

**UNIVERSITE DES ANTILLES**  
**UFR STAPS – CAMPUS DE FOUILLOLE – GUADELOUPE**

**Thèse présentée pour obtenir le grade de**  
**DOCTEUR DE L'UNIVERSITE DES ANTILLES**

**Discipline : STAPS**  
**(Sciences et Techniques des Activités Physiques et Sportives)**

**Effet de la combinaison de la température de l'eau bue et du menthol sur**  
**la performance aérobie en climat tropical**

Par:

**Trọng Thân TRẦN**

Soutenue Vendredi 20 Novembre 2015 devant un jury composé de :

Mr Saïd AHMAIDI – Professeur, Université de Picardie Jules Verne (Président de Jury)

Mme Sophie ANTOINE-JONVILLE – MCF-HDR, Université des Antilles (Assesseur)

Mr Olivier HUE – Professeur, Université des Antilles (Directeur)

Mr Vincent PIALOUX – Professeur, Université Claude Bernard - Lyon 1 (Rapporteur)

Mr Aurélien PICHON – MCF-HDR, Université de Poitiers (Rapporteur)

**UNIVERSITE DES ANTILLES**  
**UFR STAPS – CAMPUS DE FOUILLOLE – GUADELOUPE**

**Thèse présentée pour obtenir le grade de**  
**DOCTEUR DE L'UNIVERSITE DES ANTILLES**

**Discipline : STAPS**  
**(Sciences et Techniques des Activités Physiques et Sportives)**

**Effet de la combinaison de la température de l'eau buée et du menthol sur**  
**la performance aérobie en climat tropical**

Par:

**Trọng Thân TRẦN**

Soutenue Vendredi 20 Novembre 2015 devant un jury composé de :

Mr Saïd AHMAIDI – Professeur, Université de Picardie Jules Verne (Président de Jury)

Mme Sophie ANTOINE-JONVILLE – MCF-HDR, Université des Antilles (Assesseur)

Mr Olivier HUE – Professeur, Université des Antilles (Directeur)

Mr Vincent PIALOUX – Professeur, Université Claude Bernard - Lyon 1 (Rapporteur)

Mr Aurélien PICHON – MCF-HDR, Université de Poitiers (Rapporteur)

## **Remerciements**

### *Aux membres du jury*

Je remercie l'ensemble des membres du jury pour leur présence et souhaite qu'ils trouvent dans ce document une justification à leur investissement.

### *Aux rapporteurs*

C'est le plus sincèrement que je remercie les deux rapporteurs pour la somme de travail importante qu'a représenté l'expertise de ce document. Soyez convaincus que ce travail m'a été utile et qu'il a contribué à affiner ma réflexion.

**A mes parents et ma petite sœur**

**Avec toute ma reconnaissance et mes sincères  
remerciements**

## Remerciements

En premier lieu, je tiens à remercier Monsieur le Professeur Oliver HUE qui m'a donné la possibilité de travailler au laboratoire ACTES, qui a accepté d'encadrer ma thèse et m'a patiemment soutenu jusqu'à la fin. Acceptez, s'il vous plaît, ma profonde gratitude.

Je remercie particulièrement Mr Pham Ngoc Dung et Mme Ngo Thi Ngoc pour leur attention, leur soutien, leurs conseils, et encouragements. Sans eux, mon aventure n'aurait sans doute pas vu le jour. Je les remercie sincèrement pour tout cela.

Je suis particulièrement reconnaissant envers Mademoiselle Michelle BAILLOT qui m'a accueillie depuis les premières minutes où je suis arrivé en Guadeloupe. Votre soutien, votre sympathie et amitié m'ont aidé à surmonter progressivement les difficultés de la vie et du travail.

Je veux exprimer ma gratitude pour Kévin RINALDI qui m'a aidé dans ma recherche et m'a donné son amitié précieuse.

Je veux également exprimer ma gratitude pour Florence RIERA qui m'a aidé dans ma recherche et m'a transmis son expérience dans le travail de recherche.

Je veux également remercier Walid BRIKI, Stéphane SINNAPAH, Guillaume COUDEVYLLE, Éric JOBLET et Sophie ANTOINE pour leur soutien dans mon travail.

Je remercie sincèrement Raphaël PASQUIER qui m'a beaucoup aidé dans mon travail mais aussi dans ma vie.

Je voudrais exprimer toute ma reconnaissance à l'équipe de recherche du laboratoire ACTES, qui m'a beaucoup apporté et fait découvrir le travail de recherche et plus particulièrement aux enseignants de la faculté STAPS de l'Université des Antilles qui m'ont encouragé et aidé.

Je remercie Doan Hung Trang qui est mon collègue de travail et aussi mon pote.

Je veux remercier la famille de Mr Nguyen Tan Dat, et mes compatriotes, qui m'ont encouragé et donné leur soutien inconditionnel dans les difficiles moments d'intégration dans ma nouvelle vie en Guadeloupe.

Je remercie également mes ami(e)s Vietnamien(ne)s, Laotiens, Cambodgiens en Guadeloupe et au Vietnam.

J'oublie certainement quelqu'un alors je remercie très sincèrement toutes les personnes qui m'ont soutenu tout au long de ces années et qui se reconnaîtront.

## Résumé

La consommation de boissons froides et l'utilisation de menthol par voie orale sont des moyens efficaces pour lutter contre des effets néfastes du climat chaud /humide sur la performance aérobie. Les buts de cette thèse étaient 1) de déterminer l'efficacité des effets cumulatifs de l'eau froide et du menthol sur la performance aérobie et 2) d'identifier la capacité de renforcer la performance par la combinaison du précooling interne et du percooling interne en environnement tropical. Les expérimentations étaient des exercices de contre-la-montre, en laboratoire ou en extérieur, dans lesquelles les sujets ont bu des boissons (i.e., eau neutre, eau froide ou glace pilée) avec ou sans menthol. Les principaux résultats mettent en évidence que l'ingestion d'une boisson au menthol augmente la performance et cette augmentation s'accroît en diminuant la température du liquide ingéré (étude 1). Cette glace pilée mentholée semble mieux conserver, en conditions écologiques, la capacité d'amélioration de la performance observée en laboratoire (étude 2). Une fois que la glace pilée mentholée est prise au cours de l'effort, l'adjonction pré-exercice d'un refroidissement par boisson froide devient inutile pour accroître davantage la performance (étude 3). Enfin, une boisson froide au menthol permet de limiter le stress psychophysologique durant l'exercice (étude 1 et 2).

L'ingestion d'eau froide/mentholée ou de glace pilée/mentholée pendant l'exercice semble être une stratégie efficace pour améliorer la performance aérobie et peut être recommandée pour les athlètes lors de compétitions sportives sous climat chaud (sec ou humide).

## SOMMAIRE

Introduction générale.....	1
----------------------------	---

### PREMIERE PARTIE :REVUE DE LITERATURE

<b>1. Thermorégulation thermique dans un environnement chaud.....</b>	<b>4</b>
1.1. Les moyens physiques d'échanges de chaleur .....	4
1.2. Le transfert de chaleur par conduction .....	5
1.3. Le transfert de chaleur par convection .....	5
1.4. Le transfert de chaleur par radiation.....	7
1.5. Le transfert de chaleur par évaporation .....	7
<b>2. Exercice en environnement chaud .....</b>	<b>9</b>
2.1. La production de chaleur à l'exercice dans un environnement chaud.....	9
2.2. L'équilibre thermique du corps .....	10
2.3. Les réponses physiologiques au stress de la chaleur pendant l'exercice .....	12
2.4. La performance physique en environnement chaud .....	13
<b>3. Facteurs limitant la performance en environnement chaud .....</b>	<b>16</b>
3.1. L'hyperthermie .....	16
3.1.1. La température centrale.....	16
3.1.2. La température cutanée .....	18
3.2. Ajustement cardiovasculaire .....	19
3.3. La déshydratation .....	23
3.4. Psychologie.....	25

<b>4. Exercice d'endurance en milieu tropical (chaud et humide)</b> .....	27
4.1. Les caractéristiques d'un climat tropical.....	27
4.2. Les effets de l'humidité de l'air sur les réponses physiologique et psychologique pendant l'exercice.....	28
4.3. La performance d'exercice en milieu tropical.....	30
4.4. Les facteurs réduisant la performance d'exercice en milieu tropical.....	31
<b>5. Stratégies de lutte contre le stress thermique en milieu chaud et humide</b> .....	32
5. 1. L'acclimatation au climat chaud et la performance d'endurance.....	33
5. 2. Le refroidissement externe du corps.....	34
5.2.1. L'exposition à l'air froid.....	35
5.2.2. L'immersion dans l'eau (froide ou tempérée).....	36
5.2.3. Le port d'une veste de refroidissement.....	37
5.2.4. La combinaison entre les protocoles de stratégie de refroidissement externe.....	38
5.3. Le refroidissement interne du corps.....	39
5.3.1. Le refroidissement interne et la performance à l'exercice.....	41
5.3.2. L'absorption de boisson froide (ou glace pilée) et la fonction physiologique.....	43
5.3.2.1. La température centrale.....	43
5.3.2.2. L'ajustement circulatoire.....	45
5.3.3. L'absorption d'eau froide et les effets physiologique et psychologique ....	46
5.3.4. Les facteurs déterminant l'efficacité de l'absorption de boisson froide ....	48
5.3.4.1. Le temps d'absorption d'eau lié à la réduction de la Tcen.....	48
5.3.4.2. Le temps d'absorption de boisson froide et l'augmentation de la Tcen... ..	50
5.3.4.3. La température et quantité de l'eau absorbée.....	53
5.3.4.4. La température de l'environnement.....	54
5.3.5. Optimisation des impacts d'une boisson froide.....	54

<b>6. Menthol et l'exercice en climat chaud</b> .....	56
6.1. Le menthol et les fonctions physiologique et psychologique.....	56
6.1.1. Le menthol et les thermorécepteurs au froid (TRMP8) .....	56
6.1.2. Le menthol et l'effet analgésique.....	57
6.1.3. Le menthol et le confort respiratoire .....	57
6.1.4. Le menthol et la fonction cardiovasculaire .....	58
6.1.5. L'activité du système nerveux central .....	59
6.1.6. La température du corps.....	60
6.1.7. Le menthol et l'impact psychologique.....	60
6.2. Le menthol et la performance à l'exercice en environnement chaud .....	62
6.3. Les mécanismes de l'effet du menthol sur la performance .....	64

## **DEUXIEME PARTIE : CONTRIBUTION PERSONNELLE**

<b>1. Objectifs et hypothèses de recherche</b> .....	71
1.1. Objets du travail.....	72
1.2. Hypothèses de recherche .....	72
<b>2. Méthodologie générale</b> .....	74
2.1. Les sujets.....	74
2.2. Les lieux d'expérimentation .....	75
2.3. Les conditions environnementales .....	75
2.4. Les boissons .....	76
2.4.1. Les températures des boissons et élaboration de boisson au menthol .....	76
2.4.2. La quantité de boisson.....	76
2.5.2. Protocole du test de VO <sub>2</sub> max .....	77
2.6. Les designs expérimentaux .....	78
2.6.1. La normalisation des conditions expérimentales .....	78
2.6.2. Le déroulement des épreuves .....	79

2.7. Les mesures.....	85
2.7.1. Les paramètres physiologiques .....	85
2.7.1.1. La température centrale.....	85
2.7.1.2. La fréquence cardiaque .....	85
2.7.1.3. L'état d'hydratation.....	85
2.7.2. Les paramètres psychologiques.....	86
2.7.3. Les performances .....	86
2.8. L'analyse statistique .....	86
<b>3. Travaux.....</b>	<b>87</b>
3.1. Etude 1: Évaluation des effets d'une boisson de glace pilée/menthol ou l'eau froide/menthol sur les réponses psy-physiologiques et la performance d'exercice dans un environnement chaud/humide.....	87
3.2. Etude 2: Evaluation des effets de l'ingestion de l'eau froide/glace pilée au menthol sur la performance d'exercice en condition écologique. ....	94
3.3. Etude 3: Evaluation des effets d'une combinaison entre le précooling interne et le percooling interne sur la performance d'exercice dans un environnement chaud/humide. ....	100
<b>4. Discussion générale.....</b>	<b>105</b>
<b>5. Conclusion .....</b>	<b>116</b>
<b>6. Perspectives .....</b>	<b>117</b>
<b>Bibliographie .....</b>	<b>119</b>

## PARTIE TROISIEME : ANNEXES

### 1. Les paramètres psychologiques

### 2. Les publications

## ABRÉVIATIONS

CT	Confort thermique
FC	Fréquence cardiaque
FCmax	Fréquence cardiaque maximale
NDP	Niveau de difficulté perçu
Pmax	Puissance à $VO_{2max}$
HR	Humidité relative (première et seconde parties)
Ta	Température ambiante
Tcen	Température centrale
Tcu	Température cutanée
Toes	Température œsophagienne
ST	Sensation thermique
$VO_{2max}$	Consommation maximal d'oxygène

## **Introduction générale**

De nombreuses grandes compétitions sportives internationales et mondiales sont organisées dans les mois d'été (Compétition cycliste du Tour de France, Coupe du monde de FIFA de 2014, Jeux olympiques d'été de 2016 à Rio de Janeiro) dans lesquelles la température ambiante est souvent élevée et est susceptible d'engendrer une contrainte thermique lors de la pratique physique. On sait que la performance de l'exercice d'endurance est altérée dans des environnements chauds secs et encore davantage dans les environnements chauds et humides (i.e., en climat tropical).

Le mécanisme principal à l'origine de ces baisses de la performance est encore débattu, mais l'hyperthermie est considérée comme étant la cause principale. Afin de lutter contre cette influence néfaste, certaines stratégies ont été appliquées comme l'acclimatation à la chaleur (Racinais et coll. 2015; Nielsen et coll. 1993), le refroidissement externe et interne du corps (Rosse et coll. 2011) ou des boissons de goûts variés (Mundel et Jones 2010). Toutes ont été montrées efficaces pour réduire la fatigue physiologique et psycho-physique et améliorer l'exercice en environnement chaud.

Cependant, une acclimatation suffisante nécessite un minimum d'une semaine (Hue 2011). Le refroidissement externe prend du temps et logiquement est très difficile à appliquer dans les contextes réels de sport (Ihsan et coll. 2010). Actuellement, l'ingestion d'eau froide ou de glace pilée comme stratégies de refroidissement internes semblent être sinon les plus efficaces, les plus faciles à mettre en œuvre. Elles sont donc des options plus logiques pour une utilisation dans les compétitions sportives majeures à la chaleur (Ihsan et coll. 2010).

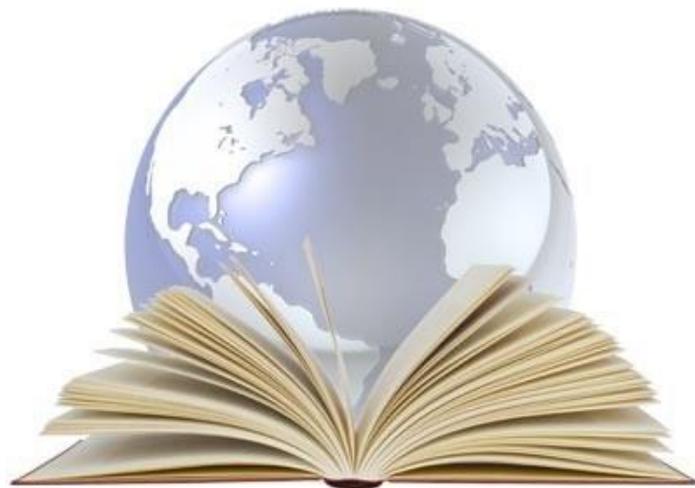
Le menthol est un composé d'origine végétale (*Mentha*) qui stimule les récepteurs au froid. Lorsqu'il est administré par voie orale, le menthol améliore les sensations de froid dans la bouche (Green 1985) et module l'activité des récepteurs olfactifs (Patel et coll. 2007). Eccles (2000) a résumé que le menthol peut influencer la soif et avoir des effets sur la respiration et sur l'excitation en relation avec ses effets sur les récepteurs au froid des voies orale et nasale. Le menthol pourrait donc également servir à améliorer la performance physique dans un climat chaud (Mundel et Jones 2010). Il a été récemment démontré que le rinçage de la bouche avec une solution mentholée a augmenté le temps de pédalage jusqu'à l'épuisement, ce qui suggère qu'un changement dans la perception de la température oropharyngée au cours de l'exercice dans la chaleur affecte positivement la capacité d'endurance et le sens de l'effort (Mundel et Jones 2010).

L'effet des boissons froides (ou glace pilée) et du menthol sur les récepteurs au froid est un ajustement par rétroaction afférente, relayé par le thermorécepteur interne relatif à l'état thermique du corps et/ou l'activation des régions du cerveau associées au mécanisme de récompense (en anglais: reward), au plaisir, à la motivation ou la fatigue, ce qui peut expliquer les améliorations notées (Siegel et coll. 2012, 2011; Mundel et Jones 2010). Cependant, les effets cumulatifs de boissons d'eau froide ou de glace pilée et de menthol sur les performances de l'exercice aérobic dans la chaleur n'ont pas encore été étudiées.

Le cadre théorique actuel de ce travail est présenté dans un premier chapitre. C'est une revue générale de la littérature sur les mécanismes des systèmes thermorégulateurs et cardio-vasculaires au cours de l'exercice en situation de stress thermique chaud, d'absorption des boissons froides ou de menthol. Dans un deuxième chapitre, nous proposons notre contribution personnelle, à savoir, nos études expérimentales, les discussions générales sur nos résultats et les perspectives qui en découlent. Une troisième partie regroupe enfin les annexes.

**PREMIERE PARTIE :**

# **REVUE DE LITERATURE**



## 1. Thermorégulation thermique dans un environnement chaud

### 1.1. Les moyens physiques d'échanges de chaleur

Le corps humain effectue toujours l'échange de chaleur avec l'environnement extérieur. Les principaux moyens d'échange de chaleur avec le milieu environnant sont la conduction, la convection, le rayonnement thermique et l'évaporation à la surface de la peau. La contribution de chaque processus au total de chaleur échangée dépend de l'individu et des conditions environnementales (température, humidité, vent) (Cheuvront et Haymes 2001). La circulation du sang transporte la quantité de chaleur du corps vers la peau pour qu'elle soit évacuée vers l'extérieur.

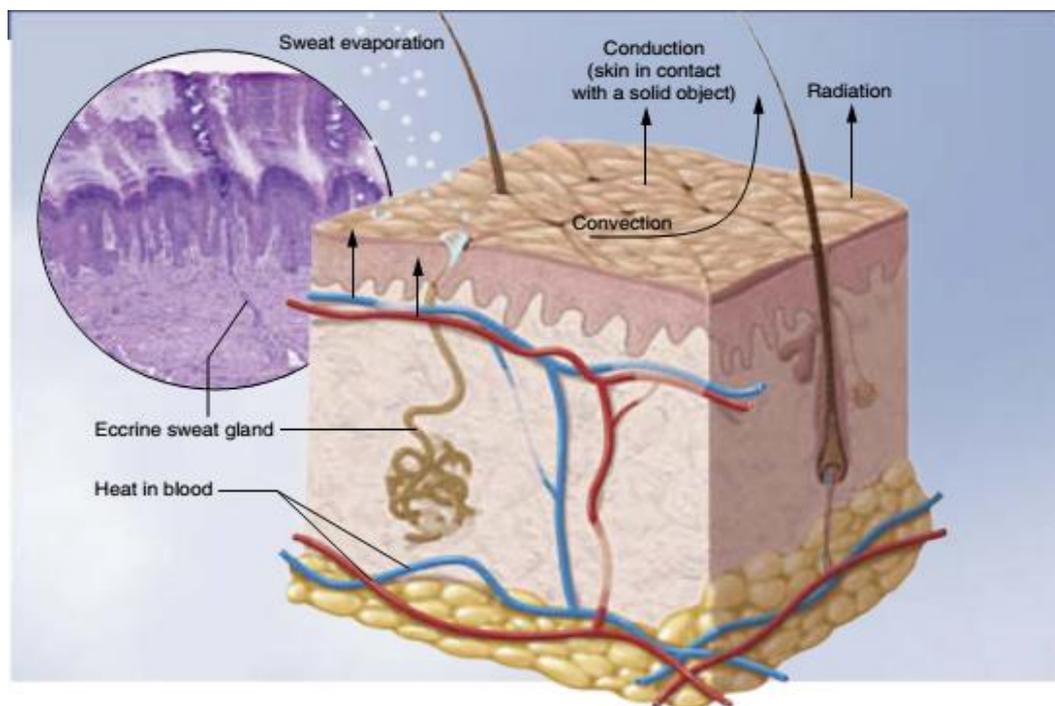


Figure 1.1. Elimination de la chaleur par la peau. La chaleur est apportée par le sang artériel à la surface de la peau et traverse le tissu sous-cutané par conduction (tiré de Kenney et coll. 2012).

## **1.2. Le transfert de chaleur par conduction**

Le transfert de chaleur par conduction est l'échange de chaleur entre deux objets ayant des températures différentes, et en contact direct l'un avec l'autre. La chaleur est transmise de l'objet ayant la température la plus élevée vers un autre à la température inférieure. La quantité de chaleur transférée dépend de la différence de température entre deux objets, plus la différence est grande, plus le transfert de chaleur est important. Elle dépend aussi des caractéristiques des corps. Par exemple, la capacité de transfert de chaleur par conduction de l'eau est 25 fois supérieure à l'air à la même température.

Dans le corps, la conduction a lieu au sein de l'organisme entre les tissus et la circulation de sang, du centre vers la périphérie. Le flux de chaleur qui est transporté du noyau jusqu'à la peau est proportionnel au gradient de températures entre les tissus de noyau et celles de la peau et la vitesse d'écoulement du sang (Gonzalez-Alonso 2012). À la surface, la peau cède de la chaleur aux molécules d'air ou aux objets les plus froids en contact avec la peau tels que les vêtements, les matériels. À température ambiante confortable, seulement 3% de la perte totale de la chaleur du corps se fait par ce système (Wendt et coll. 2007) et il est souvent ignoré lors du calcul de la capacité à équilibrer la chaleur du corps pendant l'exercice (Brotherhood 2008).

## **1.3. Le transfert de chaleur par convection**

La convection est l'échange de chaleur entre le corps humain avec un environnement de gaz ou de liquide en mouvement. La quantité de chaleur échangée dépend de la vitesse du flux d'air (ou de liquide si le corps est dans l'eau) qui passe

autour du corps: plus la vitesse est grande, plus les échanges de chaleur sont importants (Brotherhood 2008). Par exemple: La quantité de chaleur échangée pendant une course est de 6 à 7 fois supérieure à celle de la marche (Nadel et coll. 1977). Lorsque la température ambiante dépasse celle de la peau (environ 35 °C), le corps gagne de la chaleur par la convection (Brotherhood 2008).

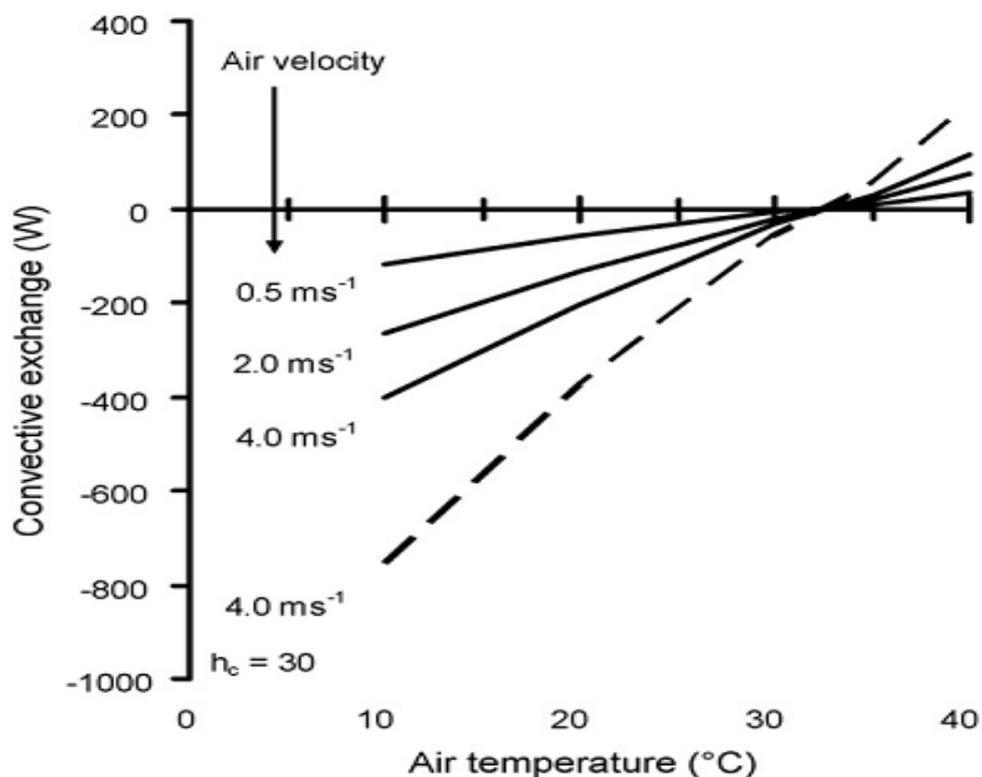


Figure 1.2. Échange de chaleur par convection sous les effets de la  $T_a$  et de la vitesse de l'air pour une production de chaleur de 800 W et une surface corporelle de 1.8 m<sup>2</sup>. La vitesse de l'air ( $V_a$ ) à 0.5 m.s<sup>-1</sup>, 2.0 m.s<sup>-1</sup> et 4.0 m.s<sup>-1</sup>. Des valeurs négatives indiquent la perte de chaleur. La ligne brisée indique l'échange de chaleur par convection pour une course à pied à 4.0 m.s<sup>-1</sup> calculés avec un coefficient de convection  $h_c = 30$ . À  $T_a$  d'environ 35 °C, où la  $T_{cu}$  et la  $T_a$  sont égales, il n'y a aucun échange convectif. (D'après Brotherhood 2008).

#### **1.4. Le transfert de chaleur par radiation**

Les objets à température élevée émettent un rayonnement thermique (l'infrarouge) qui transporte de l'énergie. Les matériaux à la température plus élevée émettent une quantité plus importante de rayons infrarouges et transfèrent de la chaleur vers les matériaux plus froids sans contact direct entre les deux objets. Dans le cas du corps humain, le rayonnement thermique se fait entre le corps humain et les objets environnants, tels que des vêtements, des objets et des appareils d'exercice. À la température ambiante de 21 °C à 25 °C, une personne nue peut perdre 60% du total de chaleur par radiation (Kenney et coll. 2012). Lorsque la température ambiante ( $\approx 36$  °C) est supérieure à celle de la peau, le corps va recevoir un rayonnement infrarouge venant de l'environnement extérieur (Brotherhood 2008; Chevront et Haymes 2001) (figure 1.3).

