLM, quelle que soit les conditions. Ainsi, la diminution de force produite lors des MVC n'est pas imputable à une fatigue périphérique. D'autre part, le %iEMG, qui reflète l'activité neuromusculaire du vaste latéral, était moins élevé en climat tropical par rapport au climat neutre à partir du 11ème km et par rapport au climat chaud et sec à partir du 15ème km. La vitesse la plus élevée sur le CLM a été enregistrée dans les derniers 10% du CLM dans les trois conditions, conformément aux études précédentes (Kay et coll. 2001; Tatterson et coll. 2000). Par conséquent, les sujets avaient la capacité de produire une puissance maximale à la fin du CLM et d'après cette observation, la fatigue périphérique rencontrée par les sujets ne semble pas suffisante pour expliquer la limitation de la performance des sujets en climat chaud et sec et chaud et humide.

Nous pouvons conclure qu'un moindre recrutement des unités motrices semble être à l'origine de la baisse de performance en climat tropical. Ces diminutions ont eu lieu bien avant que la TR ait atteint 40 °C. La diminution de l'activité iEMG en climat tropical avant l'atteinte d'une T_c critique (Nielsen et coll. 2001) est similaire aux résultats d'études précédentes (Tucker et coll. 2004). Cependant, la vitesse de pédalage de nos sujets a également augmenté au cours du

dernier kilomètre, lorsque la T_C était la plus élevée. Cette observation conduit à écarter l'hypothèse d'une fatigue périphérique suffisante pour être responsable d'une baisse de puissance. Nous ne connaissons pas les mécanismes qui permettent au cerveau d'opérer un contrôle sur le recrutement musculaire, mais il semble que l'augmentation de T_C et/ou de la T_{cut} , comme indiqué précédemment, est un indicateur des possibilités restantes de thermorégulation (Morrison et coll. 2004).

CONCLUSION

Nos études ont mis en évidence que les stratégies d'hydratation des compétiteurs leur permettaient de s'hydrater correctement, sans connaître de déshydratation au cours ou à l'arrivée des épreuves. Nous avons confirmé que (1) plus les athlètes sont rapides et moins ils ingèrent des volumes d'eau importants et plus ils tolèrent une T_{c} élevée, (2) plus les athlètes sont lourds et plus ils acceptent un important stockage de chaleur. En conditions standardisées, nous avons montré que la fatigue périphérique seule ne permet pas d'expliquer la baisse de la performance aérobie et qu'il semblerait que l'inflexion de la puissance de l'exercice survienne de manière anticipatoire. Ainsi, sur une épreuve de 20 km CLM sur ergocycle, les sujets de notre étude ont réalisé une performance moins bonne en climat tropical et chaud et sec par rapport à celle réalisée en climat neutre. Nous avons suggéré que (1) l'altération de la performance en climat tropical était liée à un moindre recrutement des unités motrices, (2) que l'augmentation de T_{c} et/ou de la T_{cut} constitue un indicateur des possibilités restantes de thermorégulation pour l'organisme. Récemment, Amannet coll. (Amannet coll., 2010, Amann, 2012) ont montré que des afférences issues des groupes musculaires III et IV pourraient influencer la fatigue centrale pendant les contractions isométriques maximales ou dans un exercice dynamique à cadence libre en inhibant l'entraînement du cortex moteur. D'autres protocoles combinant plusieurs signaux afférents de différents systèmes impliquant le cœur, le système respiratoire, les muscles et les thermorécepteurs doivent être élaborés, pour comprendre comment le CNS ajuste la commande motrice afin de protéger l'intégrité de l'organisme lors de l'exercice.

PERSPECTIVES

Les femmes, en raison de leur faible masse musculaire et leur moindre taux de sudation par rapport aux hommes sont avantagées à l'exercice aérobien en condition chaude et humide. D'une part, une plus petite masse musculaire induit une plus faible production de chaleur (Marino et coll. 2000) et d'autre part, leur plus faible taux de sudation additionné à un seuil de sudation plus élevé pourrait malgré tout constituer un atout en climat tropical (Frye & Kamon 1983). En effet, la sueur ne permet pas d'évacuer la chaleur du fait de la saturation en humidité de l'air mais au contraire, induit une déshydratation du sujet susceptible d'altérer la performance. Alors que leurs moins bonnes performances aérobies dans ces conditions ont été attribuées à leurs difficultés de thermorégulation, cette altération de la performance serait essentiellement due à une moindre masse musculaire pour un poids identique, comparativement aux hommes (Wright et coll. 2002). Parmi les pistes de perspectives de notre travail de recherche, il nous semble par conséquent important de vérifier les capacités de thermorégulation des femmes en milieu chaud et humide.

Nous avons par ailleurs un projet de prototype destiné à limiter le taux de chaleur stockée par les athlètes sur les courses de trail et d'ultra-trail qui se développent en Guadeloupe en particulier, mais aussi en Europe sur la saison estivale. Il s'agit de mettre au point un gilet comprenant des vessies remplies de liquide congelé au départ de la course et qui fondrait au fur et à mesure de l'épreuve, par radiation et conduction (gilet en contact avec le dos et le sternum principalement). En plus de permettre à l'athlète de s'hydrater quelque soit le parcours, le port d'un gilet glacé pourrait retarder l'augmentation de la T_c . Ainsi, cet équipement permettrait de participer aux compétitions en répondant aux consignes de l'organisation (l'emport d'un minimum de volume d'eau est souvent rendu obligatoire), mais

aussi d'optimiser la performance, notamment en climat chaud ou tropical. Nous pourrions par la suite, si les résultats de nos recherches confirment l'impact positif de cette veste "hydro-refroidissante" sur la performance, l'étendre à des activités nautiques où le port du gilet de sauvetage est obligatoire.

PARTIE IV - TRAVAUX

I. Publications pour la thèse

Publication 1 (étude 1)

Fluid replacement strategy during a 27-Km trailrun in hot and humid conditions.

Baillot M., Le Bris S., Hue O.

Int J Sports Med. 2014 Feb;35(2):147-52. doi: 10.1055/s-0033-1349108. Epub 2013 Jul 18.

Fluid Replacement Strategy during a 27-Km Trail Run in Hot and Humid Conditions

Authors

M. Baillot¹, S. Le Bris², O. Hue³

Affiliations

¹Sports Science, Pointe-à-Pitre Cedex, UFRSTAPS-University of the FWI, Guadeloupe

²Laboratoire de Physiologie, Faculté de Médecine de Montpellier – Nîmes, Nîmes, France

³Laboratoire ACTES, Pointe à Pitre, Université des Antilles et de la Guyane, Guadeloupe

Key words

- heat
- humidity
- performance
- dehydration

Abstract

We evaluated the effects of the fluid replacement strategy on core temperature, heart rate and urine osmolality during a 27-km trail run in tropical climate. 20 well-trained runners completed a 27-km trail race in tropical conditions. They were acclimatized to these conditions. Heart rate was monitored every 5 s, while core temperature and perceived thermal and comfort sensations were recorded before, at the 11th km, and just after the end of the race. Water intake, urine osmolality and body mass were measured before and after the race. Core temperature and

the scores of perceived thermal and comfort sensations were significantly higher at the 11th km and at the end of the race compared to before the race, but not at the 11th km compared to before the race. No participant exhibited dehydration as assessed by urine osmolality. The less the trail runners weighed, the greater the heat retention was. The less hot they felt at the end of the race, the more they lost water, and the better the performance was. The fastest runners were able to tolerate a greater variation in core temperature between the beginning and the end of the trail race with lower water intake.

Introduction

Endurance exercise is impaired in the heat, with a reduction in stroke volume, cardiac output and brain and active muscle blood flow, as well as a progressive increase in body core and brain temperatures [7].

The high temperature of tropical climates is compounded by high atmospheric humidity. In these conditions, thermoregulation limits endurance performance [9]. This is especially true for trail running, as the running speed is slow and convection is not an effective way to lose metabolic heat production. The only way to achieve a match between heat gain and heat dissipation during outdoor running in these conditions is by reducing the metabolic heat production, thus the intensity of the workout [12]. In a tropical climate, where the humidity is high, sweating is much less effective in releasing body heat because evaporation is inefficient. Because of the high humidity, sweating does not allow heat loss and will increasingly dehydrate athletes performing aerobic exercise [13].

Noakes [17], however, suggested that in athletic field settings, maintaining fluid balance is not

essential to the maintenance of physiological function, contradicting previous findings that have been conducted in the confines of a laboratory. In environmental conditions, Noakes demonstrated that the most successful marathon runners drink fluid “*ad libitum*” (according to the dictates of thirst) for less than approximately 60 s at an extrapolated fluid ingestion rate of $0.55 \pm 0.34 \text{ L} \cdot \text{h}^{-1}$, suggesting that the best runners were those who spent less time drinking and who also ingested the lowest fluid volumes. Moreover, Sharwood et al. [20] speculated that if the runner is not thirsty, a level of “dehydration” even up to $-11\% \text{ BW}$ might not impair exercise performance. In trail running, carrying fluid is a weight penalty and runners thus tend to carry the least possible. The “*ad libitum*” drinking modality in this case would certainly be sufficient for maintaining the physiological variables even in tropical conditions [18].

The aim of the present study was therefore to evaluate the effects of an “*ad libitum*” fluid replacement strategy on performance, dehydration and thermoregulation during a 27-km trail run in hot and humid conditions.

accepted after revision
May 24, 2013

Bibliography

DOI <http://dx.doi.org/10.1055/s-0033-1349108>
Int J Sports Med 2013; 34:
1–6 © Georg Thieme
Verlag KG Stuttgart · New York
ISSN 0172-4622

Correspondence

Michelle Baillot
Sports Science
UFRSTAPS-University of the FWI
Campus de Fouillole
Pointe-à-Pitre Cedex
97159 Guadeloupe
Tel.: +590/590/483 172
Fax: +590/590/483 179
michellemainip@gmail.com

■ Proof copy for correction only. All forms of publication, duplication or distribution prohibited under copyright law. ■

Baillot M et al. Fluid Replacement Strategy during... Int J Sports Med 2013; 34: 1–6

Material and methods

Subjects

20 heat-acclimatized subjects performed a 27-km trail run in tropical conditions, i.e., $25.7 \pm 0.6^\circ\text{C}$; 78% relative humidity (rh). We recruited volunteers for this study by contacting Guadeloupean running clubs as well as international and regional runners who regularly participate in organized trail runs on the island. The mean (\pm SD) age, body mass, and height of the subjects were 39 ± 9.5 yrs, 72.9 ± 9.3 kg, 177.3 ± 7.4 cm, respectively.

Experimental procedures

All measurements were made on the day of the 2012 Trail des Châteaux in Saint-François, Guadeloupe (FWI). This 27-km event takes place over hilly terrain with many loose and sandy sections. Progress in some areas of the course can be difficult due to the vegetation. Core temperature (T_c) was measured before the race (K_0), at the 11th km (K_{11}), and just after the end of the race (K_{27}) with a CorTemp™ 2000 ambulatory remote sensing system (HQ Inc., Palmetto, FL, USA) using pills that were given at least 6 h before the race began, in line with previously reported guidelines [3]. A telemetric check was performed to ensure that the temperature sensor was inside each volunteer and transmitting a signal. The runners were asked to rate both their comfort sensation (CS) and thermal sensation (TS) on a scale at K_0 , K_{11} and K_{27} , respectively: CS_0 , CS_{11} , CS_{27} and TS_0 , TS_{11} , TS_{27} . The scores were determined on modified scales of 4 points [from 1 (comfortable) to 4 (very uncomfortable)] and 7 points [from 1 (slightly cool) to 7 (extremely hot)], respectively, for CS and TS [6].

They were asked to produce a urine sample for the analysis of urine osmolality. Naked body mass (BM) was measured to the nearest 0.1 kg using a digital scale (Seca 881, Seca Vogel & Halke GmbH & Co, Hamburg, Germany) at baseline (BM_0), recorded just before the race, and then again at the end of the race (BM_{27}). All backpacks filled with water at ambient temperature were weighed just before and just after the race. As water was available at K_{11} , the subjects were asked to assess the volume of water ingested at refreshment. The water intake (WI) was the addition of the water ingested from the backpack and at refreshment. The hydration status was assessed by the measure of urine osmolality ($\text{mosm} \cdot \text{kg}^{-1}$). The runners were fitted with a chest band and wristwatch HR monitor (PolarVantage, Polar Electro Oy, Kempele, Finland). The wet bulb globe temperature (WBGT) index was monitored for the duration of exercise (QUESTemp° 32 Portable Monitor, QUEST Technologies, Oconomowoc, WI, USA). The subjects were asked to follow their usual diet and to refrain from alcohol and caffeine for 24 h before the competition.

All gave informed written consent to participate in the study. The protocol was approved by the Ethics Committee of Guadeloupe University. In addition, this study has been performed in accordance with the ethical standards of the IJSM [8]. Permission for the present investigation was also given by the respective race organizers.

Statistical analysis

All statistical computations were performed using Systat 12. The assumption of normality based on skewness and kurtosis tests was confirmed and parametric tests were performed. The following variables, T_c , ΔT_c , COMF, TS, and HR, were analyzed using a one-way analysis of variance (ANOVA) with repeated measures. Pairwise contrasts were used when necessary to

Table 1 Anthropometric data representative of the body mass of the runners.

	K_0	K_{11}	K_{27}
core temperature ($^\circ\text{C}$)	37.3 ± 1.0	$38.5 \pm 1.1^*$	$38.3 \pm 0.9^*$
WBGT ($^\circ\text{C}$)	26.1 ± 0.0	23.6 ± 0.2	23.1 ± 0.0
thermal sensation (AU)	2.1 ± 1.1	$3.7 \pm 1.4^{**}$	$3.03 \pm 1.1^{**}$
comfort sensation (AU)	1.2 ± 0.5	$2.8 \pm 1.1^\dagger$	$2.7 \pm 0.9^\ddagger$
weight (Kg)	73.0 ± 9.3		$71.1 \pm 9.3^\ddagger$
urine osmolality ($\text{mOsm} \cdot \text{Kg}^{-1}$)	647.3 ± 262.0		614.6 ± 197.7

*Significantly different from start value ($p < 0.05$), **Significantly different from start value ($p < 0.05$), †Significantly different from start value ($p < 0.05$), ‡Significantly different from start value ($p < 0.05$)

determine where significant differences had occurred. Stepwise multiple linear regressions were used to determine the best predictor of performance. Data are displayed as mean \pm SD, and statistical significance was set at $p < 0.05$.

Results

• **Table 1** shows anthropometric data representative of the body mass of the runners.

Environmental conditions

Environmental WBGT averaged $23.6 \pm 0.9^\circ\text{C}$. The WBGT was significantly different at the beginning (26.1°C), at K_{11} ($23.6 \pm 0.2^\circ\text{C}$) and at K_{27} ($23.1 \pm 0.0^\circ\text{C}$). The average temperatures at K_{11} and K_{27} were assessed by taking into account the period of time between the first and last runners of the study.

Performance

The runners completed the trail in $196 \text{ min} \pm 58 \text{ min}$, corresponding to an average running speed of $8.4 \pm 1.4 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ (from $5.7 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ for rank 89 to $11.7 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ for rank 3). The performance expressed in speed was correlated with $\Delta T_{C27}/T_{C0}$ ($R^2 = 0.28$; $p < 0.016$) and $\text{TBWL} \cdot \text{h}^{-1}$ ($R^2 = 0.25$; $p < 0.002$; • **Fig. 1**), indicating that the faster they ran, the higher the $\Delta T_{C27}/T_{C0}$ was and the more they lost or did not gain in water. Performance was also inversely correlated with both WI ($R^2 = 0.25$; $p < 0.024$) and BM_0 ($R^2 = 0.26$; $p < 0.002$), indicating that the less they drank and the lighter they were, the faster they were. When stepwise multiple linear regression was applied, performance was significantly correlated with BM_0 , TS_{27} and $\Delta T_{C27}/T_{C0}$: $\text{Perf} (\text{m} \cdot \text{sec}^{-1}) = -0.026 \text{ BM}_0 - 0.118 \text{ TS}_{27} + 0.154 \Delta T_{C27}/T_{C0} + 4.516$; ($R^2 = 0.66$; $p < 0.001$; • **Fig. 2**). This correlation indicates that the fastest runners were those who were the lightest, with the lowest TS_{27} and the highest $\Delta T_{C27}/T_{C0}$.

Hydration and body mass

All subjects produced a urine sample, with urine osmolality of $647.3 \pm 262 \text{ mosm} \cdot \text{kg}^{-1}$ at K_0 and $614.6 \pm 197.7 \text{ mosm} \cdot \text{kg}^{-1}$ at K_{27} . The mean urine osmolality was not different between K_{27} and K_0 . The mean $\text{WI} \cdot \text{h}^{-1}$ was $0.6 \pm 0.3 \text{ L}$, and body water losses per hour ($\text{TBWL} \cdot \text{h}^{-1}$) was $1.2 \pm 0.4 \text{ L}$. BM_{27} was less than BM_0 ($p = 0.001$ $71.1 \pm 9.3 \text{ kg}$ vs. 72.9 ± 9.3). TBWL increased with greater $\Delta T_{C11}/T_{C0}$ ($R^2 = 0.39$; $p < 0.01$), a higher score on TS_{27} ($R^2 = 0.24$; $p < 0.03$), and greater BM_0 ($R^2 = 0.34$; $p < 0.01$). Stepwise multiple linear regression demonstrated correlations among TBWL , $\Delta T_{C11}/T_{C0}$ and BM_0 : $\text{TBWL} (\text{L}) = -0.548 \Delta T_{C11}/T_{C0} - 0.059 \text{ BM}_0 + 1.008$ ($R^2 = 0.64$; $p < 0.002$). This correlation

■ Proof copy for correction only. All forms of publication, duplication or distribution prohibited under copyright law. ■

Material and methods

Subjects

20 heat-acclimatized subjects performed a 27-km trail run in tropical conditions, i.e., $25.7 \pm 0.6^\circ\text{C}$; 78% relative humidity (rh). We recruited volunteers for this study by contacting Guadeloupan running clubs as well as international and regional runners who regularly participate in organized trail runs on the island. The mean (\pm SD) age, body mass, and height of the subjects were 39 ± 9.5 yrs, 72.9 ± 9.3 kg, 177.3 ± 7.4 cm, respectively.

Experimental procedures

All measurements were made on the day of the 2012 Trail des Châteaux in Saint-François, Guadeloupe (FWI). This 27-km event takes place over hilly terrain with many loose and sandy sections. Progress in some areas of the course can be difficult due to the vegetation. Core temperature (T_c) was measured before the race (K_0), at the 11th km (K_{11}), and just after the end of the race (K_{27}) with a CorTemp™ 2000 ambulatory remote sensing system (HQ Inc., Palmetto, FL, USA) using pills that were given at least 6 h before the race began, in line with previously reported guidelines [3]. A telemetric check was performed to ensure that the temperature sensor was inside each volunteer and transmitting a signal. The runners were asked to rate both their comfort sensation (CS) and thermal sensation (TS) on a scale at K_0 , K_{11} and K_{27} , respectively: CS_0 , CS_{11} , CS_{27} and TS_0 , TS_{11} , TS_{27} . The scores were determined on modified scales of 4 points [from 1 (comfortable) to 4 (very uncomfortable)] and 7 points [from 1 (slightly cool) to 7 (extremely hot)], respectively, for CS and TS [6].

They were asked to produce a urine sample for the analysis of urine osmolality. Naked body mass (BM) was measured to the nearest 0.1 kg using a digital scale (Seca 881, Seca Vogel & Halke GmbH & Co, Hamburg, Germany) at baseline (BM_0), recorded just before the race, and then again at the end of the race (BM_{27}). All backpacks filled with water at ambient temperature were weighed just before and just after the race. As water was available at K_{11} , the subjects were asked to assess the volume of water ingested at refreshment. The water intake (WI) was the addition of the water ingested from the backpack and at refreshment. The hydration status was assessed by the measure of urine osmolality ($\text{mosm} \cdot \text{kg}^{-1}$). The runners were fitted with a chest band and wristwatch HR monitor (PolarVantage, Polar Electro Oy, Kempele, Finland). The wet bulb globe temperature (WBGT) index was monitored for the duration of exercise (QUESTemp° 32 Portable Monitor, QUEST Technologies, Oconomowoc, WI, USA). The subjects were asked to follow their usual diet and to refrain from alcohol and caffeine for 24 h before the competition.

All gave informed written consent to participate in the study. The protocol was approved by the Ethics Committee of Guadeloupe University. In addition, this study has been performed in accordance with the ethical standards of the IJSM [8]. Permission for the present investigation was also given by the respective race organizers.

Statistical analysis

All statistical computations were performed using Systat 12. The assumption of normality based on skewness and kurtosis tests was confirmed and parametric tests were performed. The following variables, T_c , ΔT_c , COMF, TS, and HR, were analyzed using a one-way analysis of variance (ANOVA) with repeated measures. Pairwise contrasts were used when necessary to

Table 1 Anthropometric data representative of the body mass of the runners.

	K_0	K_{11}	K_{27}
core temperature ($^\circ\text{C}$)	37.3 ± 1.0	$38.5 \pm 1.1^*$	$38.3 \pm 0.9^*$
WBGT ($^\circ\text{C}$)	26.1 ± 0.0	23.6 ± 0.2	23.1 ± 0.0
thermal sensation (AU)	2.1 ± 1.1	$3.7 \pm 1.4^{**}$	$3.03 \pm 1.1^{**}$
comfort sensation (AU)	1.2 ± 0.5	$2.8 \pm 1.1^\dagger$	$2.7 \pm 0.9^\ddagger$
weight (Kg)	73.0 ± 9.3		$71.1 \pm 9.3^\ddagger$
urine osmolality ($\text{mOsm} \cdot \text{Kg}^{-1}$)	647.3 ± 262.0		614.6 ± 197.7

*Significantly different from start value ($p < 0.05$), **Significantly different from start value ($p < 0.05$), †Significantly different from start value ($p < 0.05$), ‡Significantly different from start value ($p < 0.05$)

determine where significant differences had occurred. Stepwise multiple linear regressions were used to determine the best predictor of performance. Data are displayed as mean \pm SD, and statistical significance was set at $p < 0.05$.

Results

• **Table 1** shows anthropometric data representative of the body mass of the runners.

Environmental conditions

Environmental WBGT averaged $23.6 \pm 0.9^\circ\text{C}$. The WBGT was significantly different at the beginning (26.1°C), at K_{11} ($23.6 \pm 0.2^\circ\text{C}$) and at K_{27} ($23.1 \pm 0.0^\circ\text{C}$). The average temperatures at K_{11} and K_{27} were assessed by taking into account the period of time between the first and last runners of the study.

Performance

The runners completed the trail in $196 \text{ min} \pm 58 \text{ min}$, corresponding to an average running speed of $8.4 \pm 1.4 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ (from $5.7 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ for rank 89 to $11.7 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ for rank 3). The performance expressed in speed was correlated with $\Delta T_{C27}/T_{C0}$ ($R^2 = 0.28$; $p < 0.016$) and $\text{TBWL} \cdot \text{h}^{-1}$ ($R^2 = 0.25$; $p < 0.002$; • **Fig. 1**), indicating that the faster they ran, the higher the $\Delta T_{C27}/T_{C0}$ was and the more they lost or did not gain in water. Performance was also inversely correlated with both WI ($R^2 = 0.25$; $p < 0.024$) and BM_0 ($R^2 = 0.26$; $p < 0.002$), indicating that the less they drank and the lighter they were, the faster they were. When stepwise multiple linear regression was applied, performance was significantly correlated with BM_0 , TS_{27} and $\Delta T_{C27}/T_{C0}$: $\text{Perf} (\text{m} \cdot \text{sec}^{-1}) = -0.026 \text{ BM}_0 - 0.118 \text{ TS}_{27} + 0.154 \Delta T_{C27}/T_{C0} + 4.516$; ($R^2 = 0.66$; $p < 0.001$; • **Fig. 2**). This correlation indicates that the fastest runners were those who were the lightest, with the lowest TS_{27} and the highest $\Delta T_{C27}/T_{C0}$.

Hydration and body mass

All subjects produced a urine sample, with urine osmolality of $647.3 \pm 262 \text{ mosm} \cdot \text{kg}^{-1}$ at K_0 and $614.6 \pm 197.7 \text{ mosm} \cdot \text{kg}^{-1}$ at K_{27} . The mean urine osmolality was not different between K_{27} and K_0 . The mean $\text{WI} \cdot \text{h}^{-1}$ was $0.6 \pm 0.3 \text{ L}$, and body water losses per hour ($\text{TBWL} \cdot \text{h}^{-1}$) was $1.2 \pm 0.4 \text{ L}$. BM_{27} was less than BM_0 ($p = 0.001$ $71.1 \pm 9.3 \text{ kg}$ vs. 72.9 ± 9.3). TBWL increased with greater $\Delta T_{C11}/T_{C0}$ ($R^2 = 0.39$; $p < 0.01$), a higher score on TS_{27} ($R^2 = 0.24$; $p < 0.03$), and greater BM_0 ($R^2 = 0.34$; $p < 0.01$). Stepwise multiple linear regression demonstrated correlations among TBWL , $\Delta T_{C11}/T_{C0}$ and BM_0 : $\text{TBWL} (\text{L}) = -0.548 \Delta T_{C11}/T_{C0} - 0.059 \text{ BM}_0 + 1.008$ ($R^2 = 0.64$; $p < 0.002$). This correlation

■ Proof copy for correction only. All forms of publication, duplication or distribution prohibited under copyright law. ■

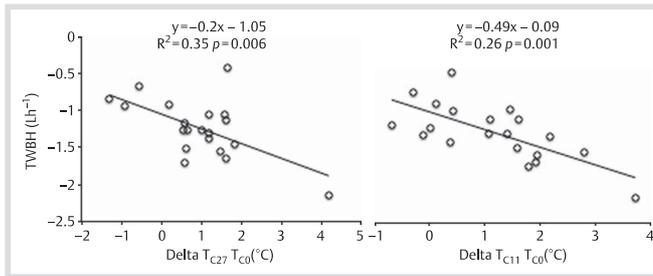


Fig. 3 Correlations between total body water loss (TBWL) and delta temperature (delta T_{c27}/T_{c0}) as well as delta temperature (delta T_{c11}/T_{c0}).