#### **1.5. Le transfert de chaleur par évaporation**

Lorsque la température ambiante augmente, le gradient entre la température cutanée ( $T_{cu}$ ) et la température ambiante se réduit. La dissipation de la chaleur par rayonnement thermique et par convection est minimisée, et dans ces cas la régulation de la température corporelle est tributaire principalement de l'évaporation de la sueur (Brotherhood 2008; Taylor 2006).

Le refroidissement par évaporation est un moyen important que le corps utilise pour réaliser le transfert de chaleur du corps vers l'environnement. C'est le processus par lequel l'eau passe de l'état liquide à l'état de vapeur. Cette transition absorbe la chaleur du corps. L'évaporation d'un millilitre d'eau entraîne la perte de 0.58 kcal (2.43

kJ) (Nadel et coll. 1977). L'effet de l'évaporation dépend beaucoup de la quantité de vapeur d'eau dans l'air. Dans les environnements à faible humidité, l'évaporation est plus efficace, tandis que l'humidité élevée de l'air entrave le processus d'évaporation. Au repos, la chaleur évacuée par évaporation représente de 10% à 20% du total de chaleur que le corps dissipe vers l'environnement extérieur (Kenney et coll. 2012).

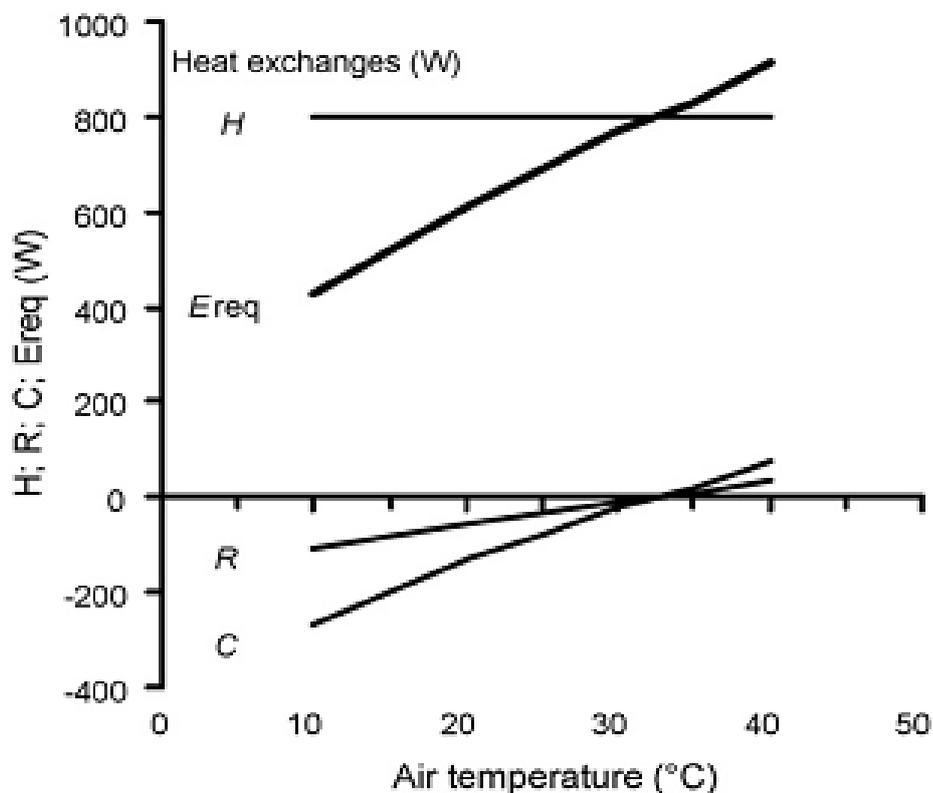


Figure 1.3. Energie évacuée par évaporation ( $E_{req}$ ) dans un exercice.  $H$  est la production de chaleur à 800 W et à 70% d'HR; la vitesse de l'air = 2.0 m. L'énergie évacuée par évaporation de la sueur augmente avec l'augmentation de la température de l'air parce que les pertes de chaleur par radiation ( $R$ ) et par convection ( $C$ ) diminuent. (D'après Brotherhood 2008).

## **2. Exercice en environnement chaud**

### **2.1. La production de chaleur à l'exercice dans un environnement chaud**

La source de chaleur que le corps produit au cours de l'exercice dans un environnement chaud est principalement due à l'augmentation du métabolisme par l'activité musculaire (Gonzalez-Alonso 2012). Lorsque l'oxydation du substrat va générer de l'énergie pour fonctionner, 70% de cette énergie est convertie en chaleur. La production de chaleur pendant l'exercice peut-être de 10 à 20 fois supérieure à celle produite au repos (Sawka et Wenger 1998 cité par Lim et coll. 2008; Armstrong et coll. 1996). Cela pourrait conduire à l'augmentation de la température corporelle de 1.0 °C toutes les 5 minutes en cas de l'absence de tous les mécanismes de dissipation de chaleur (Armstrong et coll. 1996).

En outre, le corps peut également recevoir de la chaleur de l'environnement par radiation et convection. Par exemple, le corps peut être soumis à un flux thermique surfacique de  $200 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$  lorsqu'il est exposé au soleil (Brotherhood 2008). Cela conduit à une augmentation de 1.5 °C – 2.0 °C de la  $T_{cu}$  (Brotherhood 2008; Hodder et Parsons 2007). Par conséquent, cela peut entraîner une augmentation de la température centrale du corps ( $T_{cen}$ ) en raison la réduction de l'écart entre sa température et celle de la peau (Maughan 2010).

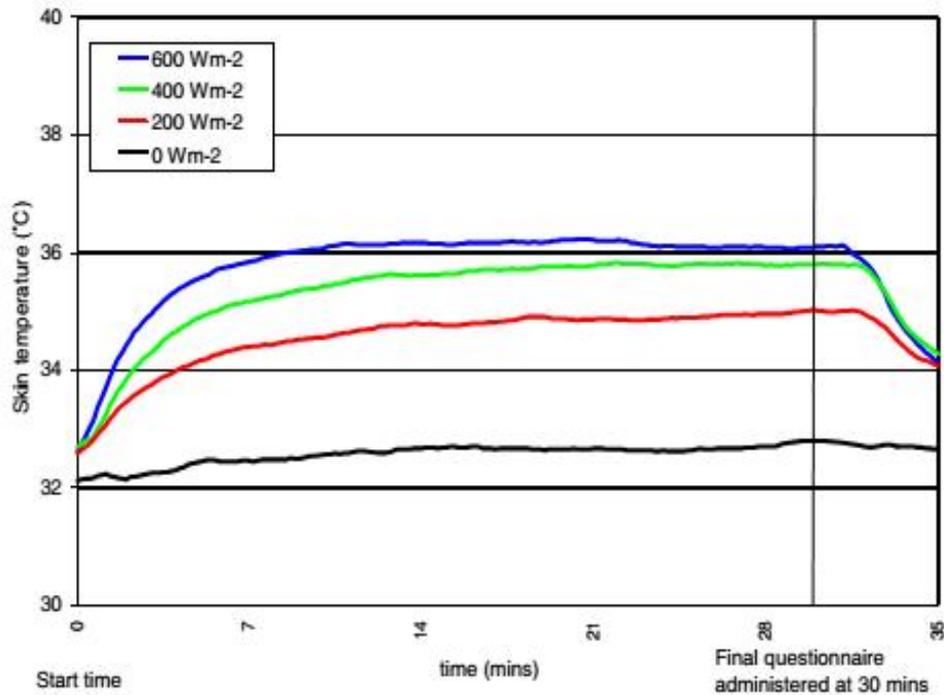


Figure 1.4. Températures cutanées moyennes à quatre intensités différentes du rayonnement solaire simulé (D'après Hodder et Parsons 2007).

## 2.2. L'équilibre thermique du corps

Le processus de l'équilibre thermique (la  $T_{cen}$  doit rester constante) est obtenu grâce à un équilibre dynamique qui est directement lié aux gains et pertes de chaleur. L'équilibre thermique chez un humain peut être représenté par l'équation de bilan thermique :

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

M = quantité de chaleur par production de chaleur métabolique

W = quantité de chaleur produite par travail mécanique

R = quantité d'échange de chaleur par radiation de la peau

C = quantité d'échange de chaleur par convection

K = quantité d'échange de chaleur par conduction

$E$  = perte de chaleur par évaporation

$S$  = quantité de chaleur stockée dans le corps

(Toutes les unités sont  $W \cdot m^{-2}$ )

Lorsque la production d'énergie et l'énergie émise vers l'environnement sont égales,  $S = 0$ , la température du corps ne varie pas et la  $T_{cen}$  reste à un état d'équilibre. Lorsque la production d'énergie est supérieure à l'énergie émise vers l'environnement,  $S > 0$  et la chaleur reste dans le corps, la température corporelle va augmenter. Au contraire, lorsque la perte de chaleur est supérieure à l'accumulation de chaleur métabolique,  $S < 0$  et la température corporelle diminue (Taylor 2006).

Lorsque la température de l'air atteint  $\approx 35$  °C, la perte de chaleur par conduction et radiation est désactivée (Brotherhood 2008; Adams et coll. 1992). Par conséquent, la dissipation de chaleur du corps dépend de l'évaporation. Ce processus représente 80% de chaleur que le corps dissipe vers l'environnement en condition d'exercice physique (Kenney et coll. 2012). Cependant, l'efficacité de l'évacuation est réduite lorsque, par exemple, l'humidité de l'air augmente. Lorsque l'humidité relative (HR) est trop élevée, le gradient de vapeur d'eau pour l'évaporation de la sueur est réduit, réduisant de cette façon le taux d'évaporation sudoral (Brotherhood 2008) (figure 1.5). La sueur ruisselle sur la peau et devient de ce fait inefficace dans la dissipation de chaleur par évaporation, le stockage de chaleur devient alors particulièrement important lorsqu'un sujet effectue un exercice en climat chaud et humide.

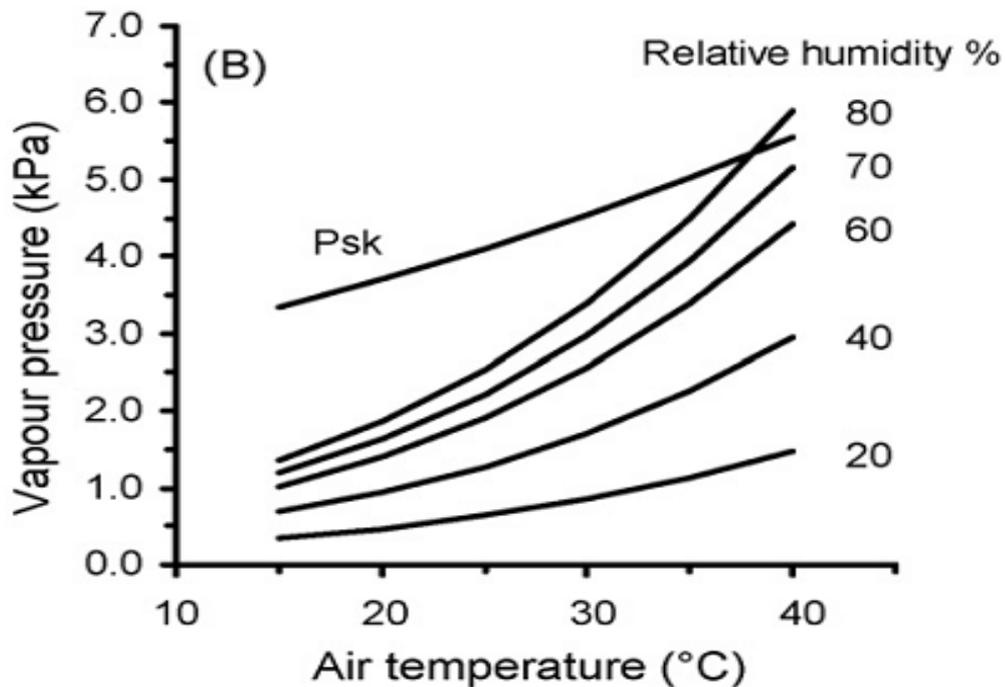


Figure 1.5. Relations entre la température de l'air, l'humidité relative et la pression de vapeur d'eau. La Psk indique la pression de vapeur à la surface de la peau à la température cutanée. Les courbes indiquent la pression de vapeur de l'air ambiant en relation avec la température de l'air et l'humidité relative, respectivement. Le gradient de pression de vapeur entre la surface de la peau et l'air ambiant détermine le potentiel à l'évaporation de sueur. Plus le gradient est grand, plus sueur est évaporée. Cette figure montre que dans des conditions chaudes et humides, la pression de vapeur ambiante est élevée et donc le gradient est faible (D'après Brotherhood 2008).

### 2.3. Les réponses physiologiques au stress de la chaleur pendant l'exercice

La température interne du corps est maintenue stable aux alentours de 37 °C. Cela se produira uniquement si la capacité de la perte de chaleur dans un environnement donné peut compenser le taux de production de chaleur métabolique. En milieu chaud et plus particulièrement en milieu chaud/humide, l'équilibre thermique est impossible.

Les mécanismes de perte sont incapables d'équilibrer le taux de production de chaleur métabolique. Par conséquent, le taux de stockage de la chaleur du corps est positif et la T<sub>cen</sub> continue à croître (Cheung et coll. 2000). Les augmentations de la température corporelle (centrale ou cutanée) sont détectées par des récepteurs thermiques installés sur la peau, la muqueuse de la bouche, les voies urinaires génitales, l'œsophage, l'estomac, dans une grosse veine dans l'abdomen et dans l'hypothalamus (Romanovsky 2007). L'hypothalamus joue un rôle important dans le contrôle de la température du corps. Il traite les informations sur la température de toutes les parties du corps et active les réponses thermorégulatrices, comme la transpiration et la vasodilatation cutanée (Cheuvront et Heymes 2001), pour tout changement dans la température corporelle (Wendt et coll. 2007; Cooper 2002; Gleeson 1998). Tandis que la transpiration (l'augmentation du taux de sudation) aide le corps à perdre la chaleur par le refroidissement lié à l'évaporation de la sueur, la vasodilatation cutanée augmente le flux sanguin de la peau pour perdre la chaleur par convection, rayonnement et évaporation (Wendt et coll. 2007; Charkoudian 2003). Par exemple: Le taux de transpiration peut n'être que 100 mL.h<sup>-1</sup> pendant l'exercice léger dans des environnements froids ou modérés, mais ce taux est capable de monter à plus de 3.000 mL.h<sup>-1</sup> pendant un exercice vigoureux dans des environnements chauds (Rehrer et Burke 1986 cité par Murray 2007) et le débit sanguin cutané peut augmenter 25-30 fois (Crandall et Gonzalez-Alonso 2010; Charkoudian 2003).

#### **2.4. La performance physique en environnement chaud**

Il est largement montré que l'environnement chaud réduit les performances de l'exercice d'endurance (Cuddy et coll. 2014; Tucker et coll. 2006, 2004; Kay et coll. 2001; Nybo et Nielsen 2001; Galloway et Maughan 1997; Parkin et coll. 1999;

Gonzalez-Alonso et coll. 1999b). Galloway et Maughan (1997) ont réalisé une étude pour déterminer l'impact de la température de l'environnement sur la performance dans quatre cas différents. Des sujets ont pédalé à 70% de consommation maximale d'oxygène ( $VO_{2max}$ ) jusqu'à l'épuisement aux températures ambiantes de 4 °C, 11 °C, 21 °C et 31 °C. Les résultats ont indiqué que le temps d'exercice le plus long était à 11 °C et le plus court étaient à 31 °C (4 °C = 81.4 min  $\pm$  9.6 min, 11 °C = 93.5 min  $\pm$  6.2 min, 21 °C = 81.2 min  $\pm$  5.7 min et 31 °C = 51.6 min  $\pm$  3.7 min). Parkin et coll. (1999) ont montré que la performance à vélo à 70% de  $VO_{2max}$  jusqu'à l'épuisement dans trois environnements différents aux températures 3 °C, 20 °C et 40 °C était réduite lorsque la température ambiante augmentait. Les temps étaient de 85 min  $\pm$  8 min vs 60 min  $\pm$  11 min et 30 min  $\pm$  3 min, respectivement. Les résultats de l'étude de Marino et coll. (2000) ont montré qu'après 30 minutes de course à 70% de la vitesse maximale sur le tapis roulant, les sujets réalisant 8 km de course à pied à un rythme libre ont une performance moindre dans des conditions de 35 °C (30.4 min  $\pm$  2.9 min) par rapport à 25 °C (27.4 min  $\pm$  1.5 min) et 15 °C (27.0 min  $\pm$  1.5 min). Tucker et coll. (2006) ont observé un temps d'exercice significativement plus court dans un environnement à 35 °C (34.0 min  $\pm$  10.4 min) que dans l'environnement à 25 °C (48.6 min  $\pm$  14.1 min) et à 15 °C (50.2 min  $\pm$  16.3 min) lorsque les sujets avaient pédalé à un niveau de difficulté perçue (NDP) (i.e., échelle de Borg) fixe (i.e., 16) (figure 1.6). Très récemment, Périard et coll. (2011b) ont indiqué que la puissance développée lors de 40 km de pédalage était réduite dans la condition de 35 °C (64.3 min  $\pm$  2.8 min, 242.1 W) par rapport à 20 °C (59.8 min  $\pm$  2.6 min, 279.4 W).

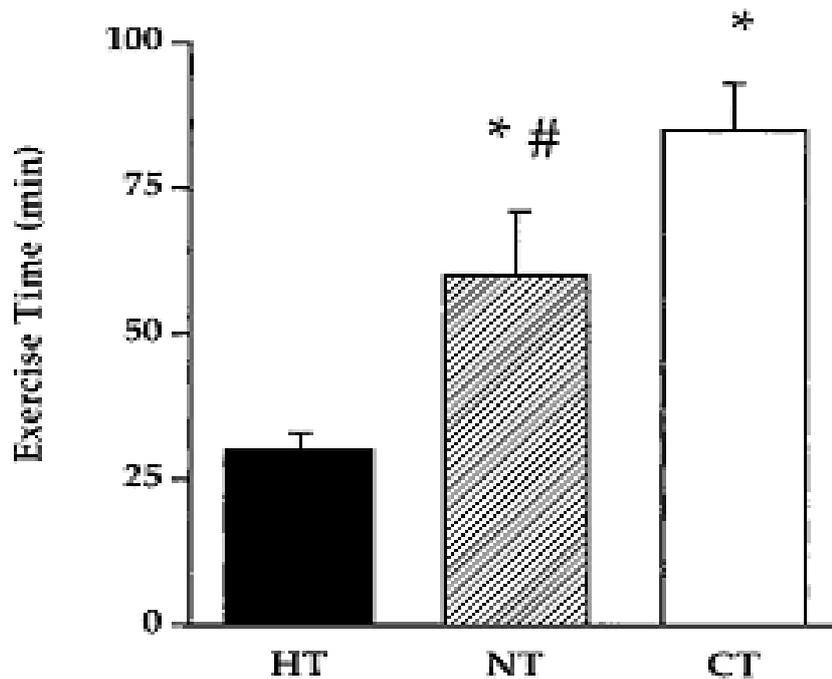


Figure 1.6. Performance à l'exercice jusqu'à l'épuisement à 70% de  $VO_{2max}$  dans l'environnement à 40 °C (HT), à 20 °C (NT) et à 3 °C (CT). \* différence significative par rapport à HT,  $P < 0.05$ . # différence significative par rapport à CT,  $P < 0.05$  (D'après Parkin et coll. 1999).

Les mécanismes à l'origine de ces baisses de performance en environnement chaud restent largement méconnus, mais on pense qu'ils sont influencés par de nombreux facteurs en association avec l'hyperthermie, y compris l'ajustement cardiovasculaire (Gonzalez-Alonso et Calbet 2003; Périard et coll. 2012, 2011a, 2011b; Montain et Coyle 1992), la déshydratation (Cheuvront et coll. 2010; Voltaire et coll. 2002; Sawka et coll. 2001; Aoyagi et coll. 1994) et des facteurs psychologiques (Cheung 2010).

### **3. Facteurs limitant la performance en environnement chaud**

#### **3.1. L'hyperthermie**

##### **3.1. 1. La température centrale**

L'exercice d'endurance en environnement chaud provoque l'augmentation de la  $T_{cen}$  qui est suggérée être un des facteurs qui dégrade la performance aérobie. Les résultats dans l'étude de Peiffer et Abbiss (2011) ont indiqué que la vitesse de montée de la température rectale en exercice dans un environnement chaud (32 °C) est plus élevée que celle en environnement frais (17 °C). Les auteurs ont montré que le taux de montée en température rectale pendant un contre-la-montre de 40 km de pédalage a une relation forte ( $r = 0.93$ ) avec une puissance plus basse et un temps plus long à 32 °C comparé à 17 °C. Les résultats ont également indiqué que la température rectale à la fin de l'exercice en environnement chaud était supérieure à celle en environnement frais (Peiffer et Abbiss 2011). Les résultats de certaines études antérieures (Galloway et Maughan 1997; Parkin et coll. 1999) ont également montré que la réduction de performance de l'exercice en environnement chaud s'accompagne d'une température rectale plus élevée qu'en environnement frais.

D'autre part, il a été suggéré l'existence d'une température plafond : l'exercice dans un environnement chaud s'arrête lorsque la  $T_{cen}$  atteint  $\approx 40^{\circ}\text{C}$ . En effet, dans l'étude de Gonzalez-Alonso et coll. (1999b), les sujets ont participé aux trois essais dans lesquels ils ont commencé à pédaler à 60% de  $\text{VO}_{2\text{max}}$  jusqu'à l'épuisement dans un environnement de 40 °C avec des températures œsophagiennes ( $T_{oes}$ ) de départ différentes (i.e., 36 °C, 37 °C ou 38 °C). Les résultats ont indiqué que les performances étaient différentes dans ces conditions (63 min, 46 min, 28

min, respectivement) mais les sujets ont arrêté à des températures similaires de l'ordre de 40.1-40.3 °C (figure 1.7).

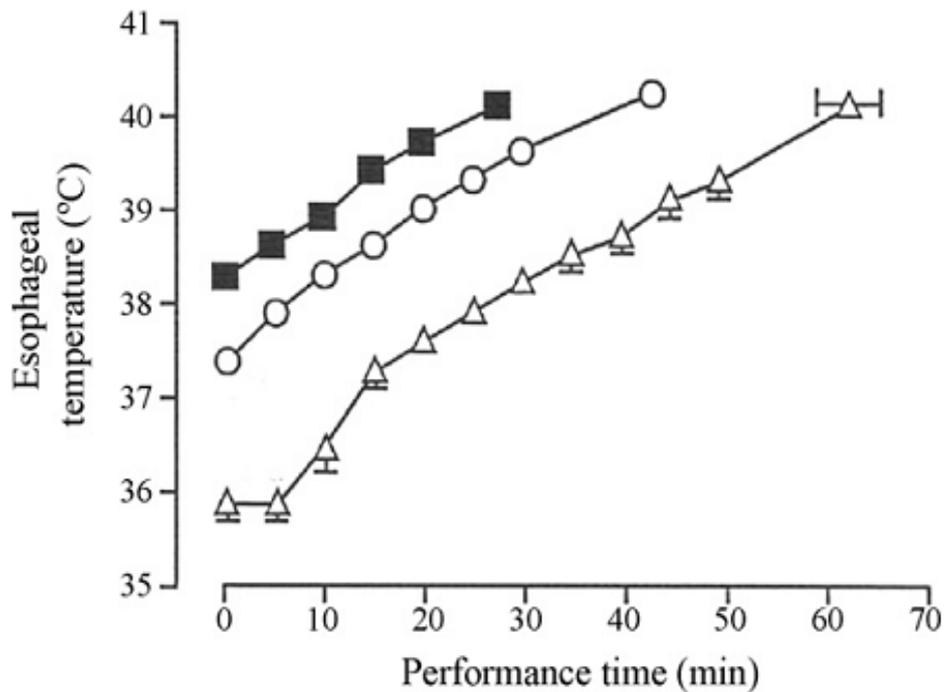


Figure 1.7. Toes au départ (36 °C, 37 °C ou 38 °C) et à la fin (ordre de 40.1-40.3°C) dans l'exercice jusqu'à l'épuisement à 60% de  $VO_{2max}$  dans un environnement de 40°C (D'après Gonzalez-Alonso et coll. 1999b).

Auparavant, Nielsen et coll. (1993) ont également montré que la performance d'exercices à 60% de  $VO_{2max}$  a augmenté après le processus d'adaptation en environnement chaud de 12 jours (le temps d'exercice avant et après l'acclimatation: 48 min vs 80 min, respectivement). Mais avant et après l'adaptation, l'arrêt de l'exercice coïncide avec des températures centrales d'environ 40 °C. De plus, aucune diminution du débit cardiaque, de débit sanguin vers les muscles actifs ni aucun changement dans l'utilisation de substrat n'ont été observés

après l'acclimatation par rapport à avant l'acclimatation. Il a donc été proposé que la température  $\approx 40^{\circ}\text{C}$  soit la cause de l'épuisement pendant l'exercice dans un environnement chaud (Nielsen et coll. 1993). Ainsi, quelle que soit l'acclimatation à la chaleur ou le niveau de la Tcen avant l'exercice, les sujets ont toujours arrêté quand la Tcen atteint une valeur élevée au-delà de laquelle l'exercice ne peut pas continuer. Ce phénomène peut servir de mécanisme de protection visant la prévention de l'hyperthermie catastrophique. Cela a contribué à établir un mécanisme théorique appelé « température centrale critique » (Cheung 2007).