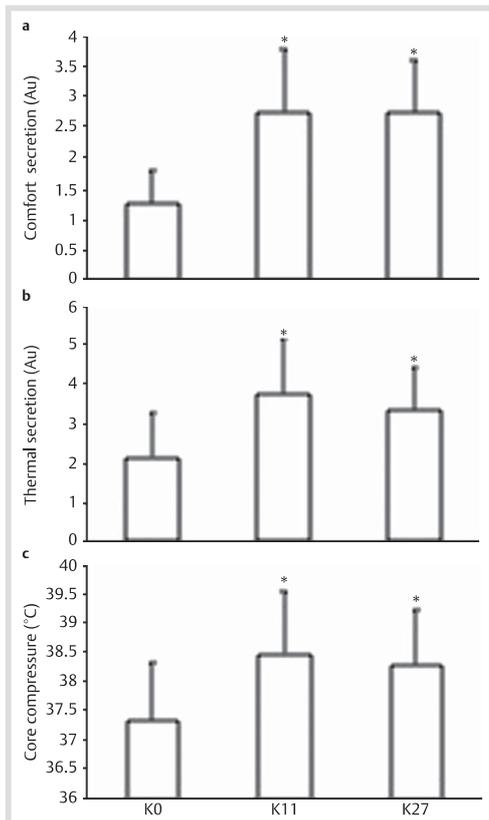


Fig. 4 a: Difference in comfort sensation (CS) between T_{c27}/T_{c0} and T_{c11}/T_{c0} . However, no significant difference was observed between T_{c27}/T_{c0} and T_{c27}/T_{c11} . *Significantly different from start value ($p < 0.05$). b: Difference in thermal sensation (TS) between T_{c27}/T_{c0} and T_{c11}/T_{c0} . However, no significant difference was observed between T_{c27}/T_{c0} and T_{c27}/T_{c11} . *Significantly different from start value ($p < 0.05$). c: Difference in core temperature (TC) between T_{c27}/T_{c0} and T_{c11}/T_{c0} . However, no significant difference was observed between T_{c27}/T_{c0} and T_{c27}/T_{c11} . *Significantly different from start value ($p < 0.05$)

Environmental conditions

The environmental conditions represented by WBGT were $23.6 \pm 0.9^\circ\text{C}$. Higher temperatures were expected in such tropi-

cal conditions, but this value was a composite measure of ambient temperature, humidity and solar load during the trail run. As a result, the heat stress as indicated by both core temperature and thermal sensation was less for the slower runners, who completed the trail in the evening when it was cooler, than the temperature experienced by the fastest runners, who completed the trail by 3 pm. Parise and Hoffman [19] noted that because these trails are difficult to run, the races take place over an extended time period compared with marathons. Therefore, ambient temperatures may fluctuate widely from the start to the finish of the race. Although the WBGT declined with the decrease in the radiant temperature, we can assume that because of the design of the trail, the majority of the race after K_{11} took place in the shade, resulting in almost no difference between the runners after 90 min of running.

Performance and core temperature

Despite longer finishing times for the slowest, the runners had an average heart rate of about 85% of age-predicted maximum, indicating a near-maximal effort. Even though the tropical climate has been shown to be detrimental to performance by increasing heat retention, we did not observe high values of T_c . The T_{c11} did not exceed an average of $38.5 \pm 1.1^\circ\text{C}$, with the highest individual value being 39.9°C , and decreased after K_{11} (i.e., in the evening: $38.3 \pm 0.9^\circ\text{C}$). This is lower than the values observed by Byrne et al. [2] after completion of a 21-km mass-participation road race in warm, humid environmental conditions.

The runners who completed the trail with the best performances were those who had the highest delta T_{c27}/T_{c0} . Tucker et al. [22,23] provided evidence that the rate of heat retention might be an important determinant of exercise performance in the heat. The capacity to support a high core temperature is probably one of the parameters of performance in tropical climate. Our findings are consistent with limited observations of well-trained athletes participating with apparent success in athletic events despite the presence of high core temperatures [10]. We can assume that the less trained runners were those who checked high heat on the scale without yet having reached high core temperature. This would prevent an increase in heat retention in the slower runners in order to protect the subject from hyperthermia, as explained by the theory of anticipatory regulation and avoidance [11]. Additionally, the heavier runners were those who were able to accept more heat before having an increased core temperature. This may explain the discrepancy between the perceived thermal sensation and the actual core temperature recorded at the same time.

The results thus showed that the fastest runners were those who were the lightest. Dennis and Noakes [5] described the advan-

■ Proof copy for correction only. All forms of publication, duplication or distribution prohibited under copyright law. ■

tage of a smaller body mass when distance-running in hot and humid conditions. At any given speed, the absolute metabolic heat production of lighter runners is less than that of heavier runners. Given the uncompensably hot environment, and because the only way to limit heat retention is to limit heat production, a smaller BM confers an advantage especially in trail running with differences in altitude. Also, a reduction of close to 5% of body mass may be sufficient for reducing the energy cost of running, conferring another performance advantage [14].

Hydration

Water intake

Regardless of the runners' performances, there were no cases of dehydration, as confirmed by the lack of significant change in urine osmolality. Nonetheless, performance was not negatively affected by dehydration status, but was significantly correlated with TBWL. These results suggest 2 important points: (1) "ad libitum" drinking seems to be an efficient means to maintain euhydration in both fast and slow runners, and (2) faster runners seem to display a range in "dehydration" states and are able to sustain a high metabolic rate throughout a trail run while being less hydrated than slower runners. Thus, body mass losses of 2 kg may occur before any of the expected effects of water loss are detectable in urine [18]. This indicates that a fluid volume exists as free water in the gastrointestinal tract or as water complexed to glycogen, suggesting that runners could reduce the volume of water they need to carry for such outdoor competitions. In fact, although they did not take large amounts of water, especially the faster runners, who also lost more water, the hydration level of our runners remained within the physiological boundaries, as shown by the urine samples. The mean relative $WI \cdot h^{-1}$ was $0.6 \pm 0.3 L \cdot h^{-1}$. Our data are in direct agreement with the current recommendations of the American College of Sports Medicine [1], which encourages runners to drink 0.4 to $0.8 L \cdot h^{-1}$ while exercising, especially in tropical conditions. This low water intake rate is more than in the study of Byrne et al. [2] for a 21-km road race in a warm and humid environment, who noted a mean of $0.25 L \cdot h^{-1}$. Nevertheless, the runners in our study did not maintain their BM within the current recommended range of 2% ($2.6\% \pm 1.6\%$), and this did not affect the performances even among the fastest runners.

Body water losses

The average $TBWL \cdot h^{-1}$ ($1.2 \pm 0.4 L \cdot h^{-1}$) was in the range reported by previous studies for performances in tropical environment, i.e., $1.47 L \cdot h^{-1}$ [2] et al. and $1.45 L \cdot h^{-1}$ [10], for a BM loss of $5.4 \pm 1.3\%$. Such a deficit in TBWL is suggested to be beyond the normal TBWL fluctuation and has been demonstrated to negatively affect aerobic exercise. However, this decrease in performance has always been demonstrated in subjects dehydrated before exercise, contrary to our present study, where the subjects began the trail euhydrated (as reflected by the urine osmolality noted before the race). The faster runners lost more BM compared to slower runners, who also drank more. Fluid intake is generally less than sweat loss, leading to some degree of fluid deficit, especially among faster runners [15]. This suggests that the fastest runners lost fluid because they did not drink and did not sweat that much, while the slower runners drank and/or sweated more. The best reasoning is that drinking extra fluid is a weight penalty during weight-bearing activities, and obtaining supplies constitutes a waste of time.

Comfort/thermal sensation

The fastest runners were those who were the lightest and had the lowest TS_{27} and the highest $\Delta T_{C27}/T_{Co}$. The explanation lies in the fact that the fastest runners ran at a higher intensity, producing a higher rate of metabolic heat, and were able to support a higher ΔT_{C27} between the start and the finish of the race. It has been shown that the aerobically fit perform longer and tolerate higher levels of hyperthermia in uncompensably hot environments than their less fit counterparts [4]. Also, these runners reported lower thermal sensations even with higher core temperatures. As observed by Tikuisis et al. [21], an attenuation of thermal strain may occur in highly fit individuals in uncompensable thermal stress environments. This corroborates the observation that the faster runners also seemed to be fitter, with lower perceptions of thermal stress.

Conclusions

We demonstrated that well-trained heat-acclimatized runners drinking *ad libitum* performed a strenuous race in tropical environment without dehydration. During a 27-km trail run, high performance was associated with an increase in T_c and greater $TBWL \cdot h^{-1}$. More research is needed to identify the physiological and/or behavioral factors that influence fluid intake and the strategies used to perform in tropical climate.

References

- 1 American College of Sports Medicine. Sawka MN, Burke LM, Eichner ER, Maughan RJ, Montain SJ, Stachenfeld NS. American College of Sports Medicine position stand. Exercise and fluid replacement. *Med Sci Sports Exerc* 2007; 39: 377–390
- 2 Byrne C, Lee JK, Chew SA, Lim CL, Tan EY. Continuous thermoregulatory responses to mass-participation distance running in heat. *Med Sci Sports Exerc* 2006; 38: 803–810
- 3 Byrne C, Lim CL. The ingestible telemetric body core temperature sensor: a review of validity and exercise applications. *Br J Sports Med* 2007; 41: 126–133
- 4 Cheung SS, McLellan TM. Heat acclimation, aerobic fitness, and hydration effects on tolerance during uncompensable heat stress. *J Appl Physiol* 1998; 84: 1731–1739
- 5 Dennis SC, Noakes TD. Advantages of a smaller body mass in humans when distance-running in warm, humid conditions. *Eur J Appl Physiol* 1999; 79: 280–284
- 6 Gagge AP, Stolwijk JA, Hardy JD. Comfort and thermal sensations and associated physiological responses at various ambient temperatures. *Environ Res* 1967; 1: 1–20
- 7 González-Alonso J. Hyperthermia impairs brain, heart and muscle function in exercising humans. *Sports Med* 2007; 37: 371–373
- 8 Harriss DJ, Atkinson G. Update – ethical standards in sport and exercise science research. *Int J Sports Med* 2011; 32: 819–821
- 9 Hue O. The challenge of performing aerobic exercise in tropical environments: applied knowledge and perspectives. *Int J Sports Physiol Perform* 2011; 6: 443–454
- 10 Lee JK, Nio AQ, Lim CL, Teo EY, Byrne C. Thermoregulation, pacing and fluid balance during mass participation distance running in a warm and humid environment. *Eur J Appl Physiol* 2010; 109: 887–898
- 11 Marino FE. Anticipatory regulation and avoidance of catastrophe during exercise-induced hyperthermia. *Comp Biochem Physiol B* 2004; 139: 561–569
- 12 Marino FE, Lambert MI, Noakes TD. Superior performance of African runners in warm humid but not in cool environmental conditions. *J Appl Physiol* 2004; 96: 124–130
- 13 Maughan RJ, Otani H, Watson P. Influence of relative humidity on prolonged exercise capacity in a warm environment. *Eur J Appl Physiol* 2012; 112: 2313–2321
- 14 Maughan R, Shireffs S. Exercise in the heat, challenges and opportunities. *J Sports Sci* 2004; 22: 917–927
- 15 Noakes TD. IMMIDA. Fluid replacement during marathon running. *Clin J Sport Med* 2003; 13: 309–318

■ Proof copy for correction only. All forms of publication, duplication or distribution prohibited under copyright law. ■

Baillet M et al. Fluid Replacement Strategy during... *Int J Sports Med* 2013; 34: 1–6

- 16 *Noakes TD*. Drinking guidelines for exercise: What evidence is there that athletes should drink "as much as tolerable", "to replace the weight lost during exercise" or "ad libitum"? *J Sports Sci* 2007; 25: 781–796
- 17 *Noakes TD*. Hydration in the marathon: using thirst to gauge safe fluid replacement. *Sports Med* 2007; 37: 463–466
- 18 *Nolte H, Noakes TD, Van Vuuren B*. Ad libitum fluid replacement in military personnel during a 4-h route march. *Med Sci Sports Exerc* 2010; 42: 1675–1680
- 19 *Parise CA, Hoffman MD*. Influence of temperature and performance level on pacing a 161 km trail ultramarathon. *Int J Sports Physiol Perform* 2011; 6: 243–251
- 20 *Sharwood K, Collins M, Goedecke J, Wilson G, Noakes T*. Weight changes, sodium levels, and performance in the South African Ironman Triathlon. *Clin J Sport Med* 2002; 12: 391–399
- 21 *Tikuisis P, McLellan TM, Selkirk C*. Perceptual versus physiological heat strain during exercise-heat stress. *Med Sci Sports Exerc* 2002; 34: 1454–1461
- 22 *Tucker R, Rauch L, Harley YX, Noakes TD*. Impaired exercise performance in the heat is associated with an anticipatory reduction in skeletal muscle recruitment. *Pflügers Archiv* 2004; 448: 422–430
- 23 *Tucker R, Marle T, Lambert EV, Noakes TD*. The rate of heat retention mediates an anticipatory reduction in exercise intensity during cycling at a fixed rate of perceived exertion. *J Physiol* 2006; 574: 905–915

Dear Author,
Quality of figures is not good.
Please check.
Thank you

Hydration and thermoregulation during a half-ironman performed in tropical climate.

Baillot M., Hue O.

J Sports Sci Med. 2015 May 8;14(2):263-8. eCollection 2015.

©Journal of Sports Science and Medicine (2015) 14, 263-268
http://www.jssm.org

Research article

Hydration and Thermoregulation during a Half-Ironman Performed in Tropical Climate

Michelle Baillot  and Olivier Hue

Laboratoire ACTES, Université des Antilles et de la Guyane, Campus de Fouillole, France

Abstract

The aim of this study was to compare the core temperature (TC) and markers of hydration status in athletes performing a half Ironman triathlon race in hot and humid conditions ($27.2 \pm 0.5^\circ\text{C}$, relative humidity was $80 \pm 2\%$). Before and immediately after the 2012 Guadeloupe half Ironman triathlon, body mass and urine osmolarity (mean \pm SD) were measured in 19 well-trained male triathletes. TC was measured before and after the race, and at each transition during the event, using an ingestible pill telemetry system. Ambient temperature and heart rate (HR) were measured throughout the race. Mean \pm SD performance time was 331 ± 36 minutes and HR was 147 ± 16 beats \cdot min $^{-1}$. Wet bulb globe temperature (WBGT) averaged $25.4 \pm 1.0^\circ\text{C}$ and ocean temperature was 29.5°C . The average TC at the beginning of the race (TC1) was $37.1 \pm 0.7^\circ\text{C}$; it was $37.8 \pm 0.9^\circ\text{C}$ after swimming (TC2), $37.8 \pm 1.0^\circ\text{C}$ after cycling (TC3), and (TC4) $38.4 \pm 0.7^\circ\text{C}$ after running. Body mass significantly declined during the race by 3.7 ± 1.9 kg ($4.8 \pm 2.4\%$; $p < 0.05$), whereas urine osmolarity significantly increased from 491.6 ± 300.6 to 557.9 ± 207.9 mosm \cdot L $^{-1}$ ($p < 0.05$). Changes in body mass were not related to finishing TC or urine osmolarity. Ad libitum fluid intake appears applicable to athletes acclimatized to tropical climate, when performing a half Ironman triathlon in a warm and humid environment.

Key words: Aerobic exercise, triathlon, hygrometry, hydration.

Introduction

Cyclic aerobic exercise is negatively affected by a hot environment; this has been demonstrated for running (Maughan, 2010) and cycling, although in cycling, it depends on somewhat on the type of race (Nybo, 2010). Swimming in hot water or a tropical climate has also been shown to stimulate and induce thermoregulatory adaptations and to impair performance (Hue and Galy, 2012).

The effects of various factors on triathlon thermoregulation, dehydration and performance have been widely explored. For example, one study found that wearing a wet suit while swimming in relatively warm water as defined by Kerr ($25.4 \pm 0.1^\circ\text{C}$) induced no heat stress during a subsequent cycling bout (Kerr et al., 1998), and this was confirmed using a one-piece competition speed-suit (Peeling and Landers, 2007). Moreover, no hyperthermia- or dehydration-induced thermoregulatory failure has been demonstrated during long-distance (i.e., Ironman) triathlons (Laursen et al., 2006) (Sharwood et al., 2004). However, the studies in hot and humid conditions/climate were performed in a laboratory in relatively warm water (i.e., $25.4 \pm 0.1^\circ\text{C}$) for sub-2.5 hours of exer-

cise (Kerr et al., 1998) or for sub-1 hour (i.e., $27.9 \pm 0.5^\circ\text{C}$) (Peeling and Landers, 2007).

The half Ironman triathlon (i.e., 1.9-km swimming, 90-km cycling and 21.1-km running) has become very popular but little has been studied for endurance events i.e. >3 h in duration, especially in a tropical climate. Thus, our understanding of the influences of a warm and humid environment and fluid intake strategies on aerobic exercise capacity has essentially been studied through experiments conducted on cyclists or runners within the confines of a laboratory. In fact, only one study examined the relationship between warm and humid conditions and Ironman triathlon exercise capacity (Sharwood et al., 2004). These authors reported that the large changes in body weight during the triathlon were not associated with higher rectal temperatures post-race.

Although the negative effects of hot-wet conditions (i.e., the so-called tropical climate) have been demonstrated for almost every cyclic sport (Gonzalez-Alonso et al., 2008), such as swimming (Wade and Veghte, 1977), cycling (Voltaire et al., 2003) and running (Kenefick et al., 2007), no study to our knowledge has explored the thermoregulatory and hydration responses to a relatively long-distance triathlon (i.e., the half Ironman) performed in tropical conditions. We therefore tested the hypothesis that the swimming phase performed in warm temperature under high radiation would induce relative hyperthermia that would not be reversed during the cycling phase and would be aggravated during running.

Methods

Subjects

We contacted Guadeloupean triathlon clubs and recruited 19 tropically-acclimatized male volunteers, all internationally and regionally ranked and regularly competing in triathlons on the island. All competed in the 2012 Guadeloupe half Ironman triathlon in tropical conditions, i.e. with high ambient temperature and high relative humidity ($27.2 \pm 0.5^\circ\text{C}$; $80 \pm 2\%$). The mean (\pm SD) age, body mass, and height of the subjects were respectively 39.1 ± 6.9 yrs, 72.6 ± 7.9 kg, and 1.80 ± 0.07 m. Each athlete was contacted before the race and was sent a complete explanation of the study and an informed consent form. The day before the race, an interview was scheduled with each race entrant to ensure that each was fully informed of, and understood, the aims and methods of the study. All gave informed written consent to participate in the study. The Ethics Committee of the University of Guadeloupe approved the protocol. The race organizers also

gave permission for the present investigation.

Half Ironman triathlon race description

The 2012 Guadeloupe half Ironman triathlon starting at 11 am consisted of two 0.95-km laps of swimming followed by 92 km of cycling and 21.1 km of running. The swimming phase consisted of a single 0.95-km double lap, the cycling phase consisted of three flat 30.6-km laps, and the half-marathon run consisted of three flat 7-km laps. Ambient temperature was $27.2 \pm 0.5^\circ\text{C}$ (range 26.5–28.2°C) and relative humidity was $80 \pm 2\%$ (78–82%). The cloud cover was minimal and no precipitation was recorded during the race. The ocean temperature was 29.5°C. Performance times for the swim, cycle, and run phases for all triathletes were retrieved from the race timing system.

Wet Bulb Globe Temperature (WBGT)

The WBGT index was recorded during the event with a QUESTemp^o 32 Portable Monitor (QUEST Technologies, Oconomowoc, WI, USA). The mean WBGT over the competition duration for the 19 athletes was $25.2 \pm 0.1^\circ\text{C}$ (range 24.2–27.2), with the first subject finishing with a WBGT of 24.3 and the last with 24.2.

Recommendations, water intake and hydration

The athletes were permitted to eat and drink fluid ad libitum during the race. The water intake (WI) was the addition of the water ingested from the cycle phase and at refreshment. The subjects were asked to follow their usual diet and to refrain from alcohol and caffeine for 24 hr before the competition. At the end of the race, all athletes wrote down their WI between the start and end of the race. Urine samples were collected just before and immediately after the race and sent to the biochemistry laboratory of the University Hospital. Pre- and post-race urine osmolality (Uosm) was measured to investigate changes in hydration status. We used a Uosm of $>800 \text{ mOsm}\cdot\text{L}^{-1}$ to indicate clinical dehydration, a cut-off which has been frequently used (Shirreffs and Maughan, 1998).

Temperature measurement and heart rate (HR)

Core temperature (TC) measurements were obtained throughout the race using the a CorTempTM 2000 ambulatory remote sensing system (HQ Inc., Palmetto, FL, USA) and pills that were given at least 6 hr before the race began, in line with previously reported guidelines (Byrne and Lim, 2007) (a telemetric check was performed to ensure that the temperature sensor was inside each volunteer and transmitting a signal). TC was measured just before the race (TC1), immediately after the swim phase in the transition tent while subjects were changing into their cycling attire (TC2), in the cycle-to-run transition tent while subjects were changing into their running attire (TC3), and immediately at the end of the half-marathon run (TC4). HR was recorded throughout the triathlon at 5-s increments using a chest band and wrist-watch HR monitor (PolarVantage, Polar Electro Oy, Kempele, Finland).

Anthropometric measurements

Body height was determined before the race using a stadiometer (Tanita HR001, Tanita Europe B.V., Amsterdam, the Netherlands) to the nearest 0.01 m. Body mass (BM) was measured within 10 minutes of the athletes finishing the race to the nearest 0.1 kg using the same calibrated scale (Seca 881, Seca Vogel & Halke GmbH & Co, Hamburg, Germany) as before the race with subjects wearing only their running shorts or swimsuit bottoms.

Statistical analysis

All statistical computations were performed using Systat 12. The assumption of normality based on skewness and kurtosis tests was confirmed and parametric tests were performed. TC, delta TC, performance, HR, and urine osmolality were analyzed with a two-way ANOVA with repeated measures. Pairwise contrasts were used when necessary to determine where significant differences had occurred. Stepwise single and multiple forward linear regressions were used to determine the relations between the variables related to TC, performance and hydration status. Data are displayed as mean \pm SD, and statistical significance was set at $p < 0.05$.

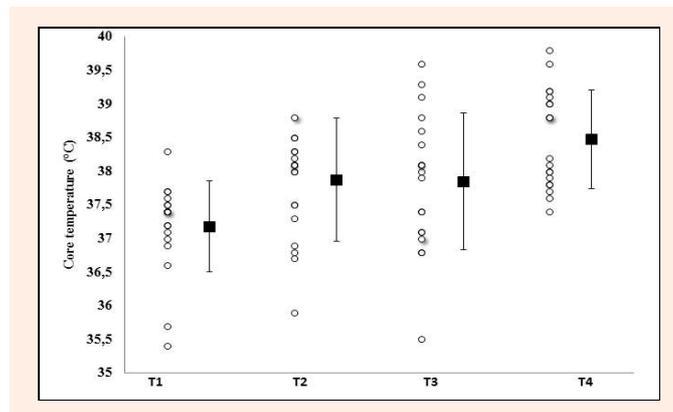


Figure 3. Individual and mean values (\pm SD) of core temperature at each stage of the race. T1: just before the race; T2: after the swim phase; T3: after the cycle phase; T4: at the end of the run phase

Table 1. WBGT, weight and urine osmolarity of the athletes. Data are means (\pm SD).

	T1	T2	T3	T4
WBGT ($^{\circ}$ C)	27.2 (.0)	27.1 (.0)	25.1 (.1)	24.2 (.0)
Weight (kg)	72.6 (7.9)			69.0 (7.3)*
Urine osmolarity ($\text{mOsm}\cdot\text{L}^{-1}$)	492 (301)			558 (208)

WBGT: Wet Bulb Globe Temperature. *Significantly different from start value ($p < 0.05$).

Results

Performance times for the swim, cycle, and run phases were 47 ± 5 , 175 ± 13 , and 109 ± 18 minutes respectively, for a total time of 331 ± 36 minutes. This indicates a relatively elite completion time, with ten of the 19 subjects finishing in under 5 hours. HR throughout the event averaged 147 ± 16 beats $\cdot\text{min}^{-1}$, and TC averaged $37.1 \pm 0.7^{\circ}\text{C}$ just before the beginning of the race, $37.8 \pm 0.9^{\circ}\text{C}$ after swimming (TC2), $37.8 \pm 1.0^{\circ}\text{C}$ after cycling (TC3), and $38.4 \pm 0.7^{\circ}\text{C}$ after running (TC4). The relative change of TC between the different phases was a rise of 0.7°C for the swim phase, no change for the cycle phase and a rise of 0.6°C for the run phase (Figure 1). Table 1 shows the measures of WBGT and hydration status, including BM and urine osmolarity. BM significantly decreased during the event by 3.7 ± 1.9 kg ($5.0 \pm 2.4\%$; $p < 0.05$), with BM at the beginning of the race (BM1) greater than at the end (BM2) ($p < 0.00$; 69.3 ± 7.0 kg vs. 73.0 ± 7.55). Two subjects produced a urine sample with a urine osmolarity > 800 $\text{mOsm}\cdot\text{L}^{-1}$ prior to the start of the race. The mean WI was 3.5 ± 1.0 L and total body water loss (TBWL) was 7.2 ± 2.1 L.

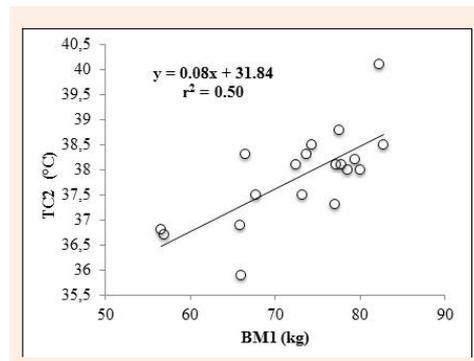


Figure 1. Correlation between BM1 and TC2, $p < 0.05$. BM1: Body Mass measured before the race; TC2: Core temperature after the swim phase

Changes in BM were not related to TC4 ($r^2 = 0.004$) or urine specific gravity ($r^2 = 0.04$). Total finishing time was not significantly related to changes in BM ($r^2 = 0.001$), TC4 ($r^2 = 0.02$), or urine osmolarity ($r^2 = 0.04$). HR was not significantly related to core temperature ($r^2 = 0.43$; $n = 7$) during the event. After the swim phase, TC2 was correlated with BM1: $y = 0.08x + 31.84$ ($r^2 = 0.50$; $n = 19$), (Figure 2, $p = 0.001$). Heavier swim finishers had higher TC and delta TC3/TC2 was correlated with BM1: $y = -0.08x + 6.25$ ($r^2 = 0.32$; $n = 19$), (Figure 3, $p = 0.01$), indicating that the heavier triathletes decreased their heat load more during the cycling phase.