### **3.1.2. La température cutanée**

Schlader et coll. (2011b) ont mené une étude dans laquelle les sujets ont pédalé au rythme libre en 30 minutes dans un environnement chaud ( $40^{\circ}\text{C}$ ) ou frais ( $20^{\circ}\text{C}$ ). Les résultats ont indiqué que les performances en total de travail (kJ) et en puissance (W) ont réduit de 21% et 22%, respectivement, dans la condition « chaude » par rapport à la condition « frais ». Alors que la Tcen était similaire dans les deux conditions, une Tcu moyenne plus élevée dans la condition chaude (chaude:  $37.3^{\circ}\text{C}$  vs frais:  $32.4^{\circ}\text{C}$ ) a été suggéré comme la cause de ces diminutions. Ely et coll. (2010) ont évalué des impacts de l'environnement à  $40^{\circ}\text{C}$  (chaud) et  $21^{\circ}\text{C}$  (frais) sur 15 minutes de pédalage sur un ergocycle. La performance évaluée par le total de travail (kJ) a réduit de 17% avec l'environnement chaud par rapport à environnement frais alors que la Tcen et la fréquence cardiaque (FC) étaient semblables dans les deux conditions. La diminution de la performance a été associée à une température de peau supérieure dans un environnement chaud (i.e.,  $36^{\circ}\text{C}$  vs  $30^{\circ}\text{C}$  dans un environnement frais). Les auteurs, Schlader et coll. (2011b) ont émis l'hypothèse que la Tcu élevée

augmente le flux sanguin au niveau de la peau et par conséquent réduit le débit cardiaque disponible pour les muscles, augmentant artificiellement le niveau d'intensité d'exercice (pour une intensité absolue stable) ou/et augmentant l'inconfort thermique (Schlader et coll. 2011b; Ely et coll. 2010). Les recherches mentionnées ci-dessus ont montré que la température élevée de la peau est l'un des facteurs responsables de la diminution de la performance d'endurance dans les environnements chauds, le changement de la Tcu étant lié majoritairement au changement de la température ambiante (i.e., une augmentation de 10 °C de température ambiante augmente la Tcu de 4 °C (Kenefick et coll. 2010)).

D'autre part, les signaux de la Tcu élevée sont considérés comme un facteur important pour régler l'intensité de l'exercice. Schlader et coll. (2011a) ont examiné l'effet de la température de la peau sur la puissance dans les premières 60 minutes de pédalage avec l'utilisation d'une veste perfusée de liquide dont la température peut être ajustée (du chaud au froid ou froid au chaud). Ils ont observé que la puissance est plus élevée lorsque les sujets ont commencé avec la peau soumise à une température froide puis réchauffée pendant l'exercice que le contraire. Les auteurs ont conclu que la Tcu et la perception de chaleur au début d'exercice jouent un rôle pour la sélection de l'intensité de l'exercice.

### **3.2. Ajustement cardiovasculaire**

L'augmentation du flux sanguin de la peau lors d'un stress de chaleur est importante pour un échange de chaleur vers l'environnement. La circulation sanguine de la peau est augmentée de façon marquée dans des conditions chaudes. Au repos, le flux sanguin de la peau est d'environ 250 mL.min<sup>-1</sup> dans des environnements

tempérés (Charkoudian 2003). Cependant, il peut augmenter jusqu'à  $8 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$  sous le stress thermique (Gonzalez-Alonso et coll. 2008; Charkoudian 2003; Kenney et Johnson 1992). Cette augmentation de la distribution du flux sanguin de la peau, d'une part, augmente le travail et impose des contraintes sur le système cardiovasculaire. D'autre part, la redistribution du débit cardiaque ( $Q_c$ ) entraîne des limitations du flux sanguin vers les muscles actifs car il y a concurrence pour le  $Q_c$  entre les muscles actifs et la circulation sanguine de la peau (Gonzalez-Alonso 2012; Gonzalez-Alonso et coll. 2008, 2003).

L'augmentation de la  $T_{\text{cen}}$  et de la  $T_{\text{cu}}$  au cours de l'exercice dans un environnement chaud provoque une augmentation du flux sanguin vers la peau pour faciliter le refroidissement et en même temps une augmentation de la FC, une réduction du volume sanguin central et de la pression artérielle moyenne. Cela conduit à une réduction de la pression de remplissage du ventricule, à une plus grande augmentation de la FC. Ce deux événements entraînent une réduction du temps de remplissage ventriculaire et du volume d'éjection systolique (Périard et coll. 2013, 2012, 2011b; Chevront et coll. 2010; Gonzalez-Alonso et coll. 2003; Gonzalez-Alonso et coll. 2000; Fritzsche et coll. 1999; Turkevich et coll. 1988 ; Rowell 1974). Donc le flux sanguin, le  $\text{VO}_2$  vers les muscles actifs et vers le cerveau diminuent (Gonzalez-Alonso et coll. 2000). Périard et coll. (2013) ont mené une étude dans laquelle les sujets ont pédalé une heure à 60% de  $\text{VO}_{2\text{max}}$  dans des environnements à  $40 \text{ }^\circ\text{C}$  (chaud) et à  $18 \text{ }^\circ\text{C}$  (frais). Les auteurs ont indiqué que l'augmentation du stress thermique (i.e.,  $T_{\text{cu}}$  et  $T_{\text{cen}}$ ) en condition chaude a doublé le flux sanguin sous-cutané par rapport à celui en condition fraîche. Cela a résulté que la FC était maximale (97% de  $\text{FC}_{\text{max}}$ ) à la fin de l'exercice en condition chaude, alors que celle-ci était à 143 bpm en condition fraîche. De plus, le volume d'éjection

systolique et le débit cardiaque dans la condition chaude étaient inférieurs de 31% et 9%, respectivement, à la fin de l'exercice par rapport à la condition fraîche. La figure 1.8 montre les processus physiologiques qui expliquent ces différences.

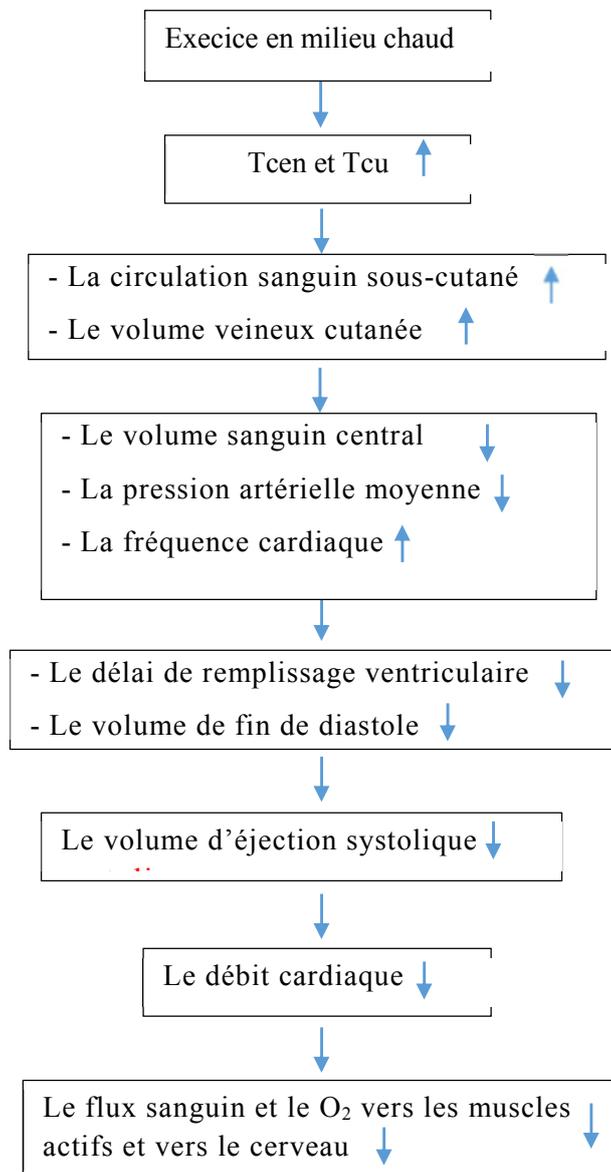


Figure 1.8. Ajustement cardiovasculaire à l'exercice en environnement chaud (D'après Périard et coll. 2013).

L'ajustement qui réduit le flux sanguin vers l'activité musculaire et le déclin du  $VO_{2max}$  (Gonzalez-Alonso et coll. 2008; Gonzalez-Alonso et Calbet 2003) sont les principaux facteurs liés à l'ajustement vasculaire limitant la performance d'exercice (Cheuvront et coll. 2010; Gonzalez-Alonso et coll. 2008). Périard et coll. (2011b) a évalué l'influence de la contrainte thermique sur la fonction cardiovasculaire et la puissance pendant l'exercice de cyclisme à rythme libre dans la chaleur. Les sujets ont effectué 40 km à vélo au rythme libre dans des environnements de 35 °C et 20 °C. Les résultats indiquaient que la puissance est réduite dans l'environnement chaud (242 W par rapport à 279 W dans l'environnement frais). Bien que la  $T_{cen}$  à la fin de l'exercice était peu différente entre les conditions (39.8 °C et 38.9 °C en chaud et frais, respectivement), ils n'ont pas trouvé de différence dans la déshydratation entre les conditions chaudes et fraîches (i.e., pourcentage de la masse corporelle perdue: 0.9% et 0.7%, respectivement). Les auteurs ont suggéré que la baisse de la performance était majoritairement liée au stress cardiovasculaire (i.e., l'augmentation de la FC, la réduction de la pression artérielle moyenne, du volume d'éjection systolique et du débit cardiaque). Le stress cardiovasculaire a engendré une baisse 23% de  $VO_{2max}$  dans un environnement chaud à la fin de l'exercice, alors qu'elle est de 5% dans un environnement frais (Périard et coll. 2011b). Ainsi le stress thermique peut accélérer la diminution du volume systolique, de la pression artérielle, du débit cardiaque et du  $VO_{2max}$ . Ces changements conduisent à une réduction du flux sanguin et de l'apport d'oxygène aux muscles actifs, limitant grandement la performance d'exercice (Périard et coll. 2013, 2011b; Cheuvront et coll. 2010; Gonzalez-Alonso et coll. 2008; Gonzalez-Alonso et Calbet 2003).

En résumé, pendant un exercice en situation de stress thermique, la concurrence entre les circulations cutanées et musculaires réduit la capacité du système cardiovasculaire à maintenir le débit cardiaque et le  $VO_{2max}$ . En outre, le déclin de la fonction cardiovasculaire augmente lors de la déshydratation en combinaison avec l'hyperthermie (Kenefick et coll. 2010; Gonzalez-Alonso et coll. 2000) ce qui a un impact négatif plus important et nuit à la performance.

### **3.3. La déshydratation**

La perte de fluide corporel en raison de la transpiration entraîne une déshydratation qui a des effets négatifs sur la circulation cardiovasculaire, la thermorégulation, et augmente la fatigue pendant l'exercice dans un environnement chaud (Hargreaves 2008). La déshydratation a un impact sur la fonction cardiovasculaire et sur la thermorégulation dès une perte de masse corporelle d'environ 1%. Gonzalez-Alonso et coll. (2000) ont mené une étude dans laquelle les athlètes pédalaient à 72% de  $VO_{2max}$  pendant 30 minutes avec une perte de 1.5%, 3.0% et 4.2% du poids du corps dans les environnements chaud (35 °C) et froid (8 °C). Les résultats ont indiqué que, avec chaque 1% de poids corporel perdu, la  $T_{oes}$  augmentait de 0.21 °C et de 0.10 °C en environnement chaud et froid, respectivement. En outre, en environnement chaud et en fin d'exercice, la température centrale était supérieure de 0.2 °C, 0.5 °C et 0.8 °C lorsque la déshydratation était de 1.5%, 3.0% et 4.2% par rapport à l'état hydraté. La FC en environnement chaud était supérieure à celle en environnement frais, que les sujets soient hydratés ou déshydratés, et ce quelque soit le degré de déshydratation. La diminution du volume sanguin et plasmatique s'est amplifiée en même temps que le

degré de déshydratation, mais il n'y avait pas de différence entre les deux environnements. Alors que le degré de déshydratation n'a pas affecté le débit cardiaque en environnement frais. Le débit cardiaque s'était réduit en proportion de l'augmentation du degré de déshydratation en environnement chaud. Cette réduction est due à la diminution du volume d'éjection systolique en lien avec la diminution du volume sanguin et l'augmentation de la Tcen et de la FC dans la condition chaude (Gonzalez-Alonso et coll. 2000). Ce résultat suggère que la déshydratation a des effets sur les deux fonctions cardiovasculaires et thermorégulatrices en environnement chaud, même lorsque la quantité de perte d'eau est faible (1.5% du poids corporel perdu) (Gonzalez-Alonso et coll. 2000). La détérioration de la fonction physiologique va augmenter progressivement à mesure que le niveau de déshydratation augmente (Murray 2007) avec une ampleur plus grande dans un environnement chaud (Gonzalez-Alonso et coll. 2000).

Les exercices d'endurance réalisés dans un environnement chaud provoquent la déshydratation par évaporation. Le débit de sueur au cours de l'exercice peut atteindre 2 L.h<sup>-1</sup> à 3 L.h<sup>-1</sup> (Kenney et coll. 2012; Rehrer et Burke 1996 cité par Murray 2007), tandis que la vidange gastrique maximale se situe entre 1.2 L.h<sup>-1</sup> et 1.5 L.h<sup>-1</sup> environ au cours d'un exercice d'intensité modérée (Nybo 2010), de sorte que le déficit de liquide du corps augmente pendant un exercice de longue durée dans un environnement chaud.

Chevront et coll. (2005) ont montré que la performance de 30 minutes de contre-la-montre diminuait de 8% dans un environnement à 20 °C, mais celle-ci restait constante dans un environnement à 2 °C, lorsque les participants étaient déshydratés à 3% du poids corporel. Récemment, Kenefick et coll. (2010) ont

indiqué que, au même niveau de déshydratation de 4% du poids corporel, la performance de 15 min de contre-la-montre diminuait de 3% à la température ambiante de 10 °C (7 °C de WBGT) et baissait de 23% à la température ambiante de 40 °C (27 °C de WBGT).

En résumé, la diminution de la performance à la suite de la déshydratation est considérée comme étant une conséquence de la diminution de l'eau totale disponible pour le corps, par conséquent, une réduction du volume systolique, du débit cardiaque et une accélération de l'augmentation de la température rectale (Gonzalez-Alonso et coll. 2000; Montain et Coyle 1992).

### **3.4. Psychologie**

Les effets psychologiques (i.e., la perception thermique et l'effort physiologique) ont une forte influence sur les performances dans un environnement chaud et humide (Wegmann et coll. 2012; Cheung 2010, 2007). Les paramètres de la psychologie utilisés sont la sensation thermique (ST), le confort thermique (CT) et le niveau de difficulté perçue (NDP). Il est bien établi que la même tâche d'exercice est souvent perçue comme plus difficile ou plus inconfortable dans un environnement chaud que dans des conditions tempérées (Cheuvront et coll. 2010). En effet, l'inconfort thermique et la ST sont intimement liés à des températures ambiantes, à la T<sub>cen</sub>, à la T<sub>cu</sub> et à l'humidité de la peau (Schlader et coll. 2011a; Cheung 2010, 2007).

Abbiss et coll. (2010) ont examiné les réponses physiologiques pour 100 km de vélo au rythme libre dans des environnements chaud (34 °C) et froid (10 °C).

L'étude concluait que l'activation musculaire et la puissance diminuaient dans l'environnement chaud avant une augmentation significative de la température rectale. Plus intéressant encore, la baisse de la puissance a été corrélée avec des augmentations de ST. En plus, Peiffer et Abbiss (2011) ont souligné une réduction de puissance et un temps plus long pour achever l'exercice lorsque des sujets réalisaient 40 km à vélo dans un environnement de 32 °C par rapport à 17 °C. Ces réductions s'accompagnaient d'une ST plus élevée.

Le NDP est aussi affecté par un environnement chaud. Il est plus élevé dans un environnement chaud que dans un environnement frais et cette augmentation accompagne une réduction de la performance (Galloway et Maughan 1997). En outre, le NDP est significativement plus élevé lorsque la contrainte de la chaleur pendant l'exercice dans des environnements chauds est combinée avec la déshydratation (Gonzalez-Alonso et coll. 2000) et/ou avec le stress cardiovasculaire (Périard et coll. 2013). En effet le NDP est présenté comme une valeur synthèse des signaux afférents physiologique et psychologique tels que des changements de la FC, de la T<sub>cen</sub>, de la T<sub>cu</sub>, de l'oxygène dans le sang, de la ST, du CT. (Eston 2012; Dugas et coll. 2009; Borg 1982). Ces paramètres changent négativement lors du stress thermique, et encore plus fortement lorsqu'il y a déshydratation et stress cardiovasculaire durant un exercice sous la chaleur (Périard et coll. 2013; Gonzalez-Alonso et coll. 2003, 2000).

Schlader et coll. (2011b) ont indiqué que la réduction de la puissance de 30 minutes de pédalage dans un environnement chaud (40 °C) par rapport à un environnement neutre (20 °C) est associée à un taux plus élevé d'inconfort (ST, CT). Il est suggéré que la T<sub>cu</sub> augmente dans un environnement chaud, conséquence d'une

augmentation du flux sanguin vers la peau, ce qui a pour effet d'augmenter la ST (i.e., inconfortable) et donc diminuer l'intensité de l'exercice. Certaines études (Schlader et coll. 2011c; Mundel et Jones 2010) ont montré que les actions qui réduisent le NDP, ST, CT permettent d'augmenter les performances de l'exercice dans des environnements chauds. Cela montre la forte influence des facteurs psychologiques dans le déclin de la performance dans des environnements chauds.

#### **4. Exercice d'endurance en milieu tropical (chaud et humide)**

##### **4.1. Les caractéristiques d'un climat tropical**

Le climat tropical est caractérisé par des températures et des humidités d'air élevées avec des températures mensuelles élevées dépassants 18 °C, et des précipitations qui dépassent le système d'évapotranspiration pendant au moins 270 jours par an (Salati et coll. 1983 cité par Hue 2011). La Guadeloupe qui est une île dans la mer des Caraïbes est caractérisée par un climat tropical: sa température moyenne est de 25 °C à 26°C et son HR d'air de 80% à 82% (voir Hue 2011). Lors d'exercices effectués dans cette condition, le corps dépend de l'évaporation pour réguler la température corporelle car les mécanismes d'élimination de chaleur par rayonnement et convection sont limités (Moyen et coll. 2014). Toutefois même s'il y a une augmentation du débit sudoral, l'élimination de la chaleur par évaporation est encore diminuée (voir en détail dans la section 4.2). Ainsi, la température corporelle augmente et les mécanismes psychologiques et physiologiques sont altérés au cours de l'exercice (Moyen et coll. 2014). La seule façon d'obtenir un équilibre entre la production et la dissipation de la chaleur pendant l'exercice est donc de réduire la

production de chaleur métabolique, donc l'intensité de à l'exercice (Maughan et coll. 2012; Voltaire et coll. 2003, 2002).

#### **4.2. Les effets de l'humidité de l'air sur les réponses physiologique et psychologique pendant l'exercice**

Moyen et coll. (2014) ont étudié l'impact de l'augmentation de l'humidité de l'air sur la capacité de la thermorégulation lors d'un exercice à l'intensité faible. Les sujets ont effectué une marche de 90 minutes à 35% de  $VO_{2max}$  dans 4 conditions environnementales à 40%, 55%, 70% et 85% d'HR, tandis que la température a été maintenue constante à 35 °C. Les résultats ont montré que la production de chaleur métabolique, l'élimination de chaleur par évaporation n'étaient pas différents dans des conditions d'HR faible (i.e., 40% d'HR vs 55% d'HR). Cependant, la production de chaleur métabolique était plus importante et l'élimination de chaleur par évaporation était inférieure dans des conditions d'HR élevée (i.e., 70% ou 85% d'HR). Par exemple, alors que le flux de chaleur éliminé par évaporation diminuait de  $122 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ , l'augmentation de la dissipation de chaleur par les autres moyens (i.e., rayonnement, convection et respiration) ne dépassait pas  $10 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$  dans la condition de 85% d'HR par rapport à 40% d'HR. L'élimination de la chaleur par évaporation dans des conditions de forte l'humidité de l'air était réduite malgré une augmentation du débit sudoral (i.e.,  $1.07 \text{ L}\cdot\text{h}^{-1}$  lors de 85% d'HR vs  $0.79 \text{ L}\cdot\text{h}^{-1}$  lors de 40% d'HR). Par conséquent, les réponses physiologies (i.e., taux de stockage chaleur,  $T_{cen}$ ,  $T_{cu}$ , FC) et psychologies (i.e., ST, NDP) augmentaient significativement dans les conditions d'HR élevée (70% ou 85% d'HR) par rapport à l'HR faible. Par exemple: La FC moyenne ( $117$  et  $120 \text{ battement}\cdot\text{min}^{-1}$ , respectivement) était aussi inférieure

significativement dans les conditions de 40% et 55% d'HR par rapport aux conditions de 70% et 85% d'HR (137 et 154 battement.min<sup>-1</sup>, respectivement). De plus, il faut noter que ces réponses ont été maintenues stables pendant la dernière moitié de l'exercice dans la condition de 70% d'HR, mais qu'elles ont augmenté de façon continue tout au long de l'exercice dans la condition de 85% d'HR (figure 1.9).

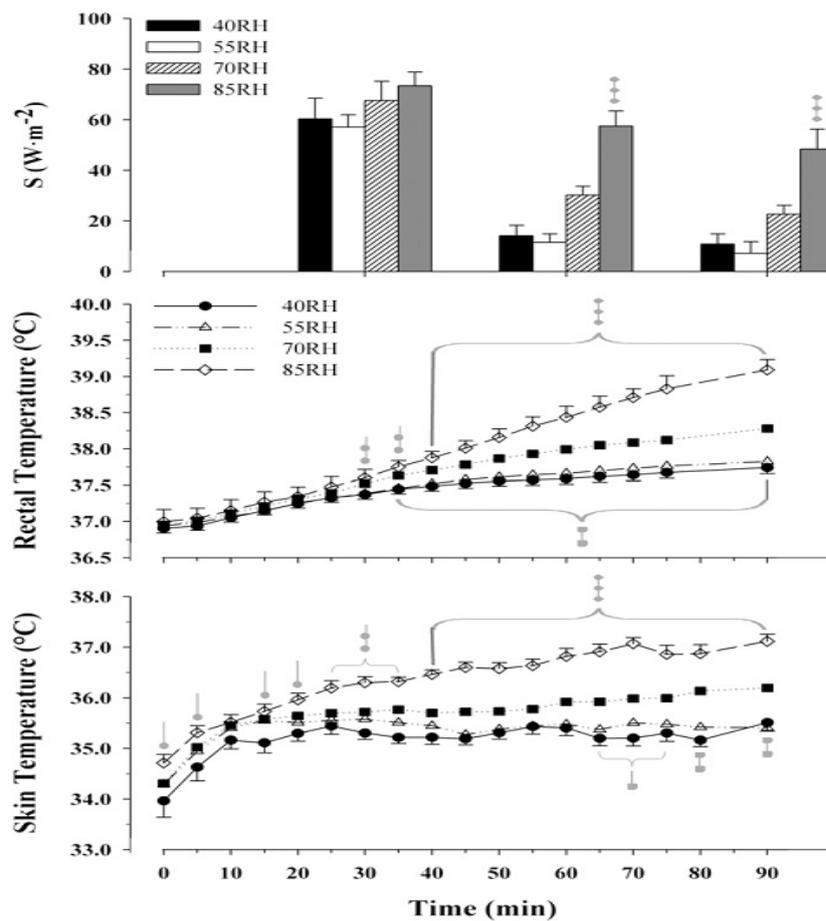


Figure 1.9. Stockage de chaleur (S) en haut, Tcen au milieu, Tcu lors de 90 minutes d'exercice à 35% de VO<sub>2max</sub> avec l'augmentation de l'HR. La différence significative entre 40% d'HR vs 85% d'HR (un seule diamant), les deux 40% d'HR et 55% d'HR vs 85% d'HR (deux diamants) et vs 70% d'HR (deux carrés), P < 0.033 pour S, P < 0.0005 pour Tcen et Tcu (D'après Moyen et coll. 2014).

### 4.3. La performance d'exercice en milieu tropical

Plusieurs études ont montré que la performance d'endurance en milieu tropical est réduite dans les conditions externes qui rassemblent une température et une humidité d'air plus élevées (Hue 2011; Voltaire et coll. 2003, 2002). Maughan et coll. (2012) ont démontré l'impact de la variation de l'humidité d'air sur la réponse physiologique à l'exercice et la performance. Dans cette étude, l'exercice a été conduit à 70% de  $VO_{2max}$  jusqu'à l'épuisement dans quatre conditions différentes : à 24%, 40%, 60% et 80% d'HR, tandis que la température de l'environnement a été maintenue constante (30°C). Les résultats ont montré que la capacité d'endurance diminue progressivement lorsque l'HR augmente (68 min  $\pm$  19 min, 60 min  $\pm$  17min, 54 min  $\pm$  17 min et 46 min  $\pm$  14 min à 24%, 40%, 60%, et 80% d'HR, respectivement) (figure 1.10). Ainsi on remarque que lorsqu'une activité physique est pratiquée dans un environnement tropical chaud humide, la performance diminue significativement lorsque l'humidité d'air relative est  $\geq$  60%.

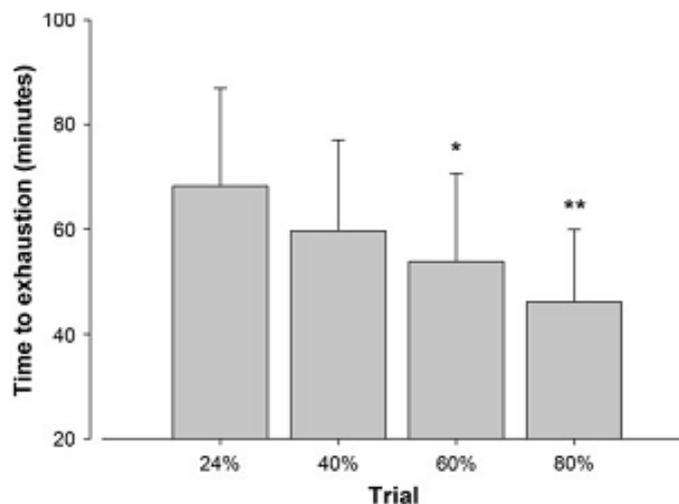


Figure 1.10. Performance d'exercice jusqu'à l'épuisement à 70% de  $VO_{2max}$  dans des environnements à 30 °C avec 24%, 40%, 60% et 80% d'HR. \* (P < 0.05) et \*\* (P < 0.01) différence significative par rapport à 24% d'HR (D'après Maughan et coll. 2012).