Discussion

This is the first study of the core temperatures at each transition of a half Ironman triathlon in hot and humid conditions and the amount of fluid ingestion. We demonstrated that (1) performance was not negatively dependent on the level of dehydration, (2) athletes were able to self-rehydrate adequately, and (3) core temperature was dependent on both activity and anthropometry.

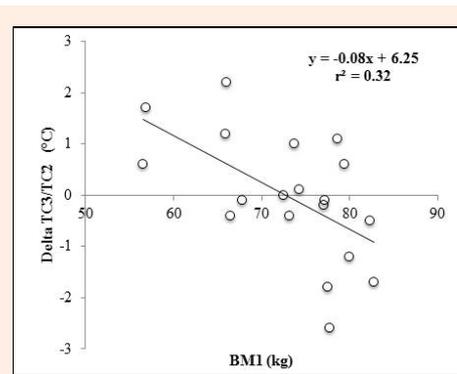


Figure 3. Correlation between BM1 and delta TC3/TC2, $p < 0.05$. BM1: Body Mass measured before the race; delta TC3/TC2: The delta of core temperature between the cycle phase and the swim phase

Body mass loss, hydration and heart rate

Previous laboratory findings have been interpreted to suggest that athletes experience a rise in core body temperature when they become dehydrated during exercise, which increases their risk of developing heat illness (Sawka and Coyle, 1999). However, recent work examining hydration status and the resulting core body temperature in outdoor environments suggests that hypohydration is not associated with increases in core temperature to levels that would be considered excessive. Del Coso et al. (2014) showed a change in body mass of $-3.8 \pm 1.6\%$ in a half-Ironman, and Lee et al. (2010) reported a body mass change of $-3.7 \pm 0.9\%$ in a 21-km road running. Moreover, the estimated loss in elite runners based on calculated sweat rates and rates of fluid ingestion was $8.8 \pm 2.1\%$ during major city marathons (Beis et al., 2012). Sharwood et al. (2004) showed that higher levels of hypohydration were associated with faster performance times at the South African Ironman triathlon in warm conditions. These authors therefore challenged the ACSM guidelines by suggesting that (1) dehydration does not necessarily impair exercise performance and (2) the rectal temperature during an Ironman triathlon conducted in moderate ambient conditions is not increased by slight dehydration. However, these results were obtained during events per-

formed in temperate or warm and dry conditions. In a tropical climate, aerobic performance was found to be negatively affected by the environment (Voltaire et al., 2003) because the humidity is high and sweating is much less effective in releasing body heat due to inefficient evaporation. In this climate, sweating does not allow heat loss and will increasingly dehydrate athletes performing aerobic exercise (Maughan et al., 2012), thereby impairing endurance performance (Cheuvront et al., 2010).

Recent investigations performed in ecological conditions have shown that body mass loss is not directly related to decreased aerobic performance (Beis et al., 2012). In the present study, the change in body mass was not correlated with race time even though body mass changed by -3.7 ± 1.9 kg ($5.0 \pm 2.4\%$) after the race. Similar body mass losses in warm and humid environment have been reported for a 27-km trail running race, where Baillot et al. (2014) showed a decrease of $3.9 \pm 1.1\%$. Interestingly, the half Ironman triathlon athletes did not maintain their body mass within the currently recommended range of 2%-3% but, although urine osmolarity was significantly increased after the race compared with immediately before (Table 1), this did not indicate that the subjects were hypohydrated (Shirreffs and Maughan 1998). In other words, dehydration did not impact performance in this study. This finding agrees with the ecologically-valid study by Noakes (2007), who suggested that maintaining fluid balance is not essential to the maintenance of physiological function, and it challenges previous laboratory-based research as discussed by Sawka and Noakes (2007). In environmental conditions, Beis et al. (2012) demonstrated that the most successful marathon runners drank fluid ad libitum (according to the dictates of thirst) for less than approximately 60 s at an extrapolated fluid ingestion rate of 0.55 ± 0.34 L·hr⁻¹, suggesting that the best runners were those who spent less time drinking and who also ingested the lowest fluid volumes. Moreover, Sharwood et al. (2004) speculated that if the runner is not thirsty, a level of "dehydration" even up to -11% BM might not impair exercise performance. In line with this speculation, we recently demonstrated in a 2-2.5-hr trail race that the fastest trail runners had the smallest fluid intake in warm and humid conditions (Baillot et al., 2014). In the present study, three subjects opted not to wear a heart rate monitor, and nine heart rate monitors malfunctioned for various reasons, leaving seven complete sets of heart rate data. The mean heart rate recorded during the race was 147 ± 16 beats·min⁻¹. Based on the changes in core temperature: $37.1 \pm 0.7^\circ\text{C}$, $37.8 \pm 0.9^\circ\text{C}$, $37.8 \pm 1.0^\circ\text{C}$ and $38.4 \pm 0.7^\circ\text{C}$ (TC1 \pm SD, TC2 \pm SD, TC3 \pm SD and TC4 \pm SD), the running phase appears to have had the most deleterious effect with an elevation of 0.6°C during the run phase. It can be hypothesized that athletes perform the half Ironman triathlon at moderate exercise intensity (Laursen et al., 2006). If the metabolic rate does not explain the delta TC4/TC1, the rise in core temperature might lie in the nature of the activity itself. The swim-bike and bike-run transitions have physiological impact, with potential changes in the various physiological parameters and the energy cost of running (Hue et al., 1998).

Swimming

The heaviest swimmers were those who finished with the highest core temperatures, similar to the finding of Marino et al. (2004) that the relative rates of heat production were highest for those runners with the greatest muscle mass. The core temperatures of these runners rose more because they produced more heat through aerobic exercise in a warm and humid environment. We showed that core temperature increased by 0.7°C during the swim phase in 29.5°C water. Since it is evident that the outcome of a half-Ironman triathlon race can be determined by the swim time (Laursen et al., 2006), we would expect this rise in core temperature as a reflection of increased swim speed. It has been amply demonstrated that a higher-positioned swim exit plays an important role in determining a triathlete's success (Vleck et al., 2006). Thus, our results are concordant with the results in the literature showing a mean 0.9°C increase in core temperature in long-distance swimmers in warm water (Hue et al., 2013). We recorded a 40.1°C core temperature in only one subject after the swimming phase, which was above the physiological limit of 40°C regularly denied by Ely et al. (2009) and promoted by Nielsen (1997). This core temperature nevertheless declined to 39.6°C after cycling. It should also be noted that this 40.1°C core temperature was recorded in the subject who also had the highest body mass. Therefore, this outcome of our study highlights the observation that the heaviest athletes had the highest core temperature after swimming. Interestingly, Laursen et al. (2006) recorded a similar 40.5°C core temperature in the fastest swimmer of an Ironman triathlon and suggested that dehydration had no impact on this rise in temperature since it was recorded at the beginning of the race when body water levels were at their maximum. They highlighted the correlation between the rise in core temperature and swimming performance, suggesting that the high temperature was related to the metabolic rate during swimming, i.e., the exercise intensity, and not to dehydration. The high core temperature in our study was likely due to the metabolic rate in warm water. Thus, swimming in warm water (29.5°C) is a complex situation where the evacuation of the heat load can be difficult due to high radiation and the high water temperature. In this sense, the environmental temperature may pose a challenge for endurance swimmers (Hue et al., 2007); for example, swimming in high water temperature increases heart rate, skin circulation and esophageal temperature to the same extent as running in a hot environment (Hue and Galy, 2012; Holmer and Bergh, 1974). This provides evidence of the limited capacity for heat dissipation when swimming at a high metabolic rate in warm water.

Cycling

Another important finding of our study concerned the heat load after the cycling phase with regard to body mass. We found that delta TC3/TC2 was negatively correlated with BM1, suggesting that a higher body mass allowed more time to accumulate the heat load. What seemed to be a handicap in swimming, however, might have been an advantage in cycling. We showed that core temperature did not increase during the cycle phase. Moreover, since

cycling is an endurance activity during which heat is evacuated by convection, high metabolic production can be dissipated, even in a warm and humid environment (Saunders et al., 2005). It can be hypothesized that the heaviest athletes present the greatest surface for heat exchange. As suggested by Marino et al. (2004), the surface/mass ratio is an advantage for bigger athletes, who produce a high metabolic rate and are also able to better dissipate the consequent heat production. Thus, as long as cyclists are able to maintain a high forward velocity, the capacity for evaporative loss is not affected even in a hot and humid environment (Nielsen, 1996), unless the humidity is extreme, as noted by Hue et al. (2006) in professional cyclists competing in the Tour de Guadeloupe. In our study, the cycling phase was held on relatively flat terrain, facilitating the maintenance of high cycling speed over the race, and thus the maintenance of thermal balance. Moreover, the rule that prohibits drafting in the triathlon makes it easier for cyclists to have the entire body surface exposed to airflow, and this also improves the efficiency of convection, thereby explaining why TC3 did not change in comparison with TC2, the value after the swim.

Running

As high body mass loss is usually associated with hyperthermia (Baillot et al., 2014), we expected high core temperatures, especially after the running phase. The average core temperature increased from $37.8 \pm 1.0^\circ\text{C}$ after cycling to $38.4 \pm 0.7^\circ\text{C}$ after running. This $1.3 \pm 0.0^\circ\text{C}$ increase from the beginning to the end of the race was similar to the core temperature increase of $1.3 \pm 0.7^\circ\text{C}$ in the study of Del Coso et al. (2014), where athletes reached $38.8 \pm 0.7^\circ\text{C}$ after a half-Ironman triathlon race in hot and dry conditions. In a tropical climate, thermoregulation limits endurance performance (Shapiro et al., 1980). This is especially so for running during the half Ironman distance, as the running speed is slow and convection is not an effective way to lower metabolic heat production. Because of the high humidity, sweating does not allow heat loss and will increasingly dehydrate athletes performing aerobic exercise (Kenefick et al., 2007). Schlader et al. (2011) hypothesized that the brain might be able to evaluate the allowed rate of heat storage to determine the running pace throughout a race in uncompensable environmental conditions. This potential mechanism would prevent the onset of fatigue by limiting the rate of heat storage. In line with this, a progressive slowing of marathon speed was demonstrated as the WBGT increased from 5 to 25, with a greater negative effect on performance among the slower population of runners (Ely et al., 2007). Although a high percentage of humidity has been demonstrated to be deleterious to aerobic performance, we did not observe a critically high final core temperature with a rise of 0.6°C during the run phase. We hypothesize that in order to achieve the match between heat gain and heat dissipation in these conditions, the triathletes reduced their metabolic heat production in the run phase, thus the intensity of their workout (Voltaire et al., 2003).

Three limitations of the present study were that (1) food and supplements consumption was not assessed

during the event and (2) the athletes evaluated their own fluid consumption just after the race (3) when looking at TC in the different sections of the race, it is difficult to compare TC1 to TC4 for example. In fact, due to the variation of transit time, it is difficult to know the exact position of the capsule in the gastrointestinal tract (oesophagus/rectum). This problem is something to be aware of and acknowledged as a limitation to the equipment. Thus, although core temperature was measured intermittently throughout the event, we could not ascertain the hydration status of the triathletes at the various core temperature data collection points. In addition, the small number of valid HR data points in this study limited the evaluation of exercise intensity. Nevertheless, we are certain that core temperature was not near hyperthermic levels after the half Ironman triathlon despite the 4.8% reduction in body mass.

Conclusion

The athletes with the greatest pre-race body mass also showed the highest TC2 and the greatest negative delta TC3/TC2. Performance was not negatively dependent on the level of dehydration and the athletes were able to self-rehydrate adequately. Fluid intake had no impact on the variables related to TC. We recorded a final core temperature average of $38.8 \pm 0.7^\circ\text{C}$ after the event in these trained triathletes. This temperature was activity-dependent, and the athletes showed no evidence of heat illness in a warm and humid environment.