#### **4.4. Les facteurs réduisant la performance d'exercice en milieu tropical**

Maughan et coll. (2012) ont indiqué que la performance était réduite dans les environnements chauds et humides (30 °C, 80% d'HR) vs les environnements chauds et sec (30 °C, 24% d'HR), sans toutefois noter de différence significative de T<sub>cen</sub> à la fin de l'exercice, et de la circulation sanguine sous-cutanée ou encore de la FC. Toutefois le taux de stockage de la chaleur et la vitesse d'augmentation de la T<sub>cen</sub> étaient supérieurs en condition chaude et humide (i.e., 12 kJ.min<sup>-1</sup> vs 8 kJ.min<sup>-1</sup> et 0.5 °C/10 min vs 0.3 °C/10 min, en condition chaude et humide et chaude et sèche, respectivement). La T<sub>cu</sub> moyenne était de 34.8 °C et de 33.6 °C lorsque l'HR était de 80% et de 24% d'HR, respectivement. Les auteurs ont donc conclu que la réduction de la performance était liée à la vitesse d'augmentation plus importante de la T<sub>cen</sub> et à la T<sub>cu</sub> plus élevée au cours de l'exercice en condition d'HR élevée. Ces résultats sont cohérents avec ceux de Marino 2004, Sawka et coll. 2012, Schlader et coll. 2011a, 2011b, Ely et coll. 2010, montrant respectivement une performance altérée avec une augmentation élevée de la T<sub>cen</sub> et de la T<sub>cu</sub>.

Alors que les augmentations de stress psychologique (i.e., NDP et perceptions thermiques) sont concomitantes de la réduction de la capacité d'exercice dans un environnement chaud (Wegmann et coll. 2012; Peiffer et Abbiss 2011; Schlader et coll. 2011a, b; Galloway et Maughan 1997), elles s'accroissent également avec augmentation de l'humidité de l'air (Moyen et coll. 2014; Maughan et coll. 2012). Maughan et coll. (2012) ont montré que le NDP et la perception thermique étaient plus élevés dans un environnement à 80% d'HR par rapport à 24% d'HR (avec une température à 30 °C dans les deux environnements).

Les précédentes études de Voltaire et coll. (2003, 2002) ont indiqué que la diminution de la performance aérobie en climat chaud humide (31-36 °C et 75-82% d'HR) comparé à celle enregistrée en climat frais (14-19 °C et 45-52% d'HR) est liée à une augmentation significative de la Tcen (i.e., température tympanique – Ttym), de la FC, du taux de transpiration et donc de la perte en eau du corps. Bien que leurs études n'ont pas évalué les paramètres psychologies (i.e., NDP, ST), l'ensemble des résultats de Maughan et coll. (2012) suggère que les réductions de performance d'exercice dans les deux climats chaud/humide (tropical) et chaud/sec sont sous les influences des mécanismes identiques (i.e., stress thermique, cardiovasculaire et facteurs psychologiques, voir la section 3 dans la partie première). Cependant, cette diminution est plus forte en environnement tropical qu'en environnement chaud/sec car l'HR élevée dans l'air favorise davantage à l'accroissement du stress thermique et les perceptions de stress thermique (Moyen et coll. 2014; Maughan et coll. 2012; Voltaire et coll. 2003, 2002).

## **5. Stratégies de lutte contre le stress thermique en milieu chaud et humide**

L'augmentation de la température corporelle pendant l'exercice est liée à l'échec de la thermorégulation. Il existe trois principales méthodes pour favoriser la dissipation de chaleur afin d'éviter d'atteindre la Tcen critique, et ainsi favoriser la poursuite de l'exercice: 1 - par le processus d'acclimatation au climat chaud; 2 - par le contact de peau avec des objets ou des environnements à la température plus basse (refroidissement externe), par exemple, l'air froid, l'eau froide, la veste de refroidissement; 3 - par l'ingestion d'une boisson froide (refroidissement interne).

## 5. 1. L'acclimatation au climat chaud et la performance d'endurance

Il est reconnu depuis longtemps que l'acclimatation à la chaleur peut affaiblir l'impact négatif des conditions environnementales sur la performance d'endurance. Nielsen et coll. (1993) ont montré que la performance d'exercices à 60% de  $VO_{2max}$  était de 80 minutes après le processus d'adaptation en environnement chaud (i.e. 12 jours dans un environnement à 41 °C – 42 °C et 10% - 15% d'RH), alors que la performance était de 48 minutes avant le processus d'adaptation. Lorenzo et coll. (2010) ont démontré que 10 jours d'entraînement de 100 minutes par jour à 50% de  $VO_{2max}$  en climat chaud/sec (40 °C, 30% d'HR) pour des athlètes vivant en climat tempéré a augmenté la performance aérobie. Leurs résultats ont montré que la performance (en puissance) de 1 heure de pédalage augmentait de 8% après 10 jours d'adaptation (i.e., 776 kJ vs 718 kJ au premier jour de l'acclimatation,  $P < 0.02$ ).

Voltaire et coll. (2002) avaient mené une étude pour évaluer les réponses biologiques et les performances chez les athlètes suite à une période d'acclimatation. Les auteurs avaient montré que la performance d'un exercice maximal (Test Léger et Boucher continu) en milieu chaud et humide au deuxième jour d'adaptation était 5% inférieure à celle obtenue dans un climat neutre (14 °C, 45% d'humidité). Après 14 jours d'adaptation, la performance était inférieure de 2%. Récemment, Racinais et coll. (2015) ont étudié les effets de l'exposition au milieu chaud et sec sur la performance aérobie chez des cyclistes non-acclimatés. Ces cyclistes vivent et s'entraînent 14 heures par semaine dans un environnement froid (i.e., la température ambiante  $< 10$  °C) avant une période d'acclimatation effectuée. L'acclimatation durait 14 jours pendant laquelle les sujets séjournaient et s'entraînaient 13 heures par semaine en environnement chaud et sec (34 °C, 18% d'HR). Avant et

après l'acclimatation, ils ont participé à 4 essais de 43.4 km à vélo en contre-la-montre comprenait deux essais en environnement frais (8 °C, 30% d'HR) et deux autres en environnement chaud et sec (36 °C et 12% - 13% d'HR). Les résultats montrent qu'il n'y avait pas de différence de la performance entre les deux essais en environnement frais. Au premier jour de l'acclimatation, la performance en environnement chaud réduisait de 17% par rapport à celle en environnement frais. Toutefois, au dernier jour de l'acclimatation, la performance parvenait à l'équilibre avec celle obtenue dans des conditions environnementales fraîches. Les travaux de Racinais et coll. (2015), Lorenzo et coll. (2010), Voltaire et coll. (2002), Nielsen et coll. (1993) ont mis en évidence que l'acclimatation à la chaleur aiderait à prévenir une baisse importante des performances lors de compétitions se déroulant en environnement chaud.

La performance physique est améliorée par l'acclimatation à la chaleur. Cette amélioration est due aux changements des réponses physiologiques. Ces changements comprennent l'expansion du volume plasmatique, l'augmentation de la transpiration, du débit cardiaque et une diminution de la FC, de la T<sub>cen</sub> et la T<sub>cu</sub> (Périard et coll, 2015, Hue 2011, Bouno et coll. 2009, 1998, Lorenzo et coll. 2010, Voltaire et coll. 2003, 2002; Amstrong et Maresh 1991).

## **5. 2. Le refroidissement externe du corps**

De nombreuses investigations sur la stratégie de refroidissement externe du corps ont été étudiées: l'exposition à l'air froid (Mitchell et coll. 2003; Lee et Haymes 1995), l'immersion du corps dans l'eau froide (Marino et Booth 1998), le port d'une veste de refroidissement (Cotter et coll. 2001). Elles ont montré une

diminution de la  $T_{cen}$  et la  $T_{cu}$  et donc une baisse du stress thermique et augmentation de la performance.

### **5.2.1. L'exposition à l'air froid**

Le refroidissement par l'exposition à l'air est appliqué avec des températures basses inférieures à 22 °C avec ou sans circulation de l'air (par ventilateur) (Mitchell et coll. 2003; Lee et Haymes 1995; Olschewski et Bruck 1988; Hessemer et coll. 1984). Mitchell et coll. (2003) ont évalué l'influence de la stratégie de pré-refroidissement lors de l'exposition à l'air froid sur la capacité d'endurance dans un environnement chaud. Avant l'exercice, les sujets ont été soumis à une période de refroidissement ou de non refroidissement (contrôle). Pendant la condition de refroidissement, les athlètes sont restés 20 minutes dans une salle à 22 °C avec un écoulement d'air de 4m/s. Pendant la condition de contrôle, ils sont restés dans un environnement chaud (38 °C et 40 d'RH). Dans les deux essais, les sujets ont pédalé à vélo à 100% de  $VO_{2max}$  en environnement à 38 °C et 40 d'RH. Les résultats ont montré que la performance est meilleure avec le refroidissement par rapport à la condition de contrôle (399 secondes vs 369 secondes, respectivement,  $P < 0.05$ ). En condition de refroidissement, le taux d'augmentation de la  $T_{cen}$ , la  $T_{cu}$ , le stockage de chaleur étaient de 0.20 °C par minute, 34.2 °C, 238 kJ, respectivement. Alors que ces taux étaient de 0.28 °C, 36.2 °C, 532 kJ, respectivement, dans la condition de contrôle ( $P < 0.05$  lors d'en comparaison entre les deux conditions).

### 5.2.2. L'immersion dans l'eau (froide ou tempérée)

Le refroidissement externe par immersion dans l'eau froide conduit à une réduction plus rapide de la  $T_{cu}$ , de la  $T_{cen}$  que l'exposition à l'air froid car la capacité de transfert de chaleur par conduction de l'eau est 25 fois supérieure à l'air à la même température. La capacité de stockage de la chaleur du corps augmente davantage parce que l'immersion dans l'eau entraîne aussi une réduction de la température musculaire (Racinais et coll, 2015; Ross et coll. 2013; Wegmann et coll. 2012; Dufield et coll. 2010; Peiffer et coll. 2010; Gonzalez-Alonso et coll. 1999b). Booth et coll. (1997) ont étudié l'effet du refroidissement sur la performance de 30 minutes de course à pied en environnement chaud (32 °C, 60% d'RH) après 60 min d'immersion dans de l'eau de 23 °C à 24 °C. Les résultats ont indiqué que la  $T_{cen}$ , la  $T_{cu}$  à la fin de l'immersion étaient inférieures de 0.7 °C et 5.9 °C, respectivement, par rapport à la condition de contrôle. Le taux de stockage de chaleur du corps à la fin de l'exercice était de 113  $W.m^{-2}$  et de 249  $W.m^{-2}$  dans les conditions de refroidissement et contrôle, respectivement. La distance parcourue était de 304 m (4.2%), supérieure avec le pré-refroidissement en comparaison avec la condition de contrôle. Gonzalez-Alonso et coll. (1999b) ont observé une amélioration de 37% de la performance de vélo réalisée à 60% de  $VO_{2max}$  jusqu'à l'épuisement dans un environnement de 40 °C après l'immersion dans l'eau à 17 °C vs 37°C pendant 30 minutes. Dufield et coll. (2010) ont appliqué le refroidissement en immersion dans de l'eau à 14 °C, des jambes jusqu'au niveau de la hanche pendant 20 minutes. Les résultats ont indiqué que la performance de 40 min à vélo en milieu chaud (33 °C, 50% d'RH) était améliorée avec l'immersion par rapport la condition contrôle sans refroidissement (198 W vs 178 W,  $P < 0.05$ ). Après l'immersion, la  $T_{cen}$  n'a pas diminué, mais la température musculaire au niveau des jambes a chuté de 10 °C. La température corporelle moyenne et la  $T_{cu}$  moyenne étaient

inférieures (1.0 °C – 3.0 °C) pendant le premier moitié d'exercice dans la condition de refroidissement vs la condition de contrôle.

### **5.2.3. Le port d'une veste de refroidissement**

Une veste de refroidissement est portée dans la période de repos avant l'exercice ou dans la phase d'échauffement (Uckert et Joch 2007; Arngrimsson et coll. 2004). Arngrimsson et coll. (2004) ont effectué une étude dans laquelle les coureurs réalisaient 38 min d'échauffement en portant une veste de refroidissement ou un T-shirt (sans refroidissement) suivi par 5 km de course à pied dans la chaleur (32 °C, 50% d'RH). Ils ont montré que la  $T_{cen}$ , la  $T_{cu}$  avant l'exercice avec le port d'une veste refroidissement étaient inférieurs de 0.2 °C et 1.8 °C, respectivement, par rapport au port d'un T-shirt. Le temps de course était significativement plus court (13 seconds,  $P < 0.05$ ) avec le refroidissement par rapport à sans refroidissement. Dans l'étude de Uckert et Joch (2007), les sujets ont été soumis à un refroidissement en portant une veste de refroidissement (0 °C - 5 °C) pendant 20 min au repos avant un exercice débuté à une charge de travail de 9 km.h<sup>-1</sup> et augmenté de 1 km.h<sup>-1</sup> toutes les 5 min jusqu'à la fatigue volontaire dans un environnement chaud (30 °C – 32 °C, 50% de RH). Les résultats ont indiqué que le temps d'exécution d'exercice était de 32.5 minutes lors du refroidissement vs 30.3 minutes dans la condition sans refroidissement ( $P < 0.05$ ). Ces résultats ci-dessus sont également confirmés par les travaux de Luomala et coll. (2012), Duffield et coll. (2010), Duffield et Marin (2007), Hasegawa et coll. (2005) qui ont aussi observé une augmentation de la performance d'exercice en milieu chaud par l'utilisation d'une veste de refroidissement.

#### **5.2.4. La combinaison entre les protocoles de stratégie de refroidissement externe**

La combinaison de deux ou plusieurs protocoles de refroidissement externe fournit de meilleurs résultats sur la performance que l'utilisation d'un seul protocole. Quod et coll. (2008) ont réalisé une étude comprenant trois essais. Deux des trois essais avec le refroidissement dans lesquelles les cyclistes ont porté une veste à 20 °C pendant 40 minutes ou étaient immergés dans l'eau à 24 °C pendant 30 minutes suivi par 40 minutes du port d'une veste à 20 °C. Lors de l'essai de contrôle, les sujets n'ont pas été soumis au refroidissement. Les sujets ont effectué un travail de charge équivalant à celui de 20 minutes de pédalage à 75% de puissance à  $VO_{2max}$  sur un ergomètre dans un environnement à 34 °C et 41% d'RH. Les résultats ont montré que la performance a augmenté de 0.7% ( $P > 0.05$ ) avec la veste de refroidissement et de 1.8% ( $P < 0.05$ ) avec la combinaison des 2 méthodes par rapport à la condition de contrôle. Alors qu'il n'y a pas de différence dans la  $T_{cen}$  entre les conditions de contrôle et de veste de refroidissement. La  $T_{cen}$  avant l'exercice avec la combinaison des 2 méthodes était inférieure de 0.7 °C. La  $T_{cu}$  était aussi inférieure avec la combinaison des 2 méthodes, de 8.1 °C et 7.9 °C vs les conditions de contrôle et de veste de refroidissement, respectivement.

Le refroidissement externe entraîne une réduction de la  $T_{cu}$ , de la  $T_{cen}$  et/ou de la température musculaire. Cela améliore la capacité du stockage de chaleur du corps, ainsi prolonge la durée d'exercice avant l'atteinte de la  $T_{cen}$  critique. De plus, la  $T_{cu}$  basse réduit la transpiration ainsi que le flux sanguin périphérique. Cette redistribution de flux sanguin permet d'augmenter le volume sanguin central, le volume systolique, le débit cardiaque et accroît de fait le flux sanguin et l'oxygène transporté vers les muscles actifs. En outre, le refroidissement externe permet de réduire le stress psychologique (i.e., NDP, ST et CT) (Ross et coll. 2013; Luomala et coll. 2012;

Wegmann et coll. 2012; Uckert et Joch 2007; Mitchell et coll. 2003; Lee et Haymes 1995; Olschewski et Bruck 1988; Hessemer et coll. 1984).

### **5.3. Le refroidissement interne du corps**

Le processus d'adaptation à l'environnement chaud et le refroidissement externe permettent de prolonger le temps avant d'atteindre la T<sub>cen</sub> critique lors d'un exercice à intensité fixée (Gonzalez-Alonso et coll. 1999b; Nielsen et coll. 1993). Cependant, il est parfois difficile d'appliquer ces stratégies dans des contextes réels de sport (Siegel et Laursen 2012; Hue 2011; Ihsan et coll. 2010).

Dans une revue de littérature, Hue (2011) indique que le processus d'acclimatation à la chaleur nécessite une période minimale de cinq jours pour obtenir les changements fonctionnels physiologiques nécessaires qui aident à réduire l'impact néfaste de l'environnement chaud sur la performance physique.

Concernant le refroidissement externe, certaines méta-analyses (Bongers et coll. 2015; Ross et coll. 2013; Wagmann et coll. 2012; Siegel et Laursen 2012; Ihsan et coll. 2010) ont démontré que les équipements matériels (i.e., une chambre ou une baignoire de refroidissement) pour le refroidissement par convection sont rarement disponibles sur les sites de compétition. Les vestes de refroidissement sont volumineuses et peuvent causer de l'inconfort pour les athlètes pendant l'échauffement. Cette stratégie présente donc des limites pour une compétition sportive.

L'absorption d'une boisson froide a été largement démontrée comme une méthode efficace aidant à réduire la T<sub>cen</sub>. Son efficacité sur la réduction de la température corporelle et l'augmentation ou le maintien de la performance à

l'exercice a été démontrée à la fois dans un environnement chaud/sec (Stevens et coll. 2013; Mundel et coll. 2006) et chaud/humide (Yeo et coll. 2012; Byrne et coll. 2011; Ihsan et coll. 2010; Siegel et coll. 2012, 2010; Stanley et coll. 2010; Lee et coll. 2008b). Cette méthode possède des avantages lorsqu'elle est appliquée en compétition ou dans des conditions écologiques où l'on peut bénéficier de dispositifs de préservation de la température des boissons froides (Stevens et coll. 2013; Siegel et Laursen 2012; Ihsan et coll. 2010).

De plus, Ross et coll. (2011) ont récemment montré que le refroidissement de 10 minutes par l'immersion dans de l'eau froide à 10 °C suivi de 20 minutes du port d'une jacket de refroidissement n'augmente pas la performance de 46 km à vélo en milieu chaud (32 °C - 35 °C, 50% - 60% d'RH) par rapport à l'ingestion ad libitum d'eau à 4 °C avant l'exercice. Hasegawa et coll. (2005) avait mené une étude dans laquelle les sujets ont effectué 1 heure de vélo à 60% de  $VO_{2max}$  suivie par l'exercice à 80% de  $VO_{2max}$  jusqu'à l'épuisement dans un environnement de 32 °C et 70% - 80% d'RH. Pendant les essais, les sujets ont porté une veste de refroidissement ou ingéré de d'eau froide (14 °C – 16 °C) avec un volume équivalant au montant de la sueur perdue. Les auteurs ont indiqué que la performance d'exercice à 80% de  $VO_{2max}$  n'était pas différente entre les conditions. Les résultats de Ross et coll. (2010), Hasegawa et coll. (2005) ont mis en évidence, encore une fois, que l'ingestion d'eau froide (refroidissement interne) semble être une alternative intéressante de stratégie de refroidissement externe pour améliorer la performance.

### 5.3.1. Le refroidissement interne et la performance à l'exercice

De nombreuses études ont montré que l'absorption d'eau froide (ou glace pilée) favorise la performance à l'exercice d'endurance en ambiance chaude par rapport à l'absorption d'eau à température neutre (Byrne et coll. 2011; Burdon et coll. 2010a; Lee et coll. 2008b; Mundel et coll. 2006). Mundel et coll. (2006) ont montré que la durée du pédalage à vélo à 65% de  $VO_{2max}$  jusqu'à l'épuisement en environnement chaud/sec (34 °C, 28% d'HR) augmentait de  $11\% \pm 5\%$  lorsque les sujets avaient absorbé de l'eau à 4 °C par rapport à 19 °C. Lee et coll. (2008b) ont indiqué que la performance de pédalage à vélo à 66% de  $VO_{2max}$  jusqu'à l'épuisement a augmenté de 23% lors de l'absorption de l'eau à 4 °C par rapport à l'eau à 37 °C dans un environnement à 35 °C et 60% d'HR. Byrne et coll. (2011) ont mené une étude dans laquelle les sujets ont pédalé à vélo pendant 30 minutes à rythme libre dans un environnement à 32 °C et 60% d'HR. Les sujets ont ingéré de l'eau à 2°C ou 37 °C. Les résultats ont montré que la distance parcourue a augmenté de 2.8% ( $P = 0.03$ ) avec de l'eau à 2 °C par rapport à celle à 37 °C.

Certaines études ont examiné les avantages de l'absorption de glace pilée lors d'exercice d'endurance en environnement chaud. L'augmentation de la performance à l'exercice avec de la glace pilée en comparaison avec de l'eau à température ambiante a été démontrée dans des études réalisées par Stevens et coll. (2013), Yeo et coll. (2012), Siegel et coll. (2012, 2010), Ihsan et coll. (2010). Stevens et coll. (2013) ont effectué une épreuve qui simule la distance du triathlon Olympique avec 1500 m de natation, 1 h de pédalage à vélo et 10 km de course à pied. La natation et le vélo ont été réalisés avec une intensité fixe sans mesurer la performance, et les 10 km de course à pied à intensité libre où performance était mesurée. Les sujets ont bu  $10 \text{ g.kg}^{-1}$  de

glace pilée ( $< 1\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) ou de l'eau à température ambiante ( $32\text{-}34\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) de la 17ème à la 45ème minute de la phase de vélo. L'épreuve s'est déroulée dans un environnement chaud et sec ( $32\text{-}34\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $20\text{-}30\%$  d'HR). Les résultats ont montré que la performance de 10 km de course à pied a augmenté de 2.5% avec la glace pilée par rapport à l'eau à température ambiante. Dans l'étude d'Ihsan et coll. (2010), les sujets ont absorbé  $6.8\text{ g.kg}^{-1}$  de glace pilée à  $1.4\text{ }^{\circ}\text{C}$  ou de l'eau à  $27\text{ }^{\circ}\text{C}$ , puis, les sujets ont effectué 40 km de vélo en environnement chaud et humide ( $30\text{ }^{\circ}\text{C}$  et  $75\%$  d'HR). La performance avec la glace pilée a augmenté de 6.5% par rapport à l'eau à  $27\text{ }^{\circ}\text{C}$ . De même, Siegel et coll. (2012) ont réalisé une étude dans laquelle les sujets ont couru au premier seuil ventilatoire jusqu'à l'épuisement en environnement à  $34\text{ }^{\circ}\text{C}$  et  $54\%$  d'HR. Ils ont absorbé  $7.5\text{ g.kg}^{-1}$  de glace pilée ( $-1\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) ou d'eau à  $37\text{ }^{\circ}\text{C}$  avant l'exercice. Les résultats ont montré que la durée de l'exercice était 13% plus longue avec l'absorption de la glace pilée par rapport à l'eau à  $37\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Dans l'étude de Yeo et coll. (2012), les athlètes ont absorbé  $8\text{ g.kg}^{-1}$  de glace pilée à  $-1.4\text{ }^{\circ}\text{C}$  ou un volume équivalent d'eau à  $31\text{ }^{\circ}\text{C}$  pendant 30 minutes avant de courir 10 km sur piste en environnement chaud et humide (WBGT équivalent à  $28\text{ }^{\circ}\text{C}$ ). Les résultats ont montré que la performance a augmenté de 0.5% avec la glace pilée par rapport à l'eau à  $31\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

L'absorption de la glace pilée peut apporter un plus grand bénéfice que l'eau froide sur la performance: dans l'étude de Siegel et coll. (2010), les sujets ont absorbé  $7.5\text{ g.kg}^{-1}$  de glace pilée (à  $-1\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) ou d'eau froide (à  $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) avant l'exercice, ils ont ensuite couru jusqu'à l'épuisement dans un environnement à  $34\text{ }^{\circ}\text{C}$  et  $55\%$  d'HR. Les résultats ont montré que la performance à l'exercice a augmenté de  $19\% \pm 6\%$  après l'absorption de la glace pilée par rapport à l'eau froide.

En résumé, les études ci-dessus ont montré les avantages de l'absorption d'une boisson froide (eau froide ou glace pilée) sur les performances d'endurance en

ambiance chaude sec ou humide que ce soit en laboratoire ou en conditions écologiques. En outre, cela est également vrai pour les sujets acclimatés (Burdon et coll. 2013) et non acclimatés (Byrne et coll. 2011; Siegel et coll. 2012; Burdon et coll. 2010a; Lee et coll. 2008b; Mundel et coll. 2006) au climat.

Bien que les mécanismes d'explication de l'augmentation de la performance à l'exercice avec l'absorption de boissons froides ne soient pas encore bien compris, certains mécanismes impliqués ont été proposés tels que, la réduction de la T<sub>cen</sub> avant l'exercice ou une T<sub>cen</sub> élevée à l'épuisement (Siegel et coll. 2012, 2010), la réduction de la température du cerveau (Siegel et Laursen 2012), l'ajustement circulatoire (Yeo et coll. 2012; Nadel et coll. 1970), l'augmentation de la commande centrale et/ou la motivation (Siegel et coll. 2011).

### **5.3.2. L'absorption de boisson froide (ou glace pilée) et la fonction physiologique**

#### **5.3.2.1. La température centrale**

A ce jour, les chercheurs s'accordent sur la capacité importante d'absorption de chaleur d'une boisson froide (ou glace pilée) qui permettrait une réduction de température rectale ou de celle de tractus gastro-intestinal et ainsi de limiter le taux de stockage de la chaleur du corps.

En effet, récemment, les résultats de l'étude de Byrne et coll. (2011) ont indiqué que les températures rectales ont diminué de 0.41 °C et de 0.17 °C lors de l'absorption d'eau à 2 °C ou à 37 °C, respectivement, pendant 35 minutes de repos avant l'exercice. Lee et coll. (2008b) ont précédemment montré que l'ingestion d'eau à 4 °C pendant 30

minutes de repos avant l'exercice a permis de réduire de 0.5 °C la température rectale en comparaison à l'ingestion d'eau à 37 °C.

Siegel et coll. (2010) ont montré que l'absorption de la glace pilée peut réduire la température du corps de manière plus importante que l'absorption de la même quantité d'eau froide en raison de la plus grande quantité de chaleur absorbée (334 kJ.kg<sup>-1</sup>) par le changement de la glace de l'état solide à l'état liquide. Dans l'étude de Siegel et coll. (2010), la glace pilée à -1 °C ou l'eau froide à 4 °C a été fournie aux sujets pendant 30 minutes de repos avant l'exercice. Les résultats ont indiqué que la température rectale a baissé de 0.66 °C avec la glace pilée contre 0.25 °C avec l'eau à 4 °C. Plus récemment, Siegel et coll. (2012) ont montré que la température rectale a été diminuée de 0.43 °C après l'absorption de glace pilée (à -1 °C) pendant 30 minutes de repos avant l'exercice alors qu'elle n'a pas changé avec l'eau à 37 °C.

D'autres études ont également montré des réductions de la température rectale (Stanley et coll. 2010; Mundel et coll. 2006) ou de température gastro-intestinale mesurée par une capsule (Stevens et coll. 2013; Burdon et coll. 2013; Byrne et coll. 2011; Yeo et coll. 2012; Ihsan et coll. 2010) lors d'absorption de boissons froides.

Certaines études (Burdon et coll. 2013, 2010a; Lee et coll. 2008a) ont montré que la température rectale n'a pas diminué en absorbant une boisson froide par rapport à une boisson à température ambiante. Cela semble lié à des différences de protocole d'absorption de boissons (voir en détail dans la section 5.4.1) dans ces études par rapport aux les études citées ci-dessus (Yeo et coll. 2012; Byrne et coll. 2011; Ihsan et coll. 2010; Siegel et coll. 2010; Lee et coll. 2008b).

L'augmentation de la température corporelle associée à l'exercice d'endurance effectué en environnement chaud est généralement considérée comme le principe

facteur causant la fatigue et la baisse de la production de la puissance observée au cours de l'exercice prolongé (Galloway et Maughan 1997; Parkin et coll. 1999), et il a été démontré que le temps d'épuisement de l'exercice en environnement chaud est directement lié à la vitesse de stockage de chaleur (Gonzalez-Alonso et coll. 1999b). Par conséquent, la réduction de la Tcen limite le taux de stockage de chaleur, ce qui peut permettre de prolonger le temps d'atteinte de la Tcen critique.

### **5.3.2.2. L'ajustement circulatoire**

Les résultats des études précédentes ont montré que les effets de l'absorption de boissons fraîches (eau froide, glace) sur la FC sont divergents. Certaines études ont montré une réduction de la FC (Stanley et coll. 2010; Lee et coll. 2008b), d'autres études (Yeo et coll. 2012; Byrne et coll. 2011; Ihsan et coll. 2010; Siegel et coll. 2012, 2010; Mundel et coll. 2006) n'ont montré aucune différence de FC (mais une amélioration de la performance) lors d'ingestion de boissons froides en comparaison à de l'eau à température neutre. Cependant, cela pourrait permettre de conclure à une influence positive lors de l'absorption d'une boisson froide sur la FC. En effet, à l'exercice à rythme libre, l'augmentation de la performance de l'exercice est synonyme d'une activité musculaire plus élevée, donc d'une production de chaleur métabolique plus importante. La FC devrait augmenter pour répondre à la redistribution du débit cardiaque car il y a un conflit entre l'augmentation du flux sanguin aux muscles actifs et à la peau (pour élimination de chaleur). Toutefois, dans le cas de l'eau froide absorbée, malgré une augmentation de la performance à l'exercice et donc en même temps de la VO<sub>2</sub> et du débit cardiaque, la FC n'est pas plus élevée par rapport à l'absorption d'eau

neutre. Ce qui indique que l'eau froide (ou la glace pilée) permettrait de limiter la redistribution du flux sanguin et de ce fait, de limiter ainsi d'augmentation de la FC.

### **5.3.3. L'absorption d'eau froide et les effets physiologique et psychologique**

Certaines études ont montré que le NDP diminue lors de l'absorption d'une boisson froide avant l'exercice. Lee et coll. (2008b) ont montré une diminution du NDP lors de l'absorption d'eau froide à 4 °C en comparaison à de l'eau à 37 °C. Une diminution de NDP a également été observée dans l'étude de Siegel et coll. (2012) avec l'absorption de glace pilée à -1 °C par rapport à de l'eau à 37 °C. Les résultats de l'étude réalisée par Siegel et coll. (2010) ont indiqué que le NDP avec l'ingestion de glace (à -1 °C) avant l'exercice au premier seuil ventilatoire était inférieur, de la 10ème à la 35ème minutes au cours de l'exercice, à celui de l'eau à 4 °C. Cependant, certaines autres études ont montré qu'il n'y avait pas de différence de NDP avec l'absorption des boissons froides (eau froide ou glace pilée) pendant l'exercice par rapport à de l'eau à température ambiante (Carvalho et coll. 2014; Burdon et coll. 2013, 2010a; Lee et coll. 2008a; Lee et Shirreffs 2007; Mundel et coll. 2006).

On pourrait expliquer l'incohérence des résultats de ces études au niveau du NDP par l'utilisation de protocoles différents en ce qui concerne l'absorption d'eau (T°C, consistance) et des types d'exercice (intensité, durée). Tandis qu'il a été démontré que le NDP diminue avec l'absorption de boissons froides lors d'exercice à intensité fixe, il n'a néanmoins pas été prouvé lors d'exercice avec un rythme libre. En effet, dans les études de Siegel et coll. (2012, 2010), les sujets ont ingéré une boisson froide pendant 30 minutes de repos, avant de réaliser un exercice à intensité fixe. Dans l'étude de Lee et coll. (2008b), les sujets ont bu une boisson froide pendant la période de repos

et périodiquement pendant l'exercice à intensité fixe. Ces études ont toutes montré une diminution de NDP. Certaines autres études qui ont aussi appliqué la stratégie de refroidissement interne à l'exercice avec intensité fixe (Burdon et coll. 2013, 2010a; Lee et coll. 2008b; Lee et Shirreffs 2007; Mundel et coll. 2006) n'ont montré aucune diminution de NDP. Cela peut-être expliqué par le fait que les sujets ont seulement bu de la boisson froide au cours de l'exercice et non pendant la période de repos (Burdon et coll. 2013, 2010a; Lee et coll. 2008a; Lee et Shirreffs 2007; Mundel et coll. 2006). En revanche, le NDP n'est pas réduit avec l'ingestion d'une boisson froide à l'exercice à rythme libre quels que soit la boisson ingérée par les sujets avant (Yeo et coll. 2012; Byrne et coll. 2011; Ihsan et coll. 2010) ou pendant l'exercice (Schulze et coll. 2015; Carvalho et coll. 2014; Stevens et coll. 2013).

Les effets de l'eau froide sur les ST et CT ont observé pendant la période de repos avant l'exercice avec l'absorption d'une boisson froide et/ou au cours de l'exercice. Les résultats de l'étude de Lee et coll. (2008b) ont montré que la ST diminue pendant la période de repos et au cours de l'exercice à rythme fixé avec l'absorption d'eau à 4 °C par rapport à de l'eau à 37 °C. Siegel et coll. (2012, 2010) et Onitsuka et coll. (2015) ont également montré des résultats similaires à ceux de Lee et coll. (2008b), lors de l'absorption de glace pilée. Par ailleurs, dans les études de Yeo et coll. (2012), Ihsan et coll. (2010) et Stanley et coll. (2010), la ST diminue à la fin de période d'ingestion de boissons froides avant l'exercice, mais pas pendant l'exercice à rythme libre. De même, le CT diminue avec l'absorption de boisson froide avant, mais pas pendant 30 minutes de pédalage à rythme libre (Byrne et coll. 2011). En revanche, les deux ST et CT n'étaient pas différents lors de l'ingestion des boissons froides pendant l'exercice à rythme libre par rapport à l'eau neutre (Schulze et coll. 2015; Carvalho et coll. 2014; Stevens et coll. 2013).

Même si la ST, le CT et le NDP ne montrent pas de différence avec l'absorption de boisson froide par rapport à l'eau à température ambiante dans certaines études, cela pourrait encore être considéré comme un effet positif de l'absorption de boissons froides sur la motivation. En effet, le NDP est influencé par des facteurs environnementaux et internes (tels que l'augmentation de la T<sub>cen</sub> et l'intensité à l'exercice). Il semble que l'augmentation des performances (donc de l'intensité) dans des conditions de boissons froides peut avoir masqué l'effet d'une boisson froide sur le NDP. D'ailleurs, la réduction de la perception du stress thermique (ST, CT) avant l'exercice est un élément important de la rétroaction afférente utilisée pour faire des ajustements du rythme de l'exercice dans un environnement chaud (Noakes 2012).

#### **5.3.4. Les facteurs déterminant l'efficacité de l'absorption de boisson froide**

##### **5.3.4.1. Le temps d'absorption d'eau lié à la réduction de la T<sub>cen</sub>**

L'absorption de l'eau froide avant l'exercice permet de réduire la T<sub>cen</sub> (Lee et coll. 2008b; Stanley et coll. 2010; Siegel et coll. 2010; Ihsan et coll. 2010; Yeo et coll. 2012). En effet, dans l'étude de Lee et coll. (2008b), l'absorption de 900 mL d'eau à 4 °C et 37 °C pendant 30 minutes avant l'exercice et périodiquement de 100 mL de la même boisson toutes les 10 minutes pendant l'exercice réduit la température rectale de 0.5 °C avant l'exercice. De plus, une température rectale plus basse avec l'eau froide a été constatée au cours de l'exercice, mais elle était similaire dans les deux conditions à la fin de l'exercice. Stanley et coll. (2010) ont montré que l'ingestion de 1 L de glace pilée (-0.8 °C) pendant 50 minutes d'une phase séparant deux sessions d'exercice a réduit de 0.4 °C la température rectale par rapport à de l'eau à 19 °C. Siegel et coll. (2010) ont montré que l'ingestion de 7.5 g.kg<sup>-1</sup> de glace pilée à -1 °C par rapport à celle à 4 °C a réduit de 0.66 °C de la température rectale. Yeo et coll. (2012), Byrne et coll. (2011), Ihsan et coll.

(2010) ont également montré que la Tcen est réduite par l'ingestion d'une boisson froide avant l'exercice. Inversement, une boisson froide absorbée au cours de l'exercice est inefficace pour réduire la Tcen (Burdon et coll. 2015, 2013, 2010a; Lee et coll. 2008a). Les résultats de l'étude de Lee et coll. (2008a) ont indiqué qu'il n'y avait pas de différence de la température rectale lorsque les sujets ont bu 1.6 L d'eau à 10 °C, 37 °C ou 50 °C pendant 90 minutes d'exercice. Dans une autre étude, Burdon et coll. (2013) ont indiqué qu'il n'y avait pas de différence de température rectale lors de l'ingestion d'un volume (260 g) de glace pilée (à -1 °C) ou d'eau à 37 °C, toutes les 15 minutes pendant 90 min de pédalage à vélo.

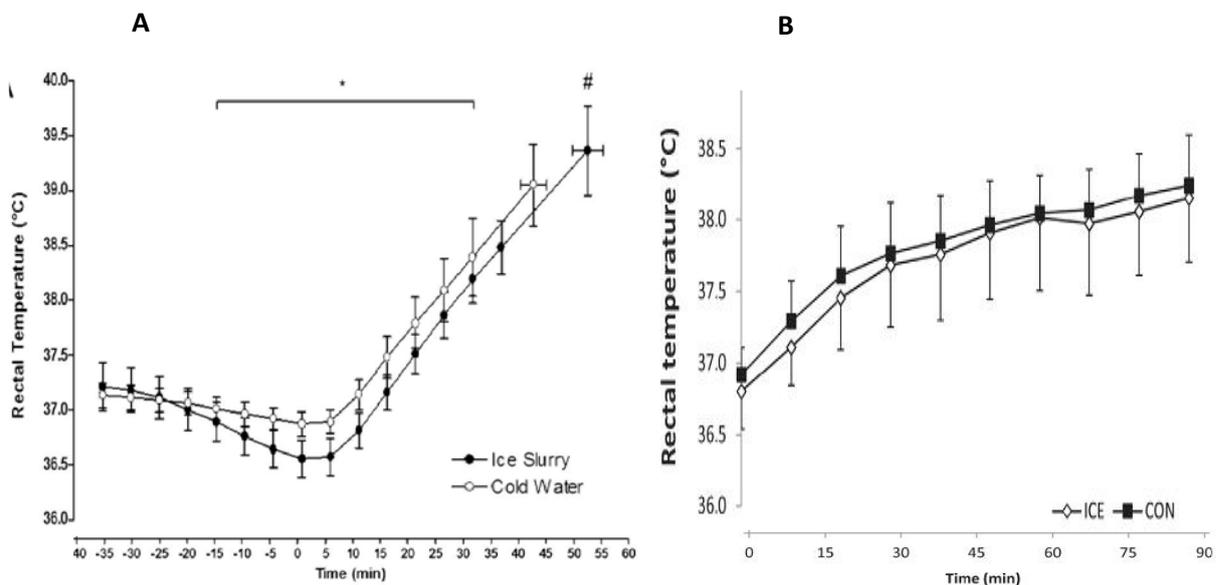


Figure 1.11. Temps d'absorption d'eau et la réduction de la Tcen. (A) La Tcen était inférieure avec l'absorption de glace pilée à -1 °C avant l'exercice par rapport à l'eau à 4 °C. \* différence significative entre les deux conditions,  $P < 0.05$  (D'après Siegel et coll. 2010). (B) La Tcen n'est pas différente entre la glace pilée à -1 °C et l'eau à 37 °C lorsque les deux sont absorbées pendant l'exercice (D'après Burdon et coll. 2015).

Le mécanisme de réduction de Tcen par l'ingestion d'eau froide et de glace pilée sont attribués à l'absorption de la chaleur du corps par la boisson (Siegel et Laursen 2012; Yeo et coll. 2012; Siegel et coll. 2010). Alors que cela a été confirmé par les résultats de plusieurs études qui ont utilisé la stratégie de refroidissement interne (une boisson froide est absorbée avant l'exercice), l'absorption de boisson en cours de l'exercice ne provoque pas de diminution de la Tcen. Les mécanismes précis pour expliquer cette différence sont encore mal compris. Cependant, une explication de l'inefficacité de l'absorption de boissons froides au cours de l'exercice réduisant la Tcen est qu'il pourrait y avoir un mécanisme de réponse à l'impact de la chaleur exogène sur le corps par lequel l'ingestion de l'eau froide pendant l'exercice ne conduit pas à réduire la Tcen (Lee et coll. 2008a). D'une part, il est montré que l'absorption de l'eau froide pendant l'exercice réduit l'élimination de chaleur par évaporation et la quantité de chaleur absorbée par l'eau froide est équivalente à celle de la dégradation de l'évacuation de chaleur par évaporation (Morris et coll. 2014; Bain et coll. 2012). D'autre part, il est aussi suggéré qu'alors que l'estomac et les viscères reçoivent un flux sanguin plus faible au cours de l'exercice, une grande partie du transfert de chaleur avec l'eau froide ingérée est confinée aux viscères et aux tissus alentours. Les flux sanguins limités des viscères à l'exercice ne génèrent ainsi que de petits changements de la température mesurée au niveau du rectum (Bain et coll. 2012).

#### **5.3.4.2. Le temps d'absorption de boisson froide et l'augmentation de la Tcen**

Bien que l'absorption d'une boisson froide avant l'exercice réduise la Tcen, il apparaît aussi certaines restrictions mineures. En fait, les résultats de certaines études ont montré que la vitesse de l'augmentation de la Tcen était plus élevée au cours de

l'échauffement et des 15-20 premières minutes d'activation lors de l'absorption de glace pilée par rapport à de l'eau à température neutre (Siegel et coll. 2012; Yeo et coll. 2012; Stanley et coll. 2010). De plus, Yeo et coll. (2012) et Siegel et coll. (2012) ont montré que la Tcen à la fin de l'exercice avec l'absorption de glace pilée était plus élevée par rapport à celle des boissons à température neutre. Siegel et coll. (2012) ont également montré que la Tcen à la fin de l'exercice au premier seuil ventilatoire est plus élevée dans le cas de l'absorption de la glace pilée (-1 °C) que de l'eau de 37 °C (39.76 °C vs 39.48 °C, respectivement). Yeo et coll. (2012) ont montré qu'à la fin de 10.000 m de course à pied en contre la montre en condition extérieure, la Tcen est plus élevée dans le cas de l'absorption de la glace pilée (-1.4 °C) que de l'eau de 31 °C (40.2 °C vs 39.8 °C, respectivement). Il est suggéré que l'ingestion de la glace pilée permet une réduction physiologiquement significative de la température du cerveau (Siegel et coll. 2010) et une réduction/inhibition de la rétroaction afférente créée par le stress thermique ou trompe le cerveau créant un effet physiologique inconscient (Castle et coll. 2012; Tyler et Sunderland 2011a, b; Tyler et coll. 2010) ou en bloquant les signaux inhibiteurs vers centres de commande motrice (Nybo 2008). Tout cela permet donc de produire plus de puissance ou de maintenir plus longtemps l'intensité d'exercice, mais produisant aussi une plus grande chaleur métabolique (Yeo et coll. 2012; Siegel et coll. 2010).

Même si la Tcen plus élevée à la fin de l'exercice liée à l'absorption de glace pilée avant l'exercice est expliquée comme un résultat bénéfique augmentant les limites physiologiques de l'organisme (Yeo et coll. 2012; Siegel et coll. 2010), il est important de noter que cela pourrait également être considéré comme une conséquence négative car l'augmentation importante de la température rectale au-delà des limites tolérables normales pourrait entraîner un coup de chaleur. De plus, le taux d'augmentation de la

T<sub>cen</sub> peut raccourcir le temps mis pour atteindre la T<sub>cen</sub> critique (Siegel et coll. 2012) ou augmenter le stress thermique au premier stade de l'exercice (Yeo et coll. 2012). Stanley et coll. (2010) ont observé une réduction de 0.4 °C de la température rectale, mais sans l'augmentation de la performance lors de l'exécution d'un travail équivalant à une charge de 30 minutes de pédalage à 75% de P<sub>max</sub> sur un ergomètre le plus rapidement possible lorsque les sujets ont bu la glace pilée pendant 50 minutes de repos avant l'exercice par rapport à l'eau à 19 °C. Les auteurs ont suggéré que le taux d'augmentation plus élevé de T<sub>cen</sub> avec l'absorption de la glace pilée a contribué à limiter le bénéfice de la réduction de T<sub>cen</sub>, par conséquent la performance à l'exercice n'a pas augmenté.

Auparavant, Lee et coll. (2008b) ont indiqué que le temps d'exercice était plus long lors de l'absorption d'eau à 4 °C par rapport à l'eau à 37 °C, 63.8 minutes ± 4.3 minutes vs 52 minutes ± 4.1 minutes, respectivement. Bien que la T<sub>cen</sub> était encore élevée (39.5 °C) lors de l'absorption de l'eau froide, elle n'était pas différente de celle notée lors de l'absorption d'eau à 37 °C (la T<sub>cen</sub> était de 39.5 °C). Dans cette étude, les sujets ont ingéré la boisson pendant 30 minutes de repos et toutes les 10 minutes pendant l'exercice. Il paraît qu'un supplément périodique de l'eau froide pendant l'exercice permettrait d'empêcher un taux d'augmentation de la T<sub>cen</sub> plus élevé pendant l'exercice. Ainsi, une combinaison de l'absorption d'eau froide avant et pendant l'exercice peut être une stratégie qui permet de maintenir une T<sub>cen</sub> basse et d'éviter l'élévation excessive de la T<sub>cen</sub> à l'exercice prolongé (Bongers et coll. 2015).

#### **5.3.4.3. La température et quantité de l'eau absorbée**

Les boissons froides ont été démontrées comme agréables au goût (Burdon et coll. 2010b; Mundel et coll. 2006) et ont été associées à des conséquences négatives mineures. L'absorption d'eau froide a provoqué des frissons chez un seul sujet parce que le CT a été réduit de manière excessive (Byrne et coll. 2011). Dans certaines études, il a été rapporté un mal de tête lié à la prise de boisson froide en raison de la stimulation du nerf trijumeau situé au nasopharynx (Siegel et coll. 2012; Yeo et coll. 2012; Siegel et coll. 2010). Ce phénomène est appelé le « cerveau congelé » en anglais « brain freeze » (Bird et coll. 1992). Néanmoins, la durée du phénomène de cerveau congelé est très courte et il n'existe aucune preuve de ses effets néfastes pour l'exercice (Siegel et Laursen 2012).

En théorie et en pratique, l'absorption de plus grandes quantités de boisson froide (ou glace pilée) entraîne une réduction de la T<sub>cen</sub> plus importante que l'ingestion de petites quantités d'eau à la même température. Par exemple : Ross et coll. (2011) ont constaté que l'ingestion de 500 g et 1000 g de glace pilée a donné une réduction de 0.25 °C et 0.60 °C de la température rectale, respectivement. Néanmoins, il a été rapporté une sensation d'inconfort dans le tractus gastro-intestinal (Stevens et coll. 2013; Ross et coll. 2011) ou l'augmentation du besoin d'uriner chez les sujets juste avant l'exercice en absorbant l'eau froide par rapport à de l'eau à température ambiante (Byrne et coll. 2011). Cet inconfort pourrait être lié à l'absorption de grandes quantités d'eau. En effet, 14 g.kg<sup>-1</sup> de glace pilée et 11.5 mL.kg<sup>-1</sup> d'eau froide ont été absorbés pendant 30 minutes avant l'exercice dans l'étude de Ross et coll. (2011) et Byrne et coll. (2011), respectivement. Cependant, il n'est pas apparu de cas similaires dans d'autres études

(Yeo et coll. 2012; Siegel et coll. 2010; Lee et coll. 2008b) avec une quantité d'eau comprise entre 6.8 g.kg<sup>-1</sup> et 13.0 g.kg<sup>-1</sup>. Toutefois, l'ingestion de grande quantité d'eau n'étant pas écologique et jamais observée lors des exercices de compétitions, il semble pertinent d'étudier l'effet de l'ingestion de petits volumes d'eau dans les activités sportives de compétition (Stevens et coll. 2013).

#### **5.3.4.4. La température de l'environnement**

L'environnement dans lequel les boissons sont ingérées peut également être important pour optimiser son succès. Siegel et coll. (2010) ont observé une réduction de 0.66 °C de la température rectale suivant l'ingestion de la glace pilée dans un environnement neutre (25 °C). Dans une autre étude, l'ingestion d'un même volume de glace pilée dans un environnement chaud (34 °C) n'a réduit que de 0.43 °C la température rectale. Il est possible que la température ambiante puisse affecter la réduction de la température rectale (Siegel et coll. 2012).

#### **5.3.5. Optimisation des impacts d'une boisson froide**

L'avantage le plus évident d'absorption d'une boisson froide est la réduction de la T<sub>cen</sub>. La glace pilée a été montrée comme la plus efficace pour réduire la T<sub>cen</sub> par rapport à de l'eau froide ou de l'eau à température ambiante (Siegel et coll. 2012, 2010). Une plus grande quantité de glace pilée absorbée réduirait la T<sub>cen</sub> de manière plus importante par rapport à l'absorption de petites quantités (Ross et coll. 2011). Cependant, un petit malaise peut apparaître lors de l'absorption d'une grande quantité de boissons froides dans un court laps de temps (30 minutes avant l'exercice) tels

qu'une gêne au niveau gastro-intestinal (Ross et coll. 2011) ou l'augmentation de la vidange urinaire avant l'exercice (Byrne et coll. 2011). D'autre part, dans un test de familiarisation avec les conditions d'épreuve, Ihsan et coll. (2010) ont montré que 6.8 g.kg<sup>-1</sup> de glace pilée constitue la quantité maximale qu'un sujet ait pu absorber pendant 30 minutes de repos. Une quantité de 6.8 g.kg<sup>-1</sup> à 8 g.kg<sup>-1</sup> était utilisée dans d'autres études (Siegel et coll. 2012, 2010; Yeo et coll. 2012; Ihsan et coll. 2010) sans aucun rapport d'inconfort gastro-intestinal ou de problèmes urinaires. En outre, un volume de 10 g.kg<sup>-1</sup> peut ne pas être pratique à ingérer pour de nombreux athlètes (Stevens et coll. 2013). Il est possible qu'il existe un seuil de la quantité de glace pilée à absorber pour lequel la réduction de Tcen est importante et l'inconfort gastro-intestinal limité.

L'analyse ci-dessus montre que l'absorption d'une quantité de boissons froides de 6.8 g.kg<sup>-1</sup> à 8 g.kg<sup>-1</sup> de poids corporel pourrait réduire l'inconfort chez les sujets, tout en permettant une réduction de la Tcen. De plus, la combinaison de l'absorption d'une boisson froide avant et pendant l'exercice permettrait de maintenir une Tcen plus basse pendant l'exercice. Elle permettrait également de prévenir une Tcen plus élevée à l'exercice tout en conservant une grande quantité d'eau absorbée pendant l'exercice, utile pour des exercices prolongés. En outre, l'absorption de boisson dans un environnement frais avant l'exercice, pourrait réduire la Tcen de manière plus importante par rapport à un environnement chaud (Siegel et Laursen 2012; Siegel et coll. 2012). Ainsi, pour obtenir les avantages optimaux de l'ingestion d'une boisson froide à l'exercice, une certaine combinaison de facteurs tels que la température et le volume de l'eau, la période de l'ingestion d'eau et de l'environnement est décisive.

## **6. Menthol et l'exercice en climat chaud**

Le menthol est un composé organique obtenu soit par synthèse, soit par extraction à partir de l'huile essentielle de menthe poivrée ou d'autres huiles essentielles de menthe d'origine végétale. Il a une odeur et un goût agréable et est utilisé dans une grande variété de produits alimentaires ou cosmétiques, tels que les dentifrices, mousses à raser, bains de bouche, aliments, les médicaments contre le rhume, confiseries, et même dans les cigarettes (Eccles 1994; Watson et coll. 1978). Le L-menthol possède de puissants effets de sensation de refroidissement et il est non toxique pour les humains (Eccles 1994). Il est bien connu pour son effet de sensation de fraîcheur lors de l'inhalation, de la consommation par voie orale ou de l'application sur la peau en raison de sa capacité à activer chimiquement le récepteur au froid (TRPM8) (Yosipovitch et coll. 1996).

### **6.1. Le menthol et les fonctions physiologique et psychologique.**

#### **6.1.1. Le menthol et les thermorécepteurs au froid (TRMP8)**

Le menthol est actif sur les trois récepteurs sensibles à la température : TRPM8 (activé par des températures  $< 25\text{ °C}$ ), TRPV3 (activé par des températures  $> 33\text{ °C}$ ) et TRPA1 (activé par des températures  $< 17\text{ °C}$ ). Il est suggéré qu'il existe une gamme de doses de menthol qui produit un effet sensoriel au froid par TRPM8, alors que des doses plus élevées peuvent influencer TRPV3 et pourrait contribuer à stimuler le réchauffement (Macpherson et coll. 2006). Le menthol stimule des récepteurs au froid grâce à l'augmentation de la décharge neuronale en inhibant le flux de calcium à partir du récepteur de froid et donc augmente l'activité afférente des sondes froides vers

l'hypothalamus et le noyau para brachial latéral (Morrison et Nakamura. 2011; Schäfer et coll. 1986).