References

- Baillot, M., Le Bris, S. and Hue, O. (2014) Fluid replacement strategy during a 27-Km trail run in hot and humid conditions. *International Journal of Sports Medicine* **35**(2), 147-152.
- Beis, L.Y., Wright-Whyte, M., Fudge, B., Noakes, T. and Pitsiladis, Y.P. (2012) Drinking behaviors of elite male runners during marathon competition. *Clinical Journal of Sports Medicine* **22**(3), 254-261.
- Byrne, C. and 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.
- Chevront S.N., Kenefick R.W., Montain S.J. and Sawka M.N. (2010) Mechanisms of aerobic performance impairment with heat stress and dehydration. *Journal of Applied Physiology* (1985) **109**(6), 1989-1995.
- Del Coso, J., González, C., Abian-Vicen, J., Salinero Martín, J.J., Soriano, L., Areces, F., Ruiz, D., Gallo, C., Lara, B. and Calleja-González, J. (2014) Relationship between physiological parameters and performance during a half-ironman triathlon in the heat. *Journal of Sports Science* **32**(18), 1680-1687.
- Ely, B.R., Ely, M.R., Chevront, S.N., Kenefick, R.W., Degroot, D.W. and Montain, S.J. (2009) Evidence against a 40°C core temperature threshold for fatigue in humans. *Journal of Applied Physiology* **107**, 1519-1525.
- Ely, M.R., Chevront, S.N., Roberts, W.O. and Montain, S.J. (2007) Impact of weather on marathon-running performance. *Medicine and Science in Sports and Exercise* **39**, 487-493.
- Gonzalez-Alonso, J., Crandall, C.G. and Johnson, J.M. (2008) The cardiovascular challenge of exercising in the heat. *Journal of Physiology* **586**(1), 45-53.
- Holmer, I. and Bergh, U. (1974) Metabolic and thermal response to swimming in water at varying temperatures. *Journal of Applied Physiology* **37**(5), 702-705.
- Hue, O., Voltaire, B., Hertogh, C. and Blonc, S. (2006) Heart rate, thermoregulatory and humoral responses during a 9-day cycle race in a hot and humid climate. *International Journal of Sports Medicine* **27**, 690-696.

- Hue, O., Monjo, R., Lazzaro, M., Baillot, M., Hellard, P., Marlin, L. and Jean-Etienne, A. (2013) The effect of time of day on cold water ingestion by high-level swimmers in a tropical climate. *International Journal of Sports Physiology and Performance* **8**(4), 442-451.
- Hue, O., Le Gallais, D., Chollet, D., Boussana, A. and Préfaut, C. (1998) The influence of prior cycling on biomechanical and cardiorespiratory response profiles during running in triathletes. *European Journal of Applied Physiology and Occupational Physiology* **77**(1-2), 98-105.
- Hue, O., Antoine-Jonville, S. and Sara, F. (2007) The effect of 8 days of training in tropical environment on performance in neutral climate in swimmers. *International Journal of Sports Medicine* **28**, 48-52.
- Hue, O. and Galy, O. (2012) The effect of a silicone swim cap on swimming performance in tropical conditions in pre-adolescents. *Journal of Sports Science and Medicine* **11**(1), 156-161.
- Kenefick, R.W., Chevront, S.N. and Sawka, M.N. (2007) Thermoregulatory function during the marathon. *Sports Medicine (Auckland, N.Z.)* **37**, 312-315.
- Kenefick, R.W., Montain, S.J. and Sawka, M.N. (2010) Mechanisms of aerobic performance impairment with heat stress and dehydration. *Journal of Applied Physiology* (1985) **109**(6), 1989-1995.
- Kerr, C.G., Trappe, T.A., Starling, R.D. and Trappe, S.W. (1998) Hyperthermia during Olympic triathlon: influence of body heat storage during the swimming stage. *Medicine and Science in Sports and Exercise* **30**, 99-104.
- Laursen, P.B., Suriano, R., Quod, M.J., Lee, H., Abbiss, C.R., Nosaka, K., Martin, D.T. and Bishop, D. (2006) Core temperature and hydration status during an Ironman triathlon. *British Journal of Sports Medicine* **40**(4), 320-325.
- Lee, J.K.W., Nio, A.Q., Lim, C.L., Teo, E.Y. and Byrne, C. (2010) Thermoregulation, pacing and fluid balance during mass participation distance running in a warm and humid environment. *European Journal of Applied Physiology* **109**, 887-898.
- Marino, F.E., Lambert, M.I. and Noakes, T.D. (2004) Superior performance of African runners in warm humid but not in cool environmental conditions. *Journal of Applied Physiology* (1985) **96**, 124-130.
- Maughan, R.J. (2010) Distance running in hot environments: A thermal challenge to the elite runner. *Scandinavian Journal of Medicine and Science in Sports* **20**, 95-102.
- Maughan, R.J., Otani, H. & Watson, P., 2012. Influence of relative humidity on prolonged exercise capacity in a warm environment. *European Journal of Applied Physiology* **112**(6), 2313-2321.
- Nielsen, B., Strange, S., Christensen, N.J., Warberg, J. and Saltin, B. (1997) Acute and adaptive responses in humans to exercise in a warm, humid environment. *Pflügers Archive European Journal of Physiology* **434**, 49-56.
- Nielsen, B. (1996) Olympics in Atlanta: a fight against physics. *Medicine and Science in Sports and Exercise* **28**(6), 665-668.
- Noakes, T.D. (2007) Hydration in the marathon: using thirst to gauge safe fluid replacement. *Sports Medicine (Auckland, N.Z.)* **37**, 463-466.
- Nybo, L. (2010) Cycling in the heat: performance perspectives and cerebral challenges. *Scandinavian Journal of Medicine Science in Sports* **20**(Suppl 3), 71-79.
- Peeling, P. and Landers, G. (2007) The effect of a one-piece competition speedsuit on swimming performance and thermoregulation during a swim-cycle trial in triathletes. *Journal of Science and Medicine in Sport* **10**, 327-333.
- Saunders, A.G., Dugas, J.P., Tucker, R., Lambert, M.I. and Noakes, T.D. (2005) The effects of different air velocities on heat storage and body temperature in humans cycling in a hot, humid environment. *Acta Physiologica Scandinavica* **163**(3), 241-255.
- Sawka, M.N. and Coyle, E.F. (1999) Influence of body water and blood volume on thermoregulation and exercise performance in the heat. *Exercise and Sport Science Reviews* **27**, 167-218.
- Sawka, M.N. and Noakes, T.D. (2007) Does dehydration impair exercise performance? *Medicine and Science in Sports and Exercise* **39**(8), 1209-1217.
- Schlader, Z.J., Stannard, S.R. and Mündel, T. (2011) Evidence for thermoregulatory behavior during self-paced exercise in the heat. *Journal of Thermal Biology* **36**, 390-396.
- Shapiro, Y., Pandolf, K.B., Avellini, B.A., Pimental, N.A. and Goldman, R.F. (1980) Physiological responses of men and women to humid and dry heat. *Journal of Applied Physiology* (1985) **49**, 1-8.
- Sharwood, K.A., Collins, M., Goedecke, J.H., Wilson, G. and Noakes, T.D. (2004) Weight changes, medical complications, and performance during an Ironman triathlon. *British Journal of Sports Medicine* **38**(6), 718-724.
- Shirreffs, S.M. and Maughan, R.J. (1998) Urine osmolality and conductivity as indices of hydration status in athletes in the heat. *Medicine and Science in Sports and Exercise* **30**(11), 1598-1602.
- Vleck, V.E., Burgi, A. and Bentley, D.J. (2006) The consequences of swim, cycle, and run performance on overall result in elite olympic distance triathlon. *International Journal of Sports Medicine* **27**(1), 43-48.
- Voltaire, B., Berthouze-Aranda, S. and Hue, O. (2003) Influence of a hot/wet environment on exercise performance in natives to tropical climate. *Journal of Sports Medicine and Physical Fitness* **43**, 306-311.
- Wade, C.E. and Veghte, J.H. (1977) Thermographic evaluation of the relative heat loss by area in man after swimming. *Aviation Space and Environmental Medicine* **48**, 16-18.

Key points

- Ad libitum fluid intake appears applicable to athletes acclimatized to tropical climate when performing a half Ironman triathlon in a warm and humid environment.
- The final core temperature average was $38.8 \pm 0.7^\circ\text{C}$ after the event in these triathletes and the athletes showed no evidence of heat illness while competing in a warm and humid environment.
- Core temperature was dependent on both activity and anthropometry.

AUTHOR BIOGRAPHY



Michelle BAILLOT
Employment
 Université des Antilles et de la Guyane
Degree
 PhD student
Research interest
 Sport science, exercise physiology
E-mail : mibaillot@gmail.com



Olivier HUE
Employment
 Université des Antilles et de la Guyane
Degree
 PhD, professor
Research interest
 Exercise physiology, thermoregulation, heat acclimation, aerobic exercise
E-mail: ohue@univ-ag.fr

✉ **Michelle Baillot**
 Laboratoire ACTES, EA 3596, UFR-STAPS, Université des Antilles et de la Guyane, Campus de Fouillole, France

BIBLIOGRAPHIE

- Adams W.C. (1977). Influence of exercise mode and selected ambient conditions on skin temperature. Milvy P, editor. The marathon: physiological, medical, epidemiological, and psychological studies. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 301, 110–127.
- Adams, W. C., Mack, G. W., Langhans, G. W., & Nadel, E. R. (1992). Effects of varied air velocity on sweating and evaporative rates during exercise. *Journal of Applied Physiology*, 73(6), 2668–2674.
- Akasaki, K., Mita, K., & Watakabe, M. (2004). Electromyographic and mechanomyographic estimation of motor unit activation strategy in voluntary force production. *Electromyography and Clinical Neurophysiology*, 44(8), 489–496.
- Arens, E. A., & Zhang, H. (2006). The Skin's Role in Human Thermoregulation and Comfort. *Thermal and Moisture Transport in Fibrous Materials*, (560), 560–602.
- Armstrong, L. E., Casa, D. J., Millard-Stafford, M., Moran, D. S., Pyne, S. W., & Roberts, W. O. (2007). Exertional heat illness during training and competition. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 39(3), 556–572.
- Armstrong, L. E., Whittlesey, M. J., Casa, D. J., Elliott, T. A., Kavouras, S. A., Keith, N. R., & Maresh, C. M. (2006). No effect of 5% hypohydration on running economy of competitive runners at 23 degrees C. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 38(10), 1762–1769.
- Barr, S. I. (1999). Effects of dehydration on exercise performance. *Canadian Journal of Applied Physiology*, 24, 164–172.
- Beaver W. L., Wasserman K, W. B. (1986). A new method for detecting anaerobic threshold by gas exchange. *J Appl Physiol (1985)*, 60(6)(Jun), 2020–2027.
- Beis, L. Y., Wright-Whyte, M., Fudge, B., Noakes, T., & Pitsiladis, Y. P. (2012). Drinking behaviors of elite male runners during marathon competition. *Clin J Sport Med*, 22(3), 254–261.
- Bigland-Ritchie, B. (1981). EMG/force relations and fatigue of human voluntary contractions. *Exercise and Sport Sciences Reviews*, 9(1), 75–117.

- Bigland, B., & Lippold, O. (1954). The relation between force, velocity and integrated electrical activity in human muscles. *Journal of Physiology*, *123*(1), 214–224.
- Billat, V., Faina, M., Sardella, F., Marini, C., Fanton, F., Lupo, S., Dalmonte, A. (1996). A comparison of time to exhaustion at VO₂ max in elite cyclists, kayak paddlers, swimmers and runners. *Ergonomics*, *39*(2), 267–277.
- Bishop, D. (2003). Warm up I: potential mechanisms and the effects of passive warm up on exercise performance. *Sports Medicine (Auckland, N.Z.)*, *33*(6), 439–454.
- Borg, G. A. (1982). Psychophysical bases of perceived exertion. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, *14*(5), 377–381.
- Bouchama, A., & Knochel, J. P. (2002). Heat stroke. *N Engl J Med*, *346*(25), 1978–1988.
- Brebner, D. F., & Kerslake, D. M. (1969). The relation between sweat rate and weight loss when sweat is dripping off the body. *The Journal of Physiology*, *202*(3), 719–735.
- Brotherhood, J. R. (2008). Heat stress and strain in exercise and sport. *Journal of Science and Medicine in Sport / Sports Medicine Australia*, *11*(1), 6–19.
- Budd, G. M. (2008). Wet-bulb globe temperature (WBGT)-its history and its limitations. *Journal of Science and Medicine in Sport*, *11*(1), 20–32.
- Buono, M. J., & Sjoholm, N. T. (1988). Effect of physical training on peripheral sweat production. *Journal of Applied Physiology (Bethesda, Md. : 1985)*, *65*(2), 811–814.
- Byrne, C., Lee, J. K. W., Chew, S. A. N., Lim, C. L., & Tan, E. Y. M. (2006). Continuous thermoregulatory responses to mass-participation distance running in heat. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, *38*(5), 803–810.
- Candas, V., Libert, J. P., & Vogt, J. J. (1980). Effect of hidromeiosis on sweat drippage during acclimation to humid heat. *European Journal of Applied Physiology and Occupational Physiology*, *44*(2), 123–133.
- Candas, V., Libert, J. P., & Vogt, J. J. (1983). Sweating and sweat decline of resting men in hot humid environments. *European Journal of Applied Physiology and Occupational Physiology*, *50*(2), 223–234.
- Casa, D. J., Stearns, R. L., Lopez, R. M., Ganio, M. S., McDermott, B. P., Yeargin, S. W., Maresh, C. M. (2010). Influence of hydration on physiological function and performance during trail running in the heat. *Journal of Athletic Training*, *45*(2), 147–156.
- Charkoudian, N. (2010). Mechanisms and modifiers of reflex induced cutaneous vasodilation