### **6.1.2. Le menthol et l'effet analgésique**

Le menthol est également connu comme un analgésique. Le menthol réduit la douleur aiguë, la douleur neuropathique et la douleur inflammatoire. L'effet analgésique du menthol se fait à travers des mécanismes périphériques et au niveau central (Pan et coll. 2012). Les mécanismes de ses actions antidouleur ne sont pas encore clairs. Toutefois, au niveau périphérique lorsque du menthol est appliqué sur la peau, l'action analgésique du menthol est basée sur l'activité des TRPM8 et TRPA1 (la molécule de détection de la douleur). La concentration de menthol requise pour activer TRPM8 n'est pas si différente de celle nécessaire pour bloquer l'activité des TRPA1. Par conséquent, l'action analgésique du menthol pourrait par la sensation de refroidissement nous distraire de la douleur et par conséquent, bloquer l'activité de TRPA1 (Macpherson et coll. 2006). Au niveau central, il affecte l'activité des neurones de la corne dorsale de la moelle épinière. L'injection de menthol par la voie intrapéritonéale chez les rats a été montrée pour avoir une action analgésique centrale en bloquant les canaux de  $\text{Na}^+$  et de  $\text{Ca}^{2+}$  dans les neurones de la corne dorsale (Pan et coll. 2012).

### **6.1.3. Le menthol et le confort respiratoire**

Les muqueuses de la cavité oropharyngée sont particulièrement sensibles au menthol. Green (1985) a résumé que lorsqu'il est administré par voie orale, le menthol

améliore les sensations froides dans la bouche et module l'activité de récepteur du goût. Dans une étude sur des sujets souffrant de congestion nasale associée au rhume, Eccles et coll. (1990) ont montré que l'administration orale d'une pilule contenant 11 mg menthol a donné une sensation subjective d'une meilleure circulation de l'air sans aucune modification de résistance des voies nasales. Naito et coll. (1997) ont évalué l'influence de la stimulation du L-menthol sur la perméabilité du palais nasal. Les sujets ont gardé dans la bouche une pilule contenant du L-menthol. Les résultats ont indiqué une amélioration de la sensation nasale du flux d'air sans diminution de la résistance nasale. Le nez est innervé par le nerf trijumeau dont l'extrémité comprend les récepteurs au froid. Ces récepteurs sont distribués dans le vestibule nasal et le palais. Il est suggéré que l'effet de la stimulation par le menthol sur le nerf du palatin et sur les terminaisons nerveuses sensorielles de la muqueuse nasale engendre un sentiment d'augmentation du débit d'air par le nez sans augmentation de la perméabilité nasale. Cela réduit la sensation d'inconfort respiratoire (Nishino et coll. 1997) et crée un stimulus agréable (Eccles 2000).

#### **6.1.4. Le menthol et la fonction cardiovasculaire**

Dans l'étude de Kashima et Hayashi (2013), les sujets se sont gargarisés avec une solution de menthol à une concentration de 0.4 mM et 20 mM. Les auteurs ont constaté que la vasoconstriction au niveau du nez et la FC ont augmenté de manière significative par rapport aux valeurs initiales (avant le rinçage de la bouche) en se gargarisant avec la solution à 20 mM de menthol, mais pas avec une solution à 0.4 mM menthol. Auparavant, Gelal et coll. (1999) ont indiqué que la FC diminue après l'absorption d'une capsule contenant 100 mg L-menthol, sans aucun effet sur la pression

artérielle. D'un autre côté, les résultats de l'étude de Meamarbashi et Rajabi (2013) ont indiqué que la FC et la pression artérielle systolique ont été réduites après une période d'absorption de 500 mL d'eau contenant 0.05 mL d'huile de menthe poivrée par jour, pendant 10 jours.

Kashima et Hayashi (2013) ont suggéré que la concentration de 20 mM de menthol stimule l'activité du système nerveux sympathique et provoque une vasoconstriction au niveau du nez et une augmentation du rythme cardiaque. Meamarbashi et Rajabi (2013) ont déclaré que la menthe poivrée réduit le rythme cardiaque et la pression artérielle systolique en réduisant la tonicité musculaire lisse de la paroi des artères. Les résultats chez l'animal ont montré que l'huile de menthe poivrée détend les artères chez les rats (Cheang et coll. 2013).

#### **6.1.5. L'activité du système nerveux central**

Les effets de la menthe poivrée peuvent directement agir sur les cellules nerveuses dans le cerveau et provoquer des effets au niveau psychologique. Les études chez les rats ont montré les effets pharmacologiques du menthol en augmentant de façon significative l'activité locomotrice chez les rats : la perfusion sous-cutanée d'une dose de 100 mg.kg<sup>-1</sup>, 200 mg.kg<sup>-1</sup>, 400 mg.kg<sup>-1</sup> ou 800 mg.kg<sup>-1</sup> de menthe poivrée a augmenté le niveau de l'activation locomotrice chez des rats (Umezu et coll. 2001). Le menthol passe dans la circulation sanguine, traverse la barrière hémato-encéphalique où il agit comme un stimulant du système nerveux central en inhibant la recapture de la dopamine et/ou en facilitant la libération de la dopamine. Cette stimulation améliore l'activité chez les rats. Il est considéré comme efficace dans le traitement de la fatigue mentale, et pourrait posséder une action similaire aux psychostimulants (Umezu 2009).

### **6.1.6. La température du corps**

Certaines expériences chez les animaux ont montré que le menthol influence la température corporelle. Ruskin et coll. (2007) ont étudié l'effet de l'injection sous-cutanée de (-)-menthol (200 mg.kg<sup>-1</sup> ou 400 mg.kg<sup>-1</sup>) et Nicotine (0.5 mg.kg<sup>-1</sup>) sur la T<sub>cen</sub> des rats. Les résultats ont montré que le menthol a provoqué l'hyperthermie de 0.4 °C (à la dose de 400 mg.kg<sup>-1</sup>) et de 0.8 °C (à la dose de 200 mg.kg<sup>-1</sup>). Almeida et coll. (2006) ont indiqué qu'une faible dose de menthol (50 µgr.kg<sup>-1</sup>), administrée par voie intraveineuse, ne modifie pas la température corporelle chez les rats.

À ce jour, très peu d'études ont étudié les effets du menthol sur les capacités de thermorégulation chez les humains. Dans l'étude de Gelal et coll. (1999), la T<sub>cen</sub> n'a pas été mesurée, mais les résultats ont montré que la température de la peau était inchangée lors de l'ingestion d'une capsule contenant 100 mg ou de bonbons contenant 10 mg de menthol.

### **6.1.7. Le menthol et l'impact psychologique**

L'effet direct du menthol sur le système nerveux central (cerveau) pourrait avoir un impact psychologique, tout du moins chez l'animal. Les expériences menées sur des souris ont montré que la perfusion sous-cutanée d'une solution contenant de 100 g.kg<sup>-1</sup> à 800 mg.kg<sup>-1</sup> d'huile mentholée stimule l'activité ambulatoire chez la souris (Umezu et coll. 2001). Le menthol pourrait avoir un effet similaire aux médicaments qui provoquent un stimulus mental. Après l'absorption dans le sang, en passant à travers la barrière hémato-encéphalique, il affecterait l'activité des neurones du cerveau, provoquerait une excitation mentale et augmenterait l'activité chez des souris (Umezu et coll. 2001). Pan et coll. (2012) ont injecté 100 mg/kg de menthol dans l'intrapéritonéale chez le rat. Les

auteurs ont trouvé 54.6 µg/g de menthol dans le cerveau du rat, 5 minutes après l'injection et encore 12.1 µg/g 30 minutes après l'injection. Le menthol a encore été détecté dans le cerveau du rat 60 minutes après l'injection. Chez les hommes, il est montré que la demi-vie plasmatique du menthol est de 56.2 minutes lors de la prise d'une capsule contenant 100 mg de menthol (Gelal et coll. 1999).

Chez l'homme, l'effet de l'ingestion orale du menthol sur les récepteurs au froid peut être perçue comme un stimulus plaisant (Eccles 2000). En outre, l'huile mentholée est utilisée pour traiter la fatigue mentale (Tisserand et coll. 1993 cités par Umezu 2009). L'odeur de la menthe peut stimuler les récepteurs olfactifs, donc les zones du cerveau (i.e., le système d'activation réticulaire) responsables du maintien de la vigilance (Raudenbush et coll. 2009). Il peut aider à changer d'humeur en réduisant la fatigue mentale (Umezu 2009).

Avec sa caractéristique volatile, l'inhalation de la menthe peut également entraîner des effets psychologiques. Raudenbush et coll. (2009) ont mené une expérience dans laquelle les participants conduisaient avec un logiciel de conduite virtuelle (modélisant avec précision des conditions réalistes) en respirant l'air ambiant agrémenté de l'odeur de la menthe 30 secondes toutes les 15 minutes (50 mL d'huile de menthe poivrée dans des tubes contenant un faible débit d'oxygène à 1.3 L.min<sup>-1</sup>). Le parfum de menthe a réduit l'anxiété et la fatigue pendant la tâche de conduite. De plus la frustration et la perception du temps par les conducteurs a été rendue sensiblement plus courte par rapport à la condition contrôle (avec un débit d'oxygène à 1.3 L.min<sup>-1</sup> sans odeur de la menthe). Les auteurs ont supposé que l'odeur de menthe stimule les zones du cerveau responsable de la vigilance.

## 6.2. Le menthol et la performance à l'exercice en environnement chaud

Le sentiment de fraîcheur lors de l'application de menthol sur la peau est considéré comme un facteur pouvant améliorer le sentiment de chaleur perçue et donc potentiellement bénéfique à la performance aérobie en environnement chaud. Certaines études ont évalué la capacité de thermorégulation à l'exercice lors de l'application du menthol sur la peau (Gillis et coll. 2010), en étudiant l'impact sur le débit sudoral (Kounalakis et coll. 2010) ou l'influence du menthol sur la performance (Barwood et coll. 2015, 2012). Lors de l'application sur la peau, le menthol altère le sentiment de chaleur dans le sens d'une réduction de la ST (Gillis et coll. 2010; Barwood et coll. 2015, 2012). Cependant, l'effet du menthol sur la performance n'a pas été mis en évidence (Barwood et coll. 2015, 2012).

En outre, il existe un impact négatif sur la capacité de thermorégulation lorsque la concentration de la solution de menthol est supérieure à 0.2% (Gillis et coll. 2010; Kounalakis et coll. 2010). Gillis et coll. (2010) ont évalué l'effet de deux solutions mentholées au cours d'un exercice aérobie dans des conditions chaudes et humides (30 °C, 70% d'HR). Les participants ont réalisé 45 min d'exercice à 45% de  $PO_{peak}$ , avec une pulvérisation de 100 mL d'eau contenant soit 0.05%, soit 0.2% de L-menthol, ou d'un spray de contrôle. Les résultats suggèrent qu'à des concentrations de 0.05% et 0.2% de menthol, la pulvérisation mentholée provoque une nette sensation de frais par rapport au spray de contrôle. La température rectale était significativement plus élevée tout au long de l'exercice quand les participants ont été pulvérisés avec une solution à 0.2% de menthol par rapport au spray à 0.05% de menthol ou au spray de contrôle. Kounalakis et coll. (2010) ont réalisé une étude en appliquant une solution de menthol à une concentration de 4.6% ou d'une eau sans menthol sur tout le corps des sujets avant l'exercice. Les sujets ont pédalé à 60% de  $VO_{2max}$  dans un environnement

modérément chaud (24 °C, 46% d'HR) jusqu'à ce que la température rectale du sujet atteigne 38 °C. Les résultats de cette recherche ont montré lors de l'application mentholée, une augmentation de la température rectale plus rapide et un retardement du début de la transpiration par rapport à la condition de contrôle. Il a été suggéré que le menthol appliqué sur la peau créait une vasoconstriction, entraînant une transpiration retardée, qui à son tour entraîne une augmentation plus rapide de  $T_{cen}$ .

Mundel et Jones (2010) ont réalisé une étude en climat chaud et sec (34 °C, 27% d'HR) sur le rinçage de la bouche toutes les 10 minutes pendant 10 s (puis cracher) avec une solution de 25 mL menthol (0.01%) ou une eau aromatisée à l'orange (Placebo). Les sujets ont été autorisés à boire ad libitum (300 mL à 19 °C, disponibles et remplacés toutes les 15 minutes) au cours de l'exercice. Les résultats ont montré une augmentation de la performance de 9% sur un ergocycle jusqu'à l'épuisement, une hyperventilation de 8 L.min<sup>-1</sup> ainsi qu'une diminution du NDP central de 15% lors de l'utilisation de la solution de menthol par rapport à l'eau aromatisée à l'orange.

Très récemment, Meamarbashi et Rajabi (2013) ont mené une étude pour évaluer les effets de l'absorption à long terme de l'huile de menthe poivrée sur le fonctionnement pulmonaire et cardiaque, le métabolisme et la performance à l'exercice. Les sujets ont absorbé 500 mL d'eau minérale contenant 0.05 mL d'huile de menthe poivrée chaque jour pendant 10 jours consécutifs. Les résultats ont montré une augmentation de la performance en temps (830 s vs 664 s), une augmentation de la puissance (140 kW vs 114 kW), du  $\dot{V}O_2$  (3.03 L.min<sup>-1</sup> vs 2.74 L.min<sup>-1</sup>), et du  $\dot{V}CO_2$  (3.73 L.min<sup>-1</sup> vs 3.08 L.min<sup>-1</sup>) au test de Bruce. Dans une autre étude récente de Meamarbashi (2014), l'application de 50 µL d'huile de menthe poivrée pure vs eau minérale sur la langue des sujets a augmenté la performance au test de force de la main (36.1%), du saut vertical (7.0%) et du saut longueur (6.4%).

Bien que le procédé et la durée d'utilisation du menthol par voie orale soient très différents entre les études, l'application du menthol sur la langue (Meamarbashi 2014), le rinçage de la bouche avec une solution mentholée (Mundel et Jones 2010), l'absorption de l'eau contenant du menthol (Meamarbashi et Rajabi 2013) ou l'ingestion de menthol pendant l'exercice (Meamarbashi 2014; Mundel et Jones 2010) ou sur plusieurs jours (Meamarbashi et Rajabi 2013). Ces études ont indiqué une augmentation de la capacité d'exercice, sans nuire au processus de thermorégulation, lors de l'utilisation de menthol.

### **6.3. Les mécanismes de l'effet du menthol sur la performance**

Jusqu'à présent, le mécanisme de l'augmentation de la performance à l'exercice liée à l'ingestion de menthe poivrée n'est pas bien compris. Cependant, certains auteurs avancent une influence psychologique (Mundel et Jones 2010), un impact sur la respiration (Meamarbashi et Rajabi 2013; Mundel et Jones 2010), ou des effets sur le système nerveux central. Ces effets peuvent être médiés par les effets du menthol sur les récepteurs au froid sur le nasopharynx, l'oropharynx, sur le muscle lisse vasculaire ou sur les neurones du système nerveux central.

Une réduction du NDP pendant l'exercice par les effets du menthol a également été proposée comme un mécanisme pouvant améliorer l'exercice. En mesurant l'effort cognitif en trois zones distinctes, le NDP global, le NDP central (cardiorespiratoire) et le NDP local (musculaire), Mundel et Jones (2010) ont constaté qu'il n'y avait pas de différence du NDP global et le NDP local, mais le NDP central était inférieur lors du rinçage de la bouche avec le menthol par rapport au placebo (figure 1.12). Les auteurs ont postulé qu'une réduction du NDP central de 15% était liée à une augmentation de l'hyperventilation de  $8 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$  avec le rinçage de la bouche avec le menthol. Le point de vue de Mundel et Jones (2010) est également étayé par les constatations de

Nishino et coll. (1997) qui rapporte que la stimulation par le menthol réduit la sensation de gêne respiratoire (Nishino et coll. 1997). Meamarbashi (2014) ont montré que la capacité vitale forcée (au début de deuxième minute), le débit inspiratoire de pointe, et le débit expiratoire de pointe dans le cas du menthol augmentent (35.1%, 66.4% et 65.1%, respectivement) à 5 minutes de l'application de 50  $\mu$ L d'huile de menthe sur la langue. Les auteurs ont suggéré que le menthol augmente la relaxation des muscles lisses bronchiques créant l'amélioration des mesures spirométries (Meamarbashi 2014).

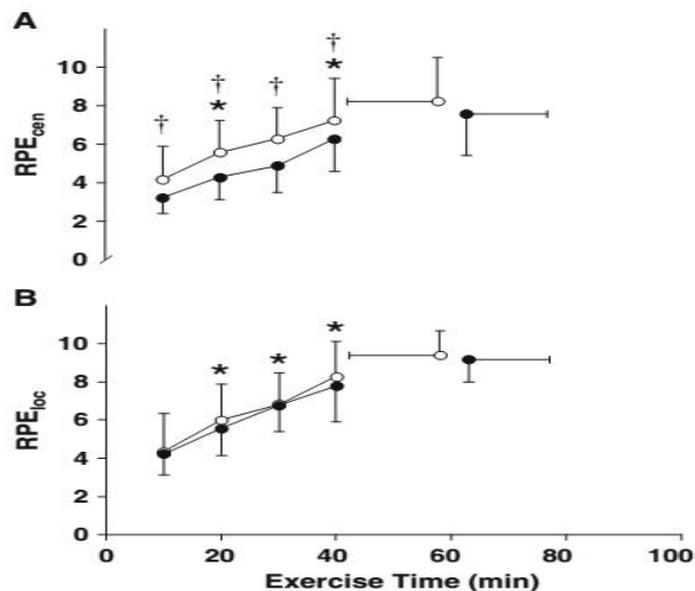


Figure 1.12. NDP central (A) et musculaire (B) dans l'exercice jusqu'à l'épuisement à 65% de POpeak en environnement chaud et humide pour le menthol (cercle ferme) et placebo (cercle ouvert). \* Différence significative par rapport à la valeur au amont dans chaque condition,  $P < 0.05$ . † différence significative entre deux conditions au cours de l'exercice,  $P < 0.05$  (D'après Mundel et Jones 2010).

La fatigue mentale, un état psychobiologique caractérisé par des sentiments subjectifs de « fatigue » et « d'un manque d'énergie », entraîne une augmentation du NDP et la diminution de la performance physique (Marcora et coll. 2009). L'huile de

menthe poivrée produit l'excitation mentale, un changement d'humeur, réduit la fatigue mentale (Umezu 2009), et réduit NDP central (Mundel et Jones 2010). En plus, selon St Clair Gibson and Noakes (2004) la performance à l'exercice est déterminée par le gouverneur central qui intègre des rétroactions. Les rétroactions afférentes fournissent au cerveau des informations détaillées sur l'état de l'organisme à l'exercice, à travers lesquelles le cerveau effectue des calculs afin de déterminer la stratégie de rythme optimal et de réserve physiologique par le recrutement d'unités motrices. Ce niveau de recrutement sera déterminé par une variété de facteurs, y compris l'état émotionnel et le niveau de fatigue mentale (Noakes 2012). Par conséquent, l'effet direct du menthol sur le système nerveux central conduit à des changements de l'état mental et psychologique qui peuvent être des facteurs favorables à la performance.

Les changements dans le processus psychologique, comme la sensation de plaisir et la motivation, par stimulation du récepteur au menthol, pourraient avoir une action bénéfique pour la performance à l'exercice prolongé. La stimulation du menthol sur les récepteurs au froid au niveau des voies aériennes supérieures crée une sensation froide (Naito et coll. 1997, 1991; Eccles 1994; Green 1985) et réduit la sensation de gêne respiratoire (Eccles 2000; Nishino et coll. 1997), liée à la soif et à la respiration (Eccles 2000). Tout cela est perçu comme un stimulus agréable et motivationnel au niveau du cerveau (Mundel et Jones 2010; Nishino et coll. 1997). Guest et coll. (2007) ont souligné que l'absorption de l'eau froide stimule l'activité de certaines régions du cerveau humain impliquée dans les mécanismes de récompenses et en corrélation avec les états de plaisir subjectifs. Mundel et Jones (2010) ont suggéré que les signaux afférents du menthol sur les récepteurs au froid dans le pharynx ont créé un sentiment

de confort et de motivation dans le cerveau et, par conséquent, favorise l'amélioration de la performance prolongée.

Le menthol crée une sensation de froid via son effet sur les thermorécepteurs au froid (Eccles 1994; Green 1985; Naito et coll. 1991). Naito et coll. (1997) ont fait dire aux auteurs que le menthol stimule les récepteurs nasaux au froid incitant le cerveau à mal interpréter l'information sensorielle et conduisant à une sensation accrue de la perméabilité nasale sans diminution de la résistance nasale. De plus, il a émis l'hypothèse que les signaux erronés de stress thermique peuvent tromper le cerveau et créer un effet physiologique inconscient qui mène à une amélioration des performances (Castle et coll. 2012; Tyler et Sunderland 2011a, 2011b; Tyler et coll. 2010). Tyler et coll. (2010) ont montré que la performance physique a augmenté de 6% avec l'application d'un collier de refroidissement. L'explication était que le collier de refroidissement fournit un faux signal de stress thermique et que la capacité d'exercice a augmenté par la suite comparée à une session sans refroidissement (Tyler et coll. 2010). La vapeur de menthol stimule les récepteurs nasaux au froid. Cela conduit le cerveau à mal interpréter l'information sensorielle et cela crée une sensation accrue de la perméabilité nasale sans diminution de la résistance nasale (Naito et coll. 1997). Par conséquent, l'effet du menthol dans la région du nasopharynx peut donner un "faux" signal et peut donc améliorer les performances à l'exercice dans un environnement chaud.

St Clair Gibson et Noakes (2004) ont introduit la notion d'un régulateur central qui réglerait la stratégie d'exercice et la performance de manière optimale tout en maintenant l'homéostasie. Ce modèle a toujours été expliqué en fonction du

changement de l'état physique et psychologique du sujet à l'exercice, tels que des niveaux réduits en glycogène musculaire, une augmentation de la Tcen, les niveaux de motivation, le degré de fatigue mentale (Noakes 2012). Par conséquent, le menthol provoque les effets tels que la stimulation du refroidissement (Naito et coll. 1997; Eccles 1990; Green 1985), la réduction de la sensation de gêne respiratoire (Nishino et coll. 1997), la réduction du NDP central (Mundel et Jones 2010), de l'anxiété et de la fatigue (Raudenbush et coll. 2009), de la fatigue mentale (Umezue 2009), et l'augmentation de la sensation de plaisir et de la motivation au sein du cerveau (Mundel et Jones 2010). Ces effets peuvent être des facteurs positifs participant à réajuster le modèle de "réaction d'anticipation". En conséquence, cela permet d'augmenter la puissance ou de prolonger la durée d'un exercice.

Nybo et Nielsen (2001b) ont montré que le recrutement des unités motrices du muscle squelettique et l'activation centrale est réduit pour des températures centrales élevées. Récemment, Siegel et coll. (2011) ont montré que, après l'exercice, le maintien pendant deux minutes d'une contraction volontaire maximale après l'ingestion de 1.25 g.kg<sup>-1</sup> de glace pilée (-1 °C) était significativement plus élevé par rapport à l'ingestion de l'eau chaude (40 °C). Les auteurs ont proposé que la glace pilée stimule le thermorécepteur interne (i.e., situé dans la bouche, l'œsophage et l'estomac) ainsi que les régions du cerveau associées à la récompense, au plaisir, à la motivation et à la fatigue. Cela a pour effet d'augmenter la commande centrale et/ou la motivation. Cela améliore aussi la fonction neuromusculaire. Auparavant, il a été suggéré que le menthol procurait une sensation de fraîcheur agréable et motivationnelle dans le cerveau et prolongerait ainsi la durée de l'exercice (Mundel et Jones 2010). Par

conséquent, il est possible que le menthol augmente la performance physique en augmentant la fonction neuromusculaire par stimulation de l'activation centrale.

L'apport réduit en oxygène au cerveau augmente la fatigue centrale et réduit la performance à l'exercice maximal (Rasmussen et coll. 2010) ou/et à l'exercice en endurance (Nybo 2008). La réduction du flux sanguin cérébral global liée à l'apparition d'une hyperthermie (i.e., une réduction de 18% du flux sanguin cérébral global lors de la T<sub>cen</sub> à 39.5 °C vs à 37.9 °C) durant un exercice prolongé augmente le degré d'effort mental (Nybo et coll. 2002). Peiffer et coll. (2001) ont réalisé une étude d'imagerie fonctionnelle cérébrale avec la tomographie par émission de positrons. Il a été constaté que la réduction d'inconfort respiratoire liée à la respiration d'air mentholé augmente de manière significative le débit sanguin cérébral. Cela peut donc être un facteur limitant la fatigue centrale à l'exercice d'endurance. Toutefois, c'est une supposition et des recherches supplémentaires sont nécessaires pour valider cette hypothèse.

**DEUXIEME PARTIE :**

# **CONTRIBUTION PERSONNELLE**



## **1. Objectifs et hypothèses de recherche**

La performance aérobie est négativement affectée par un environnement chaud. Les effets négatifs sont encore plus marqués dans un environnement chaud et humide parce que les processus d'évaporation sont limités (Hue 2011; Voltaire et coll. 2002). Bien que les causes exactes ne sont pas bien connues, les explications relatives à l'hyperthermie et/ou de déshydratation ont été proposées. Pendant l'exercice, si le stockage de la chaleur ne peut pas être limité (en raison de l'échec du processus d'évaporation), alors la T<sub>cen</sub> peut induire une limite de l'exercice (Gonzalez-Alonso et coll. 1999b). Le cerveau peut également provoquer une cessation volontaire de l'effort - ou une réduction de l'intensité - pour maintenir l'homéostasie thermique (Noakes 1998). Ainsi la consommation de boissons froides permettant de diminuer le taux d'accumulation de la chaleur pendant un exercice prolongé est donc un moyen simple de lutter contre ce problème (Siegel et Laursen 2012). Il a été montré que le menthol en utilisation par voie orale permet de réduire le NDP central qui est lié à une augmentation de l'hyperventilation, améliorant ainsi la performance de l'exercice (Mundel et Jones 2010). De plus, cette amélioration est encore expliquée par les impacts de la boisson froide et du menthol sur les récepteurs au froid provoquant l'activation de régions du cerveau associées à la récompense, au plaisir et à la motivation (Siegel et Laursen 2012; Siegel et coll. 2011; Mundel et Jones 2010). Cependant, les effets cumulatifs de l'ingestion d'eau froide/glace pilée et de menthol sur la performance de l'exercice aérobie dans la chaleur n'a pas encore été étudiée.

## 1.1. Objets du travail

- Le premier objet de cette thèse était de déterminer l'efficacité des effets cumulatifs de l'eau froide et du menthol sur la performance aérobie en environnement tropical.

- Le deuxième était d'identifier la capacité à renforcer la performance par la combinaison du pré-cooling interne et de per-cooling interne en environnement tropical.

## 1.2. Hypothèses de recherche

- L'ingestion de la glace pilée/menthol ou de l'eau froide/menthol pourraient améliorer la performance d'exercice dans un environnement chaud/humide comparées aux boissons non cumulatives (glace pilée, eau froide, neutre ou boissons au menthol) (**étude 1**).

- L'ingestion de l'eau froide/glace pilée au menthol pourraient étendre la performance d'exercice dans des conditions extérieures où les facteurs environnementaux (vent, rayonnement solaire) sont pris en compte (**étude 2**).

- Une combinaison entre l'ingestion d'eau froide avant l'exercice et de glace pilée/menthol pendant l'exercice pourrait limiter le stress thermique au cours de l'exercice induisant une augmentation encore plus forte de la performance en environnement chaud/humide (**étude 3**).

### 1.3. Listes des publications

Nos travaux ont fait l'objet de trois publications :

**Publication 1 (étude 1):** Riera F, Trong TT, Sinnapah S, Hue O. 2014. "Physical and perceptual cooling with beverages to increase cycle performance in a tropical climate".

*PLoS One* 9(8):e103718

**Publication 2 (étude 2):** Tran Trong T, Riera F, Rinaldi K, Briki W, Hue O. 2015. "Ingestion of a cold temperature/menthol beverage increase outdoor exercise performance in hot, humid environment". *PLoS One* 10(4):e0123815

**Publication 3 (étude 3):** Tran Trong T, Riera F, Rinaldi K, Hue O. "Internal precooling does not enhance the effect of internal percooling with ice slush/L-menthol to improve 30-km cycling performance in hot and humid environment". Soumis Octobre 2015.

## 2. Méthodologie générale

### 2.1. Les sujets

Trente et un cyclistes et triathlètes masculins acclimatés, c'est-à-dire, vivant et s'entraînant en Guadeloupe depuis au moins deux ans (Bae et coll. 2006) ont participé aux études. Les athlètes s'entraînaient au moins 10 heures par semaine (Hue 2011) au moment des études (Caractéristiques anthropométriques et physiologiques des sujets comme indiqué dans le Tableau 1). Les études ont été approuvées par le Comité d'éthique de la formation et la recherche en Sciences et Techniques des Activités Sportives de la Guadeloupe (Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche). Tous les sujets ont rempli un questionnaire de dépistage médical et ont donné leur consentement éclairé avant le déroulement des études, conformément à la Déclaration d'Helsinki.

Tableau 1. Caractéristiques anthropométriques et physiologiques des sujets (moyenne  $\pm$  SD).

Etudes	Total sujets	Age (année)	Poids (kg)	Taille (cm)	VO <sub>2</sub> max (mL.min <sup>-1</sup> .kg <sup>-1</sup> )	Puissance à VO <sub>2</sub> max (Watt)
1	12	42 $\pm$ 13	74 $\pm$ 1	180 $\pm$ 8	60 $\pm$ 10	340 $\pm$ 42
2	10	41 $\pm$ 17	73 $\pm$ 7	179 $\pm$ 9	59 $\pm$ 11	335 $\pm$ 48
3	9	41 $\pm$ 17	73 $\pm$ 7	179 $\pm$ 9	59 $\pm$ 11	335 $\pm$ 48

## 2.2. Les lieux d'expérimentation

Les tests de  $VO_{2max}$ , l'essai de familiarisation (de l'étude 1), les essais expérimentaux des études 1 et 3 ont été réalisés dans le laboratoire du CREPS des Antilles et de la Guyane. Les essais expérimentaux de l'étude 2 se sont déroulés au vélodrome qui est doté d'une piste de 333 m protégée du vent par une enceinte bétonnée.

## 2.3. Les conditions environnementales

La température ambiante ( $T_a$ ) et l'HR étaient enregistrées. Le test de  $VO_{2max}$  a eu lieu dans des conditions neutres ( $23\text{ °C} \pm 0.5\text{ °C}$  et  $60\% \pm 9\%$  d'RH). Les essais de familiarisation (de l'étude 1), des études 1 et 3 ont eu lieu dans des conditions environnementales. Afin d'obtenir des températures et humidités relatives élevées, nous avons fait chauffer la salle avec plusieurs appareils (i.e., chauffage et climatiseur inversés). Pendant les essais, les sujets n'ont pas été soumis à aucun flux d'air ambiant. Les  $T_a$ , HR des essais expérimentaux de l'étude 2 étaient enregistrées au vélodrome. Les données sur les conditions environnementales sont indiquées au tableau 2.

Tableau 2. Caractéristiques des conditions environnementales (moyenne  $\pm$  SD).

	Tests de $VO_{2max}$	Etude 1	Etude 2	Etude 3
Température (°C)	$23 \pm 0.5$	$30.7 \pm 0.8$	$32.5 \pm 1.2$	$29.7 \pm 0.6$
Humidité relative (%)	$60 \pm 9$	$78 \pm 0.03$	$57 \pm 0.5$	$79 \pm 0.9$

## **2.4. Les boissons**

### **2.4.1. Les températures des boissons et élaboration de boisson au menthol**

Les boissons ont été testées à l'une des trois températures : neutre (entre 23.0 °C et 28.7 °C), froide (entre 3.0 °C et 3.1 °C) ou avec de la glace pilée (entre -1.0 °C et 0.17 °C) au menthol ou sans menthol. La glace pilée a été produite avec une machine à glace pilée (Brema, GB 902A, Professional Slush Machine, IceMakers, Germany). La température de chaque boisson a été mesurée avec un thermomètre numérique (YSI 409B, Yellow Springs Instruments, OH, USA).

La concentration des boissons au menthol de 0.025% était préparée par mélange de 0.03 mL d'une solution d'arôme naturel de menthol à 0.01% (% vol: 86.0 ± 1.0%; dosage: 0.50 g.L<sup>-1</sup> produit par Robertet, Grasse, France) diluée dans 100 mL d'eau pure.

Les boissons froides sont conservées au froid dans un réfrigérateur ou une glacière. L'approvisionnement d'eau aux sujets était fait par des tasses (études 1 et 3) ou des bouteilles d'eau en plastique (étude 2).

### **2.4.2. La quantité de boisson**

Dans nos études, la prise de boisson est imposée périodiquement pendant l'exercice (études 1 et 2) ou avant et pendant l'exercice (étude 3) avec la moyenne de ≈ 630 mL.h<sup>-1</sup> (étude 3) et de ≈ 1.000 mL.h<sup>-1</sup> (études 1 et 2).

## **2.5. Test de VO<sub>2max</sub>**

### **2.5.1. Buts**

En amont de l'étude 1, un test maximal aérobie a été réalisé pour tous les sujets. D'une part, l'indice de VO<sub>2max</sub> permet d'identifier la puissance aérobie maximale de nos sujets. D'autre part, les puissances moyennes au premier seuil ventilatoire et au deuxième seuil ventilatoire ont servi pour l'instauration des résistances sur le home-trainer pendant l'échauffement, l'exercice et la récupération dans les études 1 et 3 (voir les détails dans la section 3.2 de cette section).

### **2.5.2. Protocole du test de VO<sub>2max</sub>**

Lors de la première visite des athlètes au laboratoire, le VO<sub>2max</sub> a été mesurée pendant une épreuve d'effort sur une bicyclette ergométrique à frein électromagnétique (TECHMED, TM 4170, Besançon, France). Après un échauffement de 10 minutes à allure libre, le sujet commence un test incrémental. La charge de travail initiale était de 30 W et augmentée de 30 W à chaque minute jusqu'à la fatigue volontaire. Les échanges de gaz ont été mesurés sur l'ensemble du test par un analyseur de gaz (ZAN Ferraris, Cardiorespiratory System, Oberthulba, Allemagne). Le VO<sub>2max</sub> était considérée comme atteinte lorsque deux des critères suivants ont été atteints: (1) le VO<sub>2</sub> atteignait son maximum tandis que l'intensité augmentait, (2) la FC se situait à 10 battements.min<sup>-1</sup> du maximum prédit de (220 – âge), et (3) le ratio d'échange respiratoire (RER) était supérieur à 1.05. Cette épreuve d'effort était supervisée par un médecin.

## **2.6. Les designs expérimentaux**

### **2.6.1. La normalisation des conditions expérimentales**

Tous les essais expérimentaux des études ont eu lieu dans les conditions tropicales de la Guadeloupe, Antilles Françaises. Les essais expérimentaux ont été séparés par 3 à 7 jours et ont été menés dans une étude croisée randomisée.

Les athlètes ont été invités à limiter leurs exercices à 60 minutes d'exercice d'intensité légère la veille de chaque essai. Les jours où les essais se sont déroulés, les athlètes ont consommé un petit déjeuner standard qui comprenait des aliments et 600 mL de boisson. Les essais ont commencé au même moment de la journée (14 h 00 – 16 h 30 dans l'étude 1, 12 h 00 – 15 h 30 dans les études 2 et 3) pour chaque athlète afin de contrôler les variations circadiennes de la Tcen (voir Hue 2011) et la digestion.

Une pré-manipulation a été réalisée dans l'étude 1 pour que tous les sujets puissent être familiarisés avec les protocoles d'essais expérimentaux.

Aux sessions expérimentales, les sujets arrivaient en salle de préparation ou au vélodrome une heure avant le début de l'épreuve. Ils sont pesés, équipés d'une unité de mesure de la FC portable (Suunto Memory Belt) et doivent répondre à un ensemble de questions sur les ST et CT. Au cours des essais, les athlètes portaient un cuissard, un maillot cycliste, chaussettes et chaussures. Ils ont pédalé sur leur propre vélo, fixé sur un home-trainer (Tacx Satori T1856, Tacx BV, Wassenaar, Pays-Bas).

## 2.6.2. Le déroulement des épreuves

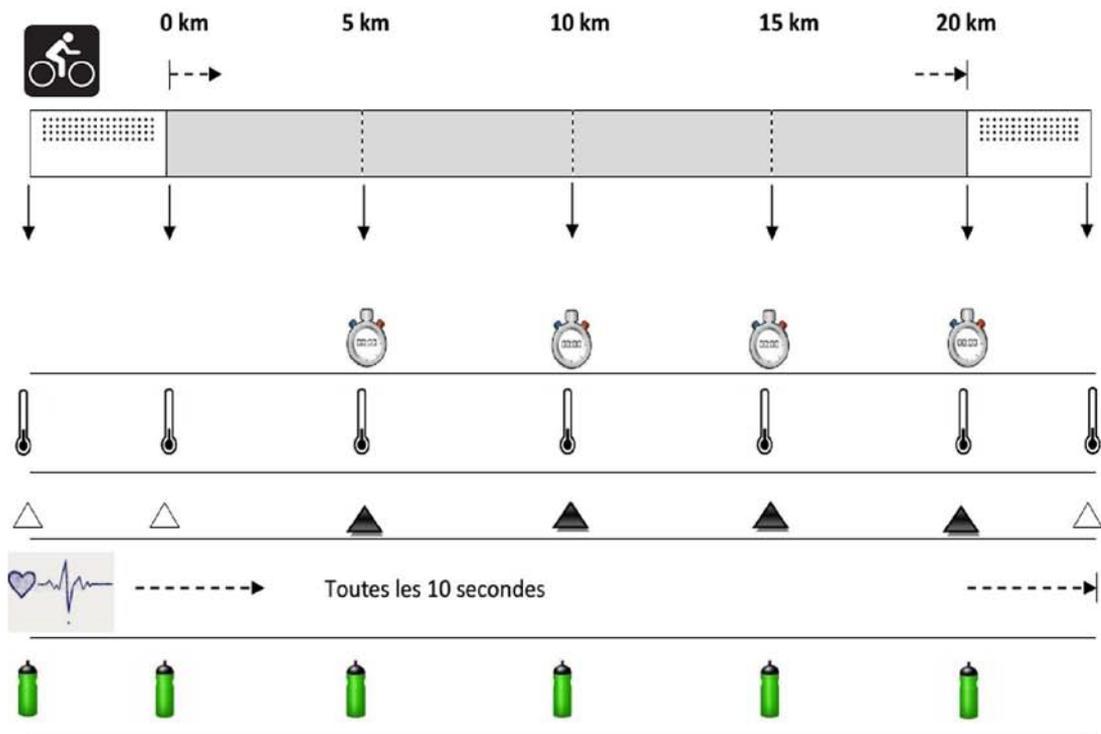
**Etude 1 :** Tester l'hypothèse 1 - L'ingestion de la glace pilée/menthol ou l'eau froide/menthol pourrait améliorer la performance d'exercice dans un environnement chaud/humide comparées aux boissons non cumulatives (glace pilée, eau froide, neutre ou boissons au menthol).

L'essai expérimental comprenait 15 min d'échauffement à une cadence de pédalage librement choisie contre une résistance identique à la puissance moyenne notée au premier seuil ventilatoire (i.e.,  $178 \text{ W} \pm 45 \text{ W}$ ) suivi par 20 km d'exercice à la vitesse la plus rapide possible contre une résistance fixée identique à la puissance moyenne au deuxième seuil ventilatoire (i.e.,  $335 \text{ W} \pm 90 \text{ W}$ ) enfin 15 minutes de récupération au niveau de résistance équivalant à celui de l'échauffement.

Dans l'étude, les athlètes ont été invités à boire dans un ordre randomisé 190 mL d'une des six boissons assignées (eau neutre avec ou sans menthol à  $23 \text{ °C} \pm 0.1 \text{ °C}$ , eau froide avec ou sans menthol à  $3 \text{ °C} \pm 0.6 \text{ °C}$  ou glace pilée avec ou sans menthol à  $-1 \text{ °C} \pm 0.7 \text{ °C}$ ) avant l'échauffement, au début de l'exercice, tous les 5 km de l'exercice et à la fin de l'exercice.

La Tcen, la FC, la ST, le CT, le NDP ont été enregistrés tous les 5 km et à la fin de l'exercice. Le temps d'exécution d'exercice de tous les 5 km et des 20 km a été enregistré.

Shéma 1. Le protocole d'étude.



-  15 min d'échauffement ou de récupération
-  20 km de contre la montre
-  Timing de temps
-  Mesure de la T<sub>cen</sub>
-  Sensation thermique et Confort thermique
-  Sensation thermique, Confort thermique et Niveau de difficulté perçue
-  Fréquence cardiaque
-  190 mL de boisson

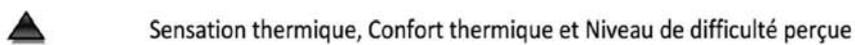
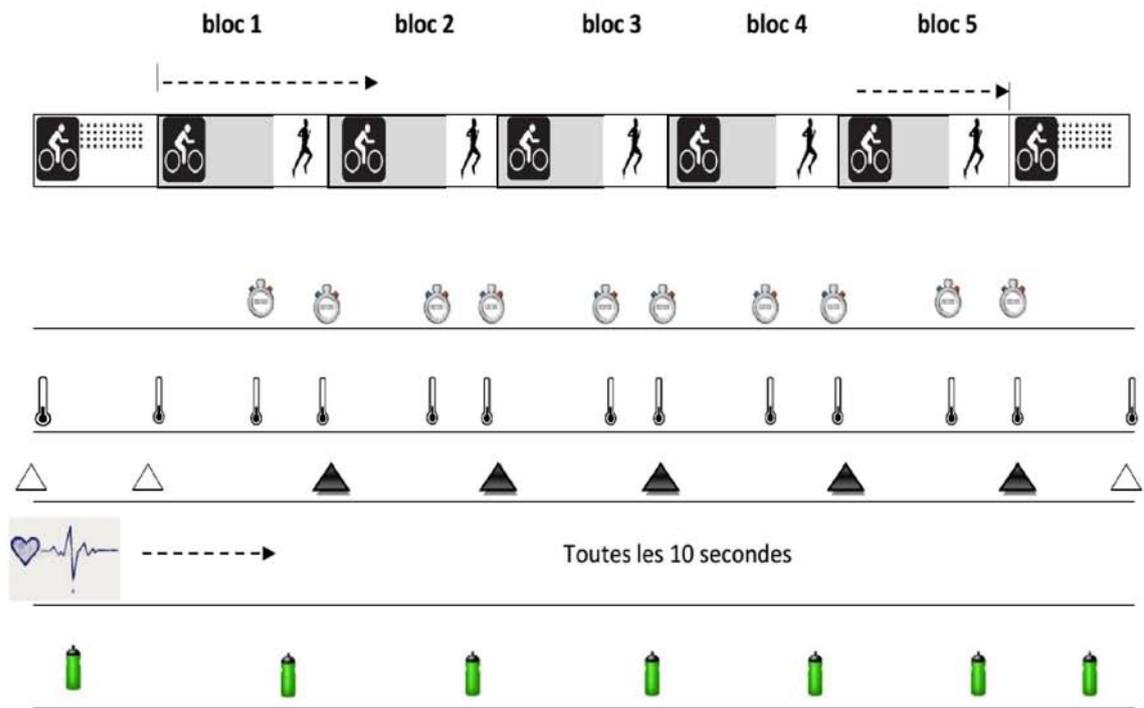
**Etude 2 :** Tester l'hypothèse 2 - L'ingestion de l'eau froide/glace pilée au menthol pourrait étendre la performance d'exercice dans des conditions extérieures où les facteurs environnementaux (vent, rayonnement solaire) sont pris en compte.

L'étude expérimentale comprenait 15 min d'échauffement à cadence libre, suivie par cinq blocs de 4 km de vélo et 1.5 km de course à pied enchaînés à réaliser le plus rapidement possible et 15 minutes de récupération à une cadence libre. Il y avait deux périodes de transition de 60 secondes entre chaque discipline (i.e., le passage du cyclisme à la course à pied et vice versa) mais les blocs étaient enchaînés sans interruption. Les essais expérimentaux se sont déroulés au vélodrome. Le parcours à pied s'est déroulé autour de la piste tandis que le vélo s'est déroulé sur la piste.

Pendant l'exercice expérimental, les athlètes ont été invités à boire dans un ordre randomisé 190 mL d'une des trois boissons assignées (eau neutre au menthol à  $28.7\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ , eau froide au menthol à  $3.1\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 0.6\text{ }^{\circ}\text{C}$  ou glace pilée au menthol à  $0.17\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 0.07\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) au cours de 15 minutes d'échauffement, à la fin du segment de course à pied de chaque bloc (5 blocs) et au cours de 15 minutes de récupération.

La T<sub>cen</sub>, la FC ont été enregistrées avant et après l'échauffement, à la fin de tous les 4 km de cyclisme et tous les 1.5 km de course à pied, et après la phase de récupération. La ST, le CT et le NDP ont été enregistrés à la fin de chaque bloc (à la fin de la course à pied de 1.5 km). Les performances ont été enregistrées tous les 4 km de vélo et 1.5 km de course à pied de chaque bloc.

Schéma 2 : Le protocole d'étude.



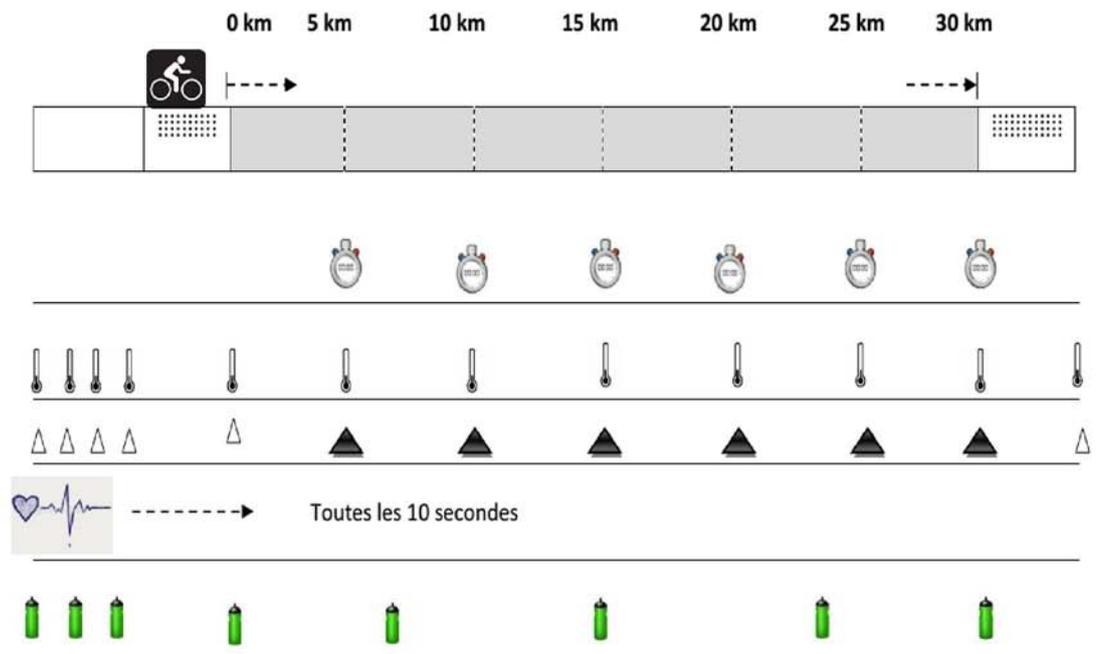
**Etude 3 :** Tester l'hypothèse 3 - Une combinaison entre l'ingestion d'eau froide avant l'exercice et de glace pilée/menthol pendant l'exercice pourrait limiter le stress thermique au cours de l'exercice induisant une augmentation encore plus forte de la performance environnement chaud/humide.

Une étape de précooling de 30 minutes de repos réalisée avant l'exercice pendant laquelle les athlètes buvaient de l'eau neutre ou de l'eau froide au début, 15ème et 30ème minutes. Après cette étape, les sujets ont effectué 15 min d'échauffement à cadence librement choisie contre une résistance fixée identique à la puissance moyenne au premier seuil ventilatoire (i.e.,  $178 \text{ W} \pm 45 \text{ W}$ ), suivie par 30 km réalisés le plus rapidement possible contre une résistance liée à la puissance moyenne au deuxième seuil ventilatoire (i.e.,  $335 \text{ W} \pm 90 \text{ W}$ ) et 10 minutes de récupération au niveau de résistance équivalant à celui de l'échauffement.

En amont, à la 15ème et à 30ème minutes de l'étape de précooling, les sujets ont absorbé un total de  $7 \text{ g.kg}^{-1}$  d'une des deux boissons : eau neutre sans menthol à  $23 \text{ }^{\circ}\text{C}$  (condition NGM) ou eau froide sans menthol (condition FGM) à  $3 \text{ }^{\circ}\text{C}$ . Pendant les exercices expérimentaux, à 0 km, 7.5 km, 15 km, 22.5 km et 30 km de l'exercice expérimental dans les deux conditions (NGM et FGM), les sujets ont absorbé un total de  $7 \text{ g.kg}^{-1}$  de glace pilée au menthol à  $-1 \text{ }^{\circ}\text{C}$ .

La Tcen, la FC, la ST et le CT ont été enregistrés toutes les 10 minutes de la période de précooling et tous les 5 km pendant l'exercice. Le NDP a été enregistré tous les 5 km et immédiatement à la fin de l'exercice. Le temps d'exécution d'exercice de tous les 5 km et de 30 km a été enregistré.

Schéma 3 : Le protocole d'étude.



-  30 minutes de pré-refroidissement
-  10 min d'échauffement ou de récupération
-  30 km de contre la montre
-  Timing de temps
-  Mesure de la T<sub>cen</sub>
-  Sensation thermique et Confort thermique
-  Sensation thermique, Confort thermique et Niveau de difficulté perçue
-  Fréquence cardiaque
-  Boisson

## **2.7. Les mesures**

### **2.7.1. Les paramètres physiologiques**

Les données de la T<sub>cen</sub>, la FC et la perte de masse corporelle permettent d'évaluer les stress thermiques ainsi que les contraintes cardiovasculaires en conditions chaudes et humides (voir Hue 2011).

#### *2.7.1.1. La température centrale*

La T<sub>cen</sub> a été évaluée via la température gastro-intestinale en utilisant les pilules de mesure de température (CorTemp, HQ, Inc., Palmetto, FL, USA). Les athlètes ont été invités à ingérer ces pilules 8-10 h avant tous les essais pour s'assurer que les pilules étaient hors de l'estomac, évitant ainsi la variabilité de la T<sub>cen</sub> en raison du mouvement de pilule ou la consommation de fluide ou de nourriture.

#### *2.7.1.2. La fréquence cardiaque*

La FC a été surveillée en continu en utilisant une unité de télémétrie portable (Suunto Memory Belt, Suunto, Vantaa, Finlande) enregistrant toutes les 5 secondes, et les données ont été analysées avec le logiciel Suunto training manager.

#### *2.7.1.3. L'état d'hydratation*

L'état d'hydratation tout au long des essais expérimentaux a été estimé par des changements dans la masse corporelle nue. Cette méthode est un prédicteur précis et fiable d'un changement de la quantité d'eau totale du corps durant un exercice prolongé dans la chaleur (Baker et coll. 2009). La masse corporelle a été évaluée ( $\pm 0.1$  kg) avant

et après chaque session avec une balance électronique (Tanita SC 330P, Tanita, Amsterdam, Pays-Bas dans les études 1 et 3, Terraillon Pop, France dans l'étude 2).

### **2.7.2. Les paramètres psychologiques**

La ST, le CT et le NDP (niveaux de l'échelle des ST, CT et NDP en détail dans la partie des annexes) ont été enregistrés, car la perception thermique et l'effort physiologique au sein de l'exercice sont connus pour affecter la stratégie de rythme d'exercice et la performance d'exercice (Wegmann et coll. 2012; Cheung 2007).

### **2.7.3. Les performances**

La performance est appréciée par le temps d'exécution d'exercice (20 km et 30 km de vélo dans l'étude 1 et 3, respectivement, et 20 km de vélo plus 4 km de course à pied dans l'étude 2) en fonction du temps global et de chaque bloc.

## **2.8. L'analyse statistique**

Dans l'étude 3, les variables psychologiques et physiologiques (i.e., ST, CT, FC, Tcen) ont été analysées selon les deux phases suivantes: (1) 30 minutes de repos et ingestion de boisson avant l'exercice et (2) 10 minutes d'échauffement et exercice expérimental. L'analyse des données a été réalisée en utilisant le logiciel de statistiques pour les sciences sociales (SPSS, version 19, Chicago, IL, USA).