- and vasoconstriction in humans. *Journal of Applied Physiology (Bethesda, Md. : 1985)*, 109(4), 1221–1228.
- Charkoudian, N. (2010). Optimizing heat dissipation for every environment: the cool ability of the skin to locally regulate sweating. *Journal of Applied Physiology (Bethesda, Md. : 1985)*, 109(5), 1288–1289.
- Cheung, S. S. (2007). Hyperthermia and voluntary exhaustion: integrating models and future challenges. *Applied Physiology, Nutrition, and Metabolism*, 32(4), 808–817.
- Cheung, S. S., & McLellan, T. M. (1998). Heat acclimation, aerobic fitness, and hydration effects on tolerance during uncompensable heat stress. *Journal of Applied Physiology (Bethesda, Md. : 1985)*, 84(5), 1731–1739.
- Clausen, T., & Nielsen, O. B. (2008). Increased interstitial K⁺ as a cause of muscle fatigue: Response to a Letter to the Editor. *J. Physiol.*, (1469-7793 (Electronic)).
- Colin, J., Timbal, J., Houdas, Y., Boutelier, C., & Guieu, J. D. (1971). Computation of mean body temperature from rectal and skin temperatures. *Journal of Applied Physiology (Bethesda, Md. : 1985)*, 31(3), 484–489.
- De Paula Viveiros, J., Amorim, F. T., Alves, M. N. M., Passos, R. L. F., & Meyer, F. (2012). Run performance of middle-aged and young adult runners in the heat. *International Journal of Sports Medicine*, 33(3), 211–217.
- Dennis, S. C., & Noakes, T. D. (1999). Advantages of a smaller bodymass in humans when distance-running in warm, humid conditions. *European Journal of Applied Physiology and Occupational Physiology*, 79, 280–284.
- Newham, D. J., Mills, K. R., Quigley, B. M., Edwards, R. H. (1983). Pain and fatigue after concentric and eccentric muscle contractions. *Clinical Science (London, England : 1979)*, 64(1)55–62.
- Dugas, J. P., Oosthuizen, U., Tucker, R., & Noakes, T. D. (2009). Rates of fluid ingestion alter pacing but not thermoregulatory responses during prolonged exercise in hot and humid conditions with appropriate convective cooling. *European Journal of Applied Physiology*, 105(1), 69–80.
- Ely, B. R., Ely, M. R., Chevront, S. N., Kenefick, R. W., DeGroot, D. W., & Montain, S. J. (2009). Evidence against a 40°C core temperature threshold for fatigue in humans. *Journal of Applied Physiology*, 107, 1519–1525.
- Febbraio, M. A. (2000). Does muscle function and metabolism affect exercise performance in the heat? *Exercise and Sport Sciences Reviews*, 28(4), 171–176.

- Fiala, D., Havenith, G., Bröde, P., Kampmann, B., & Jendritzky, G. (2012). UTCI-Fiala multi-node model of human heat transfer and temperature regulation. *International Journal of Biometeorology*, 56(3), 429–441.
- Frye, A J., & Kamon, E. (1981). Responses to dry heat of men and women with similar aerobic capacities. *Journal of Applied Physiology (Bethesda, Md. : 1985)*, 50(1), 65–70.
- Frye, A J., & Kamon, E. (1983). Sweating efficiency in acclimated men and women exercising in humid and dry heat. *Journal of Applied Physiology (Bethesda, Md. : 1985)*, 54(4), 972–977.
- Fuglevand, A. J., Zackowski, K. M., Huey, K. A., & Enoka, R. M. (1993). Impairment of neuromuscular propagation during human fatiguing contractions at submaximal forces. *The Journal of Physiology*, 460(1), 549–572.
- Galloway, S. D., & Maughan, R. J. (1997). Effects of ambient temperature on the capacity to perform prolonged cycle exercise in man. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 29(9), 1240–1249.
- Gandevia, S. C., Allen, G. M., & McKenzie, D. K. (1995). Central fatigue. Critical issues, quantification and practical implications. *Advances in Experimental Medicine and Biology*, 384, 281–294.
- Garcia, A. M. C., Lacerda, M. G., Fonseca, I. A. T., Reis, F. M., Rodrigues, L. O. C., & Silami-Garcia, E. (2006). Luteal phase of the menstrual cycle increases sweating rate during exercise. *Brazilian Journal of Medical and Biological Research*, 39(9), 1255–1261.
- Gisolfi, C. V., & Wenger, C. B. (1984). Temperature regulation during exercise: old concepts, new ideas. *Exercise and Sport Sciences Reviews*, 12, 339–372.
- Gleeson, M. (1998). Temperature regulation during exercise. *International Journal of Sports Medicine*, 19 Suppl 2, 96–99.
- Gonzalez-Alonso, J., & Calbet, J. A. (2003). Reductions in systemic and skeletal muscle blood flow and oxygen delivery limit maximal aerobic capacity in humans. *Circulation*, 107(6), 824–830.
- Gonzalez-Alonso, J., Calbet, J. A., & Nielsen, B. (1998). Muscle blood flow is reduced with dehydration during prolonged exercise in humans. *J Physiol*, 513(Pt 3), 895–905.
- Gonzalez-Alonso, J., Crandall, C. G., & Johnson, J. M. (2008). The cardiovascular challenge of exercising in the heat. *J Physiol*, 586(1), 45–53.

- Gonzalez-Alonso, J., Teller, C., Andersen, S. L., Jensen, F. B., Hyldig, T., & Nielsen, B. (1999). Influence of body temperature on the development of fatigue during prolonged exercise in the heat. *J Appl Physiol* (1985), 86(3), 1032–1039.
- Hargreaves, M., & Febbraio, M. (1998). Limits to exercise performance in the heat. *Int J Sports Med*, 19 Suppl 2, 115–116.
- Havenith, G., Fogarty, A., Bartlett, R., Smith, C. J., & Ventenat, V. (2008). Male and female upper body sweat distribution during running measured with technical absorbents. In *European Journal of Applied Physiology*, 104, 245–255.
- Hew-Butler, T., Almond, C., Ayus, J. C., Dugas, J., Meeuwisse, W., Noakes, T., Weschler, L. (2005). Consensus statement of the 1st International Exercise-Associated Hyponatremia Consensus Development Conference, Cape Town, South Africa 2005. *Clinical Journal of Sport Medicine : Official Journal of the Canadian Academy of Sport Medicine*, 15(4), 208–213.
- Hodder, S. G., & Parsons, K. (2007). The effects of solar radiation on thermal comfort. *International Journal of Biometeorology*, 51(3), 233–250.
- Houmard, J. A., Costill, D. L., Davis, J. A., Mitchell, J. B., Pascoe, D. D., & Robergs, R. A. (1990). The influence of exercise intensity on heat acclimation in trained subjects. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 22(5), 615–620.
- Howe, A. S., & Boden, B. P. (2007). Heat-related illness in athletes. *The American Journal of Sports Medicine*, 35(8), 1384–1395.
- Hue, O. (2011). The challenge of performing aerobic exercise in tropical environments: Applied knowledge and perspectives. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 6(4), 443–454.
- Hue, O., Antoine-Jonville, S., & Sara, F. (2007). The effect of 8 days of training in tropical environment on performance in neutral climate in swimmers. *International Journal of Sports Medicine*, 28, 48–52.
- Ichinose-Kuwahara, T., Inoue, Y., Iseki, Y., Hara, S., Ogura, Y., & Kondo, N. (2010). Sex differences in the effects of physical training on sweat gland responses during a graded exercise. *Experimental Physiology*, 95(10), 1026–1032.
- Ichinose, T. K., Inoue, Y., Hirata, M., Shamsuddin, A. K. M., & Kondo, N. (2009). Enhanced heat loss responses induced by short-term endurance training in exercising women. *Experimental Physiology*, 94(1), 90–102.
- Inoue, Y., Kuwahara, T., & Araki, T. (2004). Maturation- and aging-related changes in heat loss effector function. *Journal of Physiological Anthropology and Applied Human*

Science, 23(6), 289–294.

- Kalyani, M. N., & Jamshidi, N. (2009). Comparing the effect of firefighting protective clothes and usual work clothes during physical activity on heat strain. *Pakistan Journal of Medical Sciences*, 25(3), 375–379.
- Kay, D., Marino, F. E., Cannon, J., St Clair Gibson, A., Lambert, M. I., & Noakes, T. D. (2001). Evidence for neuromuscular fatigue during high-intensity cycling in warm, humid conditions. *European Journal of Applied Physiology*, 84, 115–121.
- Kayser, B. (2003). Exercise starts and ends in the brain. *European Journal of Applied Physiology*, 90(3-4), 411–419.
- Kenefick, R. W., Chevront, S. N., & Sawka, M. N. (2007). Thermoregulatory function during the marathon. *Sports Medicine (Auckland, N.Z.)*, 37, 312–315.
- Kenefick, R. W., Montain, S. J., & Sawka, M. N. (2010). Mechanisms of aerobic performance impairment with heat stress and dehydration. *J Appl Physiol (1985)*, 109(6), 1989–1995.
- Kennedy, D. S., McNeil, C. J., Gandevia, S. C., & Taylor, J. L. (2014). Fatigue-related firing of distal muscle nociceptors reduces voluntary activation of proximal muscles of the same limb. *Journal of Applied Physiology (Bethesda, Md. : 1985)*, 116(December 2013), 385–394.
- Kenney, W. L. (1998). Heat flux and storage in hot environments. *International Journal of Sports Medicine*, 19 Suppl 2, 92–95.
- Kerslake, D. M. (1972). *The stress of hot environments. Monographs of the Physiological Society*.
- Kolka, M. A., & Stephenson, L. A. (1997). Interaction of menstrual cycle phase, clothing resistance and exercise on thermoregulation in women. *Journal of Thermal Biology*, 22(2), 137–141.
- Lamke, L. O., Nilsson, G. E., & Reithner, H. L. (1977). Insensible perspiration from the skin under standardized environmental conditions. *Scandinavian Journal of Clinical and Laboratory Investigation*, 37(4), 325–331.
- Lee, H., Petrofsky, J., Shah, N., Awali, A., Shah, K., Alotaibi, M., & Yim, J. (2014). Higher Sweating Rate and Skin Blood Flow during the Luteal Phase of the Menstrual Cycle. *The Tohoku Journal of Experimental Medicine*, 234(2), 117–122.
- Lee, J. K. W., Nio, A. Q. X., Lim, C. L., Teo, E. Y. N., & Byrne, C. (2010). Thermoregulation, pacing and fluid balance during mass participation distance running

- in a warm and humid environment. *European Journal of Applied Physiology*, 109, 887–898.
- Lepers, R., Maffiuletti, N. A., Rochette, L., Brugniaux, J., & Millet, G. Y. (2002). Neuromuscular fatigue during a long-duration cycling exercise. *Journal of Applied Physiology (Bethesda, Md. : 1985)*, 92(4), 1487–1493.
- Lopez, M., Sessler, D. I., Walter, K., Emerick, T., & Ozaki, M. (1994). *Rate and gender dependence of the sweating, vasoconstriction, and shivering thresholds in humans. Anesthesiology* (Vol. 80).
- Lorenzo, S., Halliwill, J. R., Sawka, M. N., & Minson, C. T. (2010). Heat acclimation improves exercise performance. *Journal of Applied Physiology (Bethesda, Md. : 1985)*, 109(4), 1140–1147.
- Malchaire, J. B. M. (2006). Occupational heat stress assessment by the Predicted Heat Strain model. *Industrial Health*, 44, 380–387.
- Malina, R. M. (2007). Body Composition in Athletes: Assessment and Estimated Fatness. *Clinics in Sports Medicine*, 26(1)37–68.
- Marieb, E. N. E., & Hoehn, K. (2013). *Human Anatomy & Physiology. Physiology* (Vol. Chapter 18).
- Marino, F. E., Lambert, M. I., & Noakes, T. D. (2004). Superior performance of African runners in warm humid but not in cool environmental conditions. *J Appl Physiol (1985)*, 96(1), 124–130.
- Marino, F. E., Lambert, M. I., & Noakes, T. D. (2004). Superior performance of African runners in warm humid but not in cool environmental conditions. *Journal of Applied Physiology (Bethesda, Md. : 1985)*, 96(1), 124–130.
- Marino, F. E., Mbambo, Z., Kortekaas, E., Wilson, G., Lambert, M. I., Noakes, T. D., & Dennis, S. C. (2000). Advantages of smaller body mass during distance running in warm, humid environments. *Pflugers Archiv European Journal of Physiology*, 441(2-3), 359–367.
- Maughan, R. J. (1999). Exercise in the heat: limitations to performance and the impact of fluid replacement strategies. Introduction to the symposium. *Can J Appl Physiol*, 24(2), 149–151.
- Maughan, R. J., Leiper, J. B., & Shirreffs, S. M. (1997). Factors influencing the restoration of fluid and electrolyte balance after exercise in the heat. *Br J Sports Med*, 31(3), 175–182.

- Maughan, R. J., Otani, H., & Watson, P. (2012). Influence of relative humidity on prolonged exercise capacity in a warm environment. *Eur J Appl Physiol*, 112(6), 2313–2321.
- McNeil, C. J., Martin, P. G., Gandevia, S. C., & Taylor, J. L. (2009). The response to paired motor cortical stimuli is abolished at a spinal level during human muscle fatigue. *The Journal of Physiology*, 587(Pt 23), 5601–5612.
- Meyer, P. (1983). *Physiologie humaine.Medecine-Sciences*.
- Michael, J. S., Rooney, K. B., & Smith, R. (2008). The metabolic demands of kayaking: A review. *Journal of Sports Science and Medicine*, 7(1), 1–7.
- Mitchell, D., & Wyndham, C. H. (1969). Comparison of weighting formulas for calculating mean skin temperature. *Journal of Applied Physiology (Bethesda, Md. : 1985)*, 26, 616–622.
- Montain, S. J., Chevront, S. N., & Lukaski, H. C. (2007). Sweat mineral-element responses during 7 h of exercise-heat stress. *International Journal of Sport Nutrition and Exercise Metabolism*, 17(6), 574–582.
- Montain, S. J., Sawka, M. N., Cadarette, B. S., Quigley, M. D., & McKay, J. M. (1994). Physiological tolerance to uncompensable heat stress: effects of exercise intensity, protective clothing, and climate. *Journal of Applied Physiology (Bethesda, Md. : 1985)*, 77(1), 216–222.
- Morrison, S., Sleivert, G. G., & Cheung, S. S. (2004). Passive hyperthermia reduces voluntary activation and isometric force production. *European Journal of Applied Physiology*, 91(5-6), 729–736.
- Mountjoy, M., Alonso, J. M., Bergeron, M. F., Dvorak, J., Miller, S., Migliorini, S., & Singh, D. G. (2012). Hyperthermic-related challenges in aquatics, athletics, football, tennis and triathlon. *British Journal of Sports Medicine*, 46(11), 800–804.
- HolmesN.,Miller, V., Bates, G., &Zheo,Y. (2011). The effect of exercise intensity on sweat rate and sweat sodium loss in well trained athletes. *Journal of Science and Medicine in Sport*14,e112.
- Nadel, E. R. (1979). Control of sweating rate while exercising in the heat. *Med Sci Sports*, 11(1), 31–35.
- Nadel, E. R., Holmér, I., Bergh, U., Astrand, P. O., & Stolwijk, J. A. J. (1974). Energy exchanges of swimming man. *Journal of Applied Physiology*, 36(4), 465–471.

- Nichols, A. W. (2014). Heat-related illness in sports and exercise. *Current Reviews in Musculoskeletal Medicine*.
- Nielsen, B. (1994). Heat stress and acclimation. *Ergonomics*, 37(1), 49–58.
- Nielsen, B. (1996). Olympics in Atlanta: a fight against physics. *Med Sci Sports Exerc*, 28(6), 665–668.
- 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. *J Physiol*, 460, 467–485.
- Nielsen, B., Strange, S., Christensen, N. J., Warberg, J., & Saltin, B. (1997). Acute and adaptive responses in humans to exercise in a warm, humid environment. *Pflugers Archiv European Journal of Physiology*, 434, 49–56.
- Noakes, T. (2003). Fluid replacement during marathon running. *Clinical Journal of Sport Medicine: Official Journal of the Canadian Academy of Sport Medicine*, 13(5), 309–318.
- Noakes, T. D. (2007). Hydration in the marathon: using thirst to gauge safe fluid replacement. *Sports Medicine (Auckland, N.Z.)*, 37(4-5), 463–466.
- Noakes, T. D., Peltonen, J. E., & Rusko, H. K. (2001). Evidence that a central governor regulates exercise performance during acute hypoxia and hyperoxia. *The Journal of Experimental Biology*, 204(Pt 18), 3225–3234.
- Nolte, H. W., Noakes, T. D., & Van Vuuren, B. (2011). Trained humans can exercise safely in extreme dry heat when drinking water ad libitum. *Journal of Sports Sciences*, 29(12), 1233–1241.
- Nybo, L., Jensen, T., Nielsen, B., & Gonzalez-Alonso, J. (2001). Effects of marked hyperthermia with and without dehydration on VO₂ kinetics during intense exercise. *J Appl Physiol (1985)*, 90(3), 1057–1064.
- Nybo, L., & Nielsen, B. (2001a). Hyperthermia and central fatigue during prolonged exercise in humans. *J Appl Physiol (1985)*, 91(3), 1055–1060.
- Nybo, L., & Nielsen, B. (2001b). Hyperthermia and central fatigue during prolonged exercise in humans. *Journal of Applied Physiology (Bethesda, Md. : 1985)*, 91(3), 1055–1060.
- Nybo, L., & Nielsen, B. (2001c). Perceived exertion is associated with an altered brain activity during exercise with progressive hyperthermia. *J Appl Physiol (1985)*, 91(5), 2017–2023.

- Nybo, L., Rasmussen, P., & Sawka, M. N. (2014). Performance in the heat-physiological factors of importance for hyperthermia-induced fatigue. *Comprehensive Physiology*, 4(2), 657–689.
- Nybo, L., & Secher, N. H. (2004). Cerebral perturbations provoked by prolonged exercise. *Prog Neurobiol*, 72(4), 223–261.
- Nybo, L., Secher, N. H., & Nielsen, B. (2002). Inadequate heat release from the human brain during prolonged exercise with hyperthermia. *J Physiol*, 545(Pt 2), 697–704.
- Pandolf, K. B. (1998). Time course of heat acclimation and its decay. *International Journal of Sports Medicine*, 19 Suppl 2, 157–160.
- Parsons, K. C. (1999). International standards for the assessment of the risk of thermal strain on clothed workers in hot environments. *The Annals of Occupational Hygiene*, 43(5), 297–308.
- Périard, J. D., Racinais, S., & Sawka, M. N. (2015). Adaptations and mechanisms of human heat acclimation: Applications for competitive athletes and sports. *Scandinavian Journal of Medicine and Science in Sports*, 25, 20–38.
- Péronnet, F., Mignault, D., Du Souich, P., Vergne, S., Bellego, L. Le, Jimenez, L., & Rabasa-Lhoret, R. (2012). Pharmacokinetic analysis of absorption, distribution and disappearance of ingested water labeled with D2O in humans. *European Journal of Applied Physiology*, 112(6), 2213–2222.
- Perucca, J., Bouby, N., Valeix, P., & Bankir, L. (2007). Sex difference in urine concentration across differing ages, sodium intake, and level of kidney disease. *American Journal of Physiology. Regulatory, Integrative and Comparative Physiology*, 292(2), 700–705.
- Raman, A., Schoeller, D. A., Subar, A. F., Troiano, R. P., Schatzkin, A., Harris, T., Tylavsky, F. A. (2004). Water turnover in 458 American adults 40-79 yr of age. *American Journal of Physiology. Renal Physiology*, 286(2), 394–401.
- Ramanathan, N. L. (1964). A new weighting system for mean surface temperature of the human body A new weighting system for mean surface temperature of the human body1. *J. Appl. Physiol*, 19(3), 531–533.
- Reithner, L. (1981). Insensible water loss from the respiratory tract in patients with fever. *Acta Chirurgica Scandinavica*, 147(3), 163–7.
- 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, 133–137.

- 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. *J Clin Invest*, *45*(11), 1801–1816.
- Saat, M., Tochihara, Y., Hashiguchi, N., Sirisinghe, R. G., Fujita, M., & Chou, C. M. (2005). Effects of exercise in the heat on thermoregulation of Japanese and Malaysian males. *Journal of Physiological Anthropology and Applied Human Science*, *24*, 267–275.
- Saltin, B., & Hermansen, L. (1966). Esophageal, rectal, and muscle temperature during exercise. *Journal of Applied Physiology*, *21*(1), 1757–1762.
- Saunders, A. G., Dugas, J. P., Tucker, R., Lambert, M. I., & Noakes, T. D. (2005). The effects of different air velocities on heat storage and body temperature in humans cycling in a hot, humid environment. *Acta Physiol Scand*, *183*(3), 241–255.
- Sawka, M. N., Burke, L. M., Eichner, E. R., Maughan, R. J., Montain, S. J., & Stachenfeld, N. S. (2007). American College of Sports Medicine position stand. Exercise and fluid replacement. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, *39*(2), 377–90.
- Sawka, M. N., & Greenleaf, J. E. (1992). Current concepts concerning thirst, dehydration, and fluid replacement: overview. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, *24*(6), 643–644.
- 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*, *1*(4), 1883–1928.
- Sawka, M. N., & Montain, S. J. (2000). Fluid and electrolyte supplementation for exercise heat stress. *The American Journal of Clinical Nutrition*, *72*(2 Suppl), 564–72.
- Sawka, M. N., Pandolf, K. B., & Wenger, B. C. (1996). Thermoregulatory Responses to Acute Exercise-Heat Stress and Heat Acclimation. *Handbook of Physiology: Environmental Physiology*, 157–185.
- Sawka, M. N., Toner, M. M., Francesconi, R. P., & Pandolf, K. B. (1983). Hypohydration and exercise: effects of heat acclimation, gender, and environment. *Journal of Applied Physiology (Bethesda, Md. : 1985)*, *55*, 1147–1153.
- Schabort, E. J., Hawley, J. A., Hopkins, W. G., Mujika, I., & Noakes, T. D. (1998). A new reliable laboratory test of endurance performance for road cyclists. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, *30*, 1744–1750.
- 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. *Physiology and Behavior*, *103*(2), 217–224.

- Selkirk, G. A., & McLellan, T. M. (2001). Influence of aerobic fitness and body fatness on tolerance to uncompensable heat stress. *Journal of Applied Physiology*, *91*(5), 2055–2063.
- Shapiro, Y., Pandolf, K. B., Avellini, B. A., Pimental, N. A., & Goldman, R. F. (1980). Physiological responses of men and women to humid and dry heat. *Journal of Applied Physiology (Bethesda, Md. : 1985)*, *49*, 1–8.
- Sharwood, K. A., Collins, M., Goedecke, J. H., Wilson, G., & Noakes, T. D. (2004). Weight changes, medical complications, and performance during an Ironman triathlon. *British Journal of Sports Medicine*, *38*(6), 718–724.
- Shirreffs, S. M., & Maughan, R. J. (1998). Urine osmolality and conductivity as indices of hydration status in athletes in the heat. *Med Sci Sports Exerc*, *30*(11), 1598–1602.
- Sinclair, W. H., Crowe, M. J., Spinks, W. L., & Leicht, A. S. (2007). Pre-pubertal children and exercise in hot and humid environments: A brief review. *Journal of Sports Science and Medicine*.
- Speedy, D. B., Noakes, T. D., Kimber, N. E., Rogers, I. R., Thompson, J. M., Boswell, D. R., Kuttner, J. A. (2001). Fluid balance during and after an ironman triathlon. *Clin J Sport Med*, *11*(1), 44–50.
- Srámek, P., Simecková, M., Janský, L., Savlíková, J., & Vybíral, S. (2000). Human physiological responses to immersion into water of different temperatures. *European Journal of Applied Physiology*, *81*(5), 436–442.
- 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 cyclists. *Journal of Science and Medicine in Sport*, *3*, 186–193.
- Thornton, S. N. (2010). Thirst and hydration: Physiology and consequences of dysfunction. *Physiology and Behavior*, *100*(1), 15–21.
- Tikuisis, P., McLellan, T. M., & Selkirk, G. (2002). Perceptual versus physiological heat strain during exercise-heat stress. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, *34*(9), 1454–1461.
- Toto, K. H. (1994). Regulation of plasma osmolality: thirst and vasopressin. *Critical Care Nursing Clinics of North America*, *6*(4), 661–674.
- 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*(Pt 3), 905–915.

- 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. *The Journal of physiology*, 574(3), 915–920.
- Tucker, R., Rauch, L., Harley, Y. X., & Noakes, T. D. (2004). Impaired exercise performance in the heat is associated with an anticipatory reduction in skeletal muscle recruitment. *Pflugers Arch*, 448(4), 422–430.
- Voltaire, B., Berthouze-Aranda, S., & Hue, O. (2003). Influence of a hot/wet environment on exercise performance in natives to tropical climate. *Journal of Sports Medicine and Physical Fitness*, 43(3), 306–311.
- Walters, T. J., Ryan, K. L., Tate, L. M., & Mason, P. A. (2000). Exercise in the heat is limited by a critical internal temperature. *J Appl Physiol (1985)*, 89(2), 799–806.
- Wasserman, K., Whipp, B. J., Koyal, S. N., & Beaver, W. L. (1973). Anaerobic threshold and respiratory gas exchange during exercise. *Journal of Applied Physiology*, 35(2), 236–243.
- Watson, P., Hasegawa, H., Roelands, B., Piacentini, M. F., Loooverie, R., & Meeusen, R. (2005). Acute dopamine/noradrenaline reuptake inhibition enhances human exercise performance in warm, but not temperate conditions. *J Physiol*, 565(Pt 3), 873–883.
- Westerblad, H., Lee, J. A., Lännergren, J., & Allen, D. G. (1991). Cellular mechanisms of fatigue in skeletal muscle. *The American Journal of Physiology*, 261(2 Pt 1), 195–209.
- Wright, A., Marino, F. E., Kay, D., Micalos, P., Fanning, C., Cannon, J., & Noakes, T. D. (2002). Influence of lean body mass on performance differences of male and female distance runners in warm, humid environments. *Am J Phys Anthropol*, 118(3), 285–291.
- Wright, A., Marino, F. E., Kay, D., Micalos, P., Fanning, C., Cannon, J., & Noakes, T. D. (2002). Influence of lean body mass on performance differences of male and female distance runners in warm, humid environments. *American Journal of Physical Anthropology*, 118(3), 285–291.

ANNEXES