Dans les trois études (1, 2 et 3), nous avons testé la normalité en utilisant des Tests d'asymétrie et d'aplatissement (Skewness and Kurtosis), avec des valeurs de Z

acceptables n'excédant pas +1 ou -1. Une fois l'hypothèse de normalité confirmée, les tests paramétriques ont été effectués. Les variables suivantes: la Tcen, la performance, la FC, le CT, la ST et le NDP, ont été examinés avec l'analyse de variance (ANOVA) avec des mesures répétées (condition de boisson x température x temps) dans l'étude 1 et (température x temps) dans les études 2 et 3. Les tests post-hoc de Scheffe (étude 1) et de Turkey (étude 2 et 3) ont été utilisés en cas de besoin. Le Test t pour échantillons appariés ont été utilisés pour étudier les différences au moment déterminé entre les conditions expérimentales pour les variables de Tcen, performance, FC, CT, ST et NDP après un effet principal ou une interaction trouvée, et pour étudier les différences de changement de la masse corporelle entre les conditions expérimentales (étude 3). La significativité a été fixée à  $P < 0.05$ . Toutes les données sont présentées sous forme de moyenne  $\pm$  écart-type.

### **3. Travaux**

#### **3.1. Etude 1: Évaluation des effets d'une boisson de glace pilée/menthol ou l'eau froide/menthol sur les réponses psy-physiologiques et la performance d'exercice dans un environnement chaud/humide.**

##### **Introduction**

Un exercice prolongé est affecté négativement par des environnements chauds (Maughan 2010). Les effets négatifs sont encore plus marqués dans un environnement chaud et humide (i.e., un climat dit tropical) parce que les processus d'évaporation sont limités (Hue 2011; Voltaire et coll. 2002). Pendant l'exercice, si la quantité de chaleur

ne peut être évacuée (en raison de l'échec du processus d'évaporation), la T<sub>cen</sub> peut limiter l'exercice (Gonzalez-Alonso et coll. 1999b) ou réduire son intensité pour maintenir l'homéostasie thermique (Noakes 1998).

L'ingestion d'une boisson froide et une administration du menthol par voie orale diminue l'effet délétère de l'hyperthermie sur la performance aérobie. La consommation d'une boisson froide comme l'eau froide ou la glace pilée (Byrne et coll. 2011; Siegel et coll. 2010) atténue l'augmentation de la T<sub>cen</sub> et améliore la performance de l'exercice dans la chaleur (Burdon et coll. 2010b).

Le menthol améliore la respiration, l'excitation, la sensation de froid dans la bouche (Green 1985). Récemment, Mundel et Jones (2010) ont montré que le rinçage périodique du menthol a conduit à une hyperventilation, à une réduction du NDP centrale et par conséquent, a augmenté la capacité d'endurance dans un environnement chaud et humide.

Cependant, les effets cumulatifs de l'ingestion d'eau froide ou de glace pilée et le menthol sur la performance dans l'environnement chaud et humide n'ont pas encore été étudiés. Nous testons donc, dans le premier travail, l'hypothèse que la glace pilée/menthol ou la boisson froide/menthol améliorerait les performances en milieu chaud comparée aux boissons non cumulatives (glace pilée, eau froide, neutre ou boissons au menthol).

## **Protocole**

Rappel: Les athlètes ont pédalé 20 km contre-la-montre pendant lequel ils ont bu 190 mL d'une des six boissons assignées au randomisé (eau neutre avec ou sans menthol à 23 °C ± 0.1 °C, eau froide avec ou sans menthol à 3 °C ± 0.6 °C ou glace

pilée avec ou sans menthol à  $-1\text{ °C} \pm 0.7\text{ °C}$ ) avant l'échauffement, au début de l'exercice, tous les 5 km et à la fin de l'exercice. La Tcen, la FC, la ST, le CT, le NDP et la performance en temps d'exécution ont été enregistrés.

## Résultats

### *Performance*

Les effets principaux sur la performance moyenne sont l'arôme et la température de boisson. La performance moyenne était affectée par l'arôme ( $2130\text{ s} \pm 246\text{ s}$  et  $2250\text{ s} \pm 288\text{ s}$ , menthol et non-menthol, respectivement,  $P < 0.02$ ) (figure 3.1) et la température de boisson ( $P < 0.02$ ), avec une différence significative ( $P < 0.002$ ) entre l'eau neutre ( $2253\text{ s} \pm 240\text{ s}$ ) et la glace pilée ( $2100\text{ s} \pm 280\text{ s}$ ) (figure 3.2).

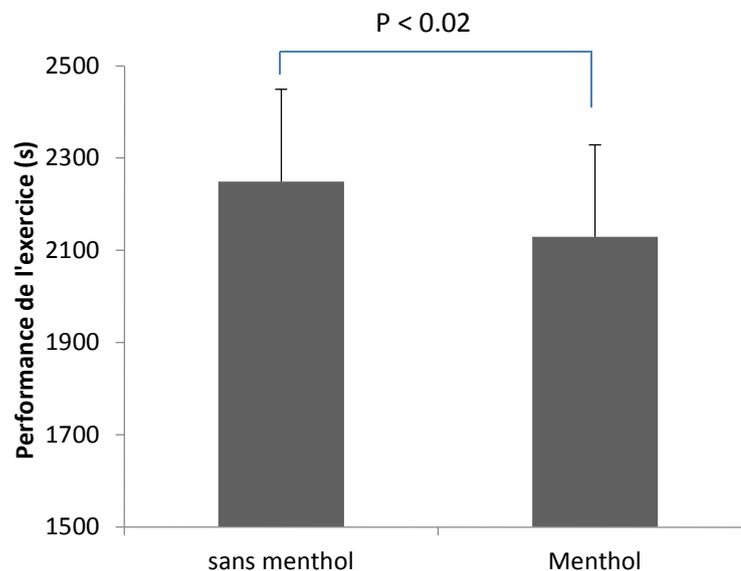


Figure 3.1. Performance (en seconde) pour 20 km de pédalage lors de l'ingestion des boissons sans menthol et avec menthol. Les valeurs moyennes et SD sont présentés.

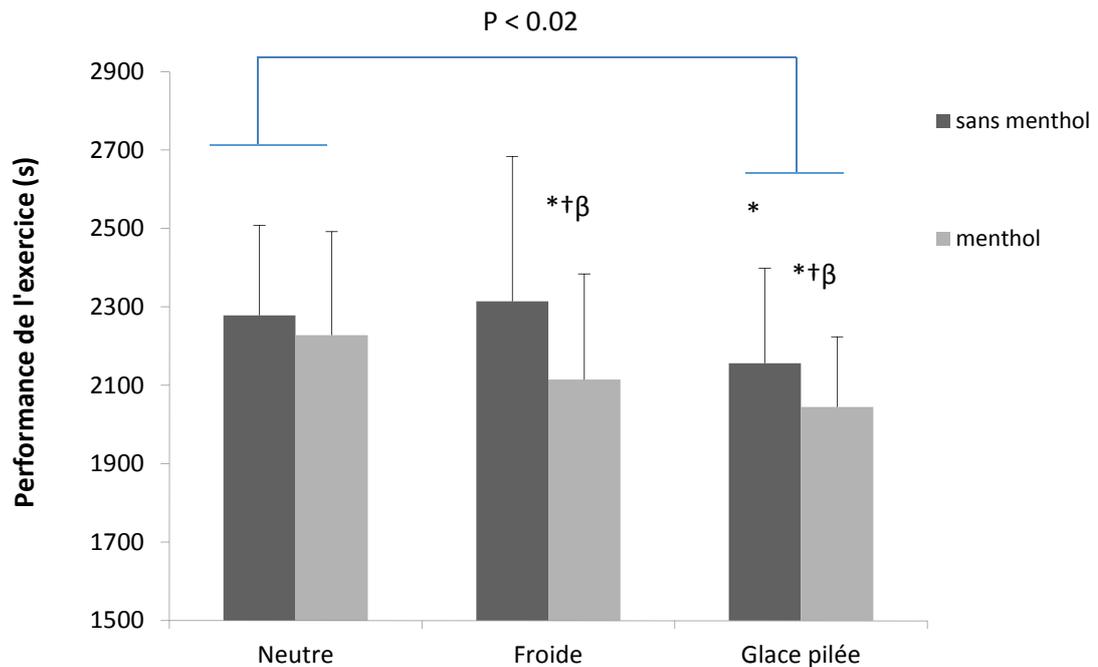


Figure 3.2. Performance d'exercice (en seconde) pour 20 km de pédalage lors de l'ingestion d'eau neutres, froide et glace pilée avec ou sans menthol. Les valeurs moyennes et SD sont présentés. \* dénote une différence significative par rapport à l'eau neutre sans menthol ( $P < 0.01$ ), † dénote une différence significative par rapport à l'eau neutre/menthol ( $P < 0.01$ ) et  $\beta$  dénote une différence significative par rapport à l'eau froide/menthol ( $P < 0.01$ ).

L'analyse post hoc a démontré une meilleure performance pour l'eau froide/menthol et de glace pilée/menthol vs l'eau neutre sans menthol ( $P < 0.05$  et  $P < 0.03$ , respectivement), vs l'eau neutre/menthol ( $P < 0.05$  et  $P < 0.007$ , respectivement) et vs l'eau froide sans menthol ( $P < 0.003$  et  $P < 0.007$ , respectivement) (figure 3.2). Lorsqu'elle est analysée par 5 km, la performance qui était significativement meilleure dans la condition menthol ( $P < 0.04$ ), a été affecté à la fois par le temps ( $P < 0.02$ ) et la température ( $P < 0.005$ ) avec des résultats significativement meilleurs dans la condition de glace pilée vs condition neutre ( $P < 0.003$ ). La performance a été affectée

significativement par l'arôme x le temps ( $P < 0.01$ ): la performance a diminué avec le temps, sauf dans la condition d'eau froide/menthol et la condition de glace pilée/menthol.

### Température centrale

Il n'y avait pas de différence significative dans la Tcen moyenne dans les six sessions expérimentales avant l'exercice ( $37.3 \text{ °C} \pm 0.1 \text{ °C}$ ), à l'échauffement ( $37.5 \text{ °C} \pm 0.1 \text{ °C}$ ) ou à la récupération ( $39.1 \text{ °C} \pm 0.3 \text{ °C}$ ) (figure 3.3). Il n'y avait pas d'effet de l'arôme ou de la température sur la Tcen, mais il y avait une tendance ( $P = 0.07$ ) pour un effet de la température x le temps, avec la Tcen augmentant moins dans la condition de glace pilée (i.e., avec et sans menthol) par rapport à l'eau neutre (i.e., avec et sans menthol).

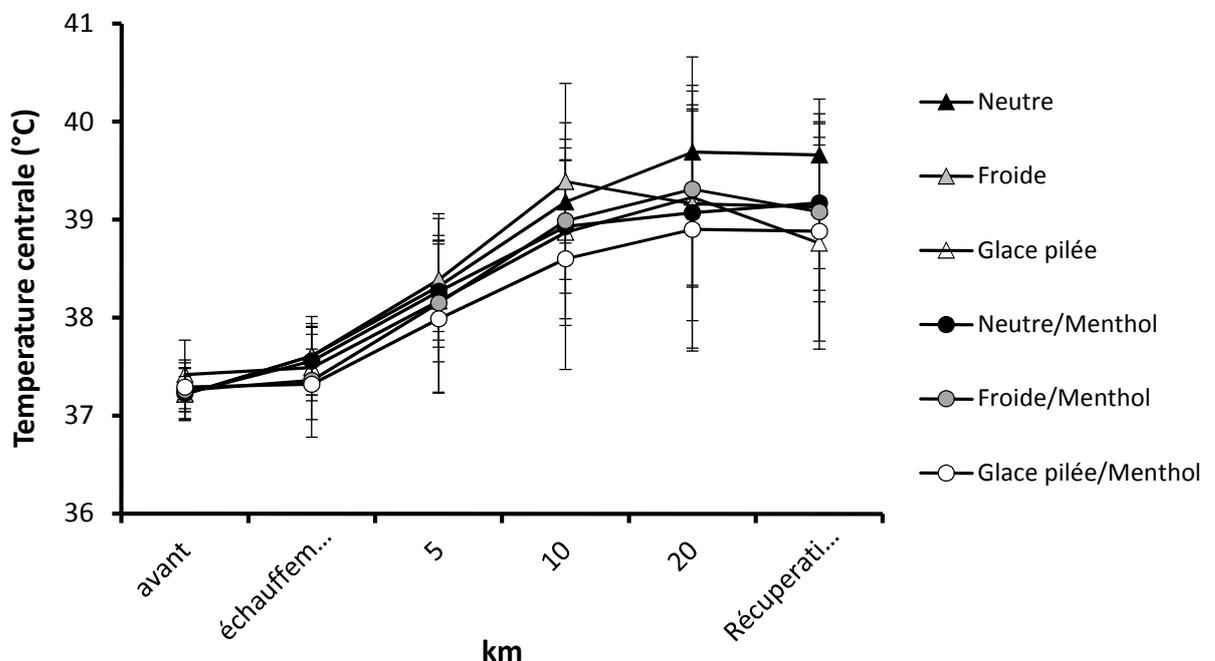


Figure 3.3. Tcen (°C) avant et après l'échauffement; à 5 km, 10 km, 15 km et 20 km; et pendant la récupération. Les valeurs moyennes et SD sont présentés.

Lorsque le delta de la Tcen (i.e., l'augmentation de la Tcen avec le temps) a été analysé, il a montré une tendance pour un effet de la température de la boisson ( $P < 0.06$ ) avec un delta de la Tcen plus faible pour la condition glace pilée vs l'eau neutre ( $P < 0.05$ ). En outre, un effet significatif de l'arôme x la température x le temps a été noté ( $P < 0.02$ ) pour le delta de la Tcen, avec le delta de la Tcen étaient inférieur à la fin de l'exercice dans les conditions de menthol (i.e., eau neutre, eau froide et glace pilée) et de glace pilée sans menthol par rapport à l'eau neutre sans menthol.

### Fréquence cardiaque

La FC a augmenté de manière significative de l'échauffement jusqu'à la fin de l'exercice (20 km), puis a diminué de façon identique dans les six conditions (un effet du temps,  $P < 0.001$ ). La FC a été significativement affecté par l'arôme x le temps ( $P = 0.049$ ) (figure 3.4).

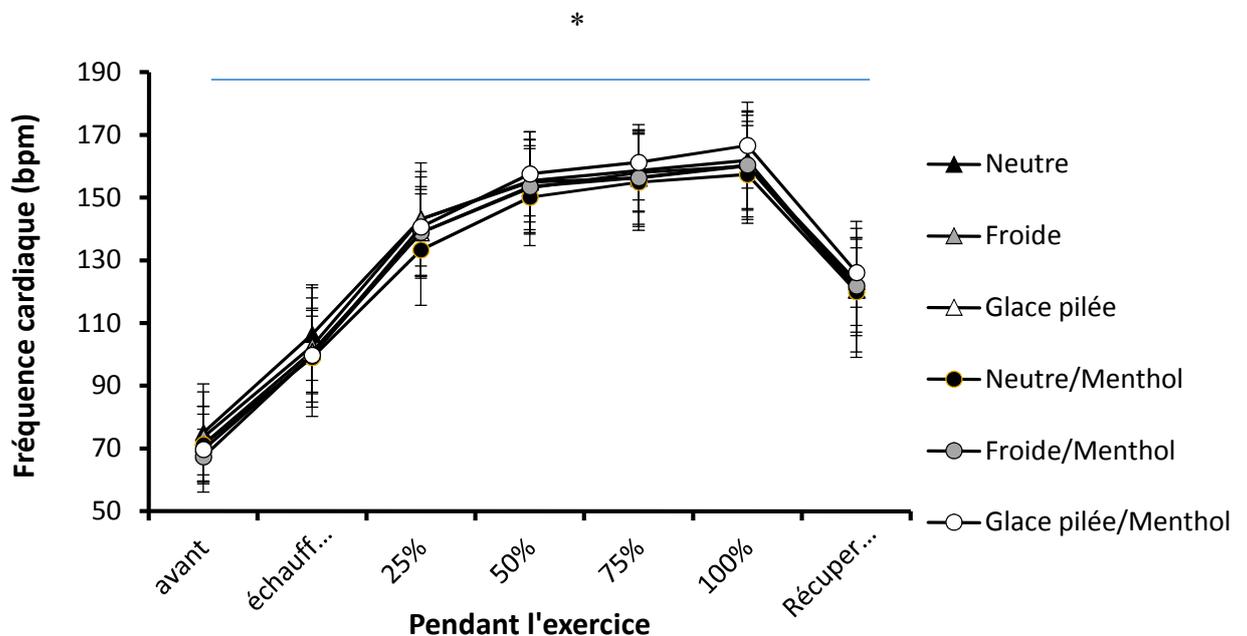


Figure 3.4. FC (batement.min<sup>-1</sup>) avant et pendant l'échauffement; à 25%, 50%, 75% et 100% du temps d'exercice; et pendant la récupération. Les valeurs moyennes et SD sont présentées. \* dénote une interaction de l'arôme x le temps ( $P = 0.049$ ).

### *Sensation thermique, confort thermique et niveau de difficulté perçu*

Il n'y avait pas de différence significative dans les ST, CT ou NDP, chacun augmentant avec le temps. La ST a été significativement affectée par l'arôme x le temps (à la fin de l'exercice; no-menthol:  $3.5 \pm 0.5$ ; menthol:  $3.7 \pm 0.3$ ,  $P < 0.02$ ) (figure 3.5).

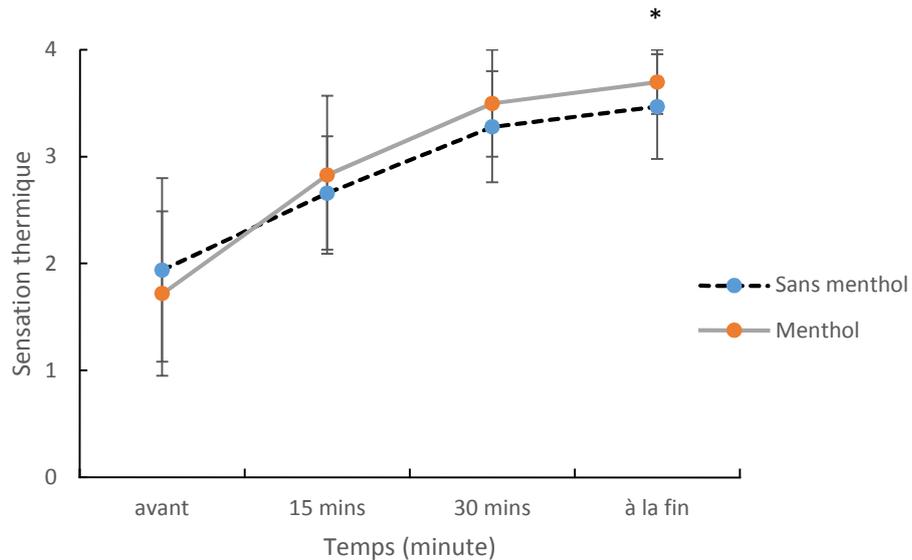


Figure 3.5. Sensation thermique avant et pendant et à la fin de l'exercice dans deux arômes. \* dénote une différence significativement ( $P = 0.011$ ).

### *Poids corporel*

Il n'y avait pas de différence du poids corporel moyen des athlètes avant ( $72.0 \text{ kg} \pm 3.2 \text{ kg}$ ,  $P > 0.05$ ) et après les essais ( $70.6 \text{ kg} \pm 0.3 \text{ kg}$ ,  $P > 0.05$ ).

### **3.2. Etude 2: Evaluation des effets de l'ingestion de l'eau froide/glace pilée au menthol sur la performance d'exercice en condition écologique.**

#### **Introduction**

Notre première étude a indiqué que les boissons froides au menthol (eau froide ou glace pilée) ont augmenté la performance de 20 km de vélo. Toutefois, cette étude a été effectuée dans un laboratoire où plusieurs facteurs environnementaux ne pourront être pris en compte. Par exemple, sous la lumière du soleil, le corps reçoit la chaleur rayonnante directement, ce qui peut augmenter la température de la peau (Brotherhood 2008; Hodder et Parsons 2007), la sensation thermique (Hodder et Parsons 2007) et réduire le gradient de température entre la peau et la température centrale donc accélérer la vitesse de stockage de chaleur et réduire la puissance d'exercice (Tucker et coll. 2006). En outre, la régulation thermique est également affectée par convection (en fonction de la vitesse du vent) (Teunissen et coll. 2013; Saunders et coll. 2005; Adam et coll. 1992). Elle peut influencer positivement pour les performances d'endurance par une diminution du stress thermique (Saunders et coll. 2005) mais aussi influencer positivement sur le stimulus « froid » au niveau de la bouche en condition menthol lors de la respiration. Ainsi, les études avec des exercices réalisées dans des conditions extérieures sont particulièrement importantes pour comprendre comment les réponses physiologiques sont affectées (Dugas 2010) et confirmer les résultats obtenus en laboratoire.

Le second travail de cette thèse a donc été de déterminer si les effets positifs de l'ingestion d'eau froide/glace pilée au menthol observés en laboratoire peuvent s'étendre à d'autres sports (cyclisme et course à pied) ou des exercices

pluridisciplinaires (duathlon) dans des conditions extérieures, c'est à dire les conditions réelles des compétitions.

## **Protocole**

Rappel : L'étude expérimentale comprenait 15 min d'échauffement, suivie par cinq blocs de 4 km de vélo et 1.5 km de course à pied enchaînée à réaliser et 15 minutes de récupération. Pendant l'essai, les athlètes ont bu 190 mL d'une des trois boissons au menthol à la concentration de 0.025% (eau neutre à  $28.7\text{ °C} \pm 0.5\text{ °C}$ , eau froide à  $3.1\text{ °C} \pm 0.6\text{ °C}$  ou glace pilée à  $0.17\text{ °C} \pm 0.07\text{ °C}$ ) au cours de 15 minutes d'échauffement, à la fin du segment de course à pied de chaque bloc et au cours de 15 minutes de récupération.

La Tcen, la FC, la ST, le CT, le NDP et la performance en temps ont été enregistrées.

## **Résultats**

### ***Performance***

La performance globale a été affectée par la température de boisson ( $P < 0.03$ ), la performance avec la glace pilée ( $4289\text{ s} \pm 190\text{ s}$ ) est significativement meilleure qu'avec l'eau froide ( $4436\text{ s} \pm 171\text{ s}$ ,  $P < 0.002$ ) ou l'eau neutre ( $4572\text{ s} \pm 423\text{ s}$ ,  $P < 0.04$ ) (figure 3.6). La performance globale a également été affectée par le temps ( $P < 0.02$ ) et l'interaction du temps x températures de boisson ( $P < 0.007$ ).

Lorsque la performance est exprimée par bloc (cyclisme et course à pied), elle a été significativement affectée par la température de boisson ( $P < 0.004$ ), avec la glace

pilée ( $858 \text{ s} \pm 7 \text{ s}$ ) supérieure à l'eau froide ( $887 \text{ s} \pm 32 \text{ s}$ ,  $P < 0.007$ ) et l'eau neutre ( $914 \text{ s} \pm 92 \text{ s}$ ,  $P < 0.008$ ). La performance par bloc a été également affectée par le temps ( $P < 0.007$ ): la performance a diminué vers la fin de l'exercice dans les conditions neutre et froide; et par l'interaction du temps x températures de boisson ( $P < 0.004$ ): la performance a été meilleure avec la glace pilée par rapport à l'eau froide et l'eau neutre aux blocs 4 et 5.

Nous n'avons pas noté d'interaction du type d'exercice (i.e., cyclisme ou course à pied) x la condition de boisson ( $P > 0.05$ ), mais les deux types d'exercice ont été affectés par l'interaction du temps x la température de boisson (i.e.,  $P < 0.004$  et  $P < 0.03$  pour le cyclisme et la course à pied, figure 3.7 et figure 3.8, respectivement): la performance a diminué vers la fin de l'exercice. Le temps moyen avec la glace pilée était meilleur que l'eau neutre en cyclisme ( $429 \text{ s} \pm 5 \text{ s}$  vs  $455 \text{ s} \pm 22 \text{ s}$ , respectivement,  $P < 0.05$ ) et que l'eau froide en course à pied (i.e.,  $430 \text{ s} \pm 7 \text{ s}$  vs  $450 \text{ s} \pm 18 \text{ s}$ , respectivement,  $P < 0.006$ )

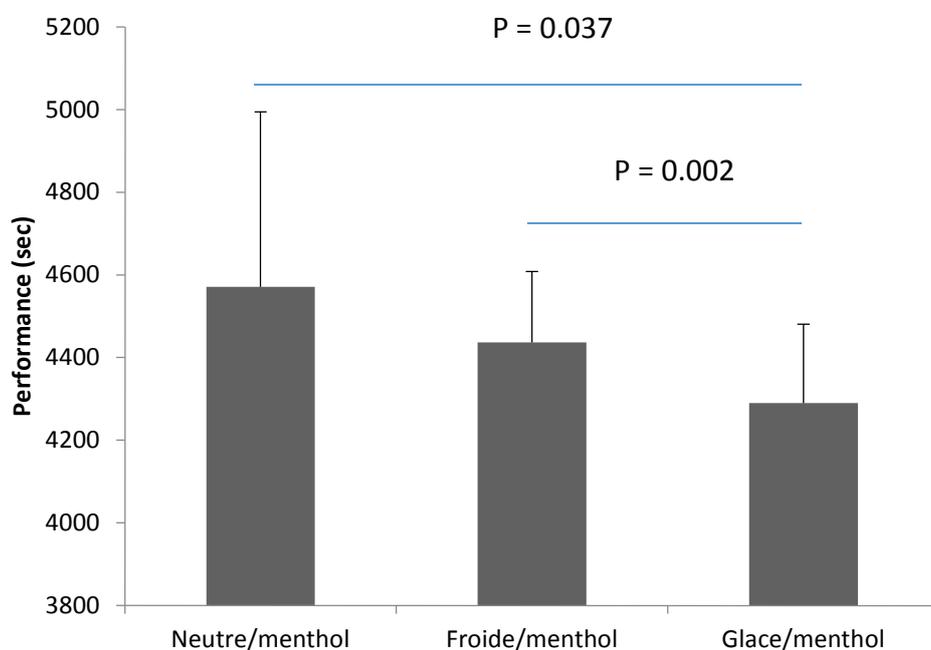


Figure 3.6. Performance d'exercice (en secondes) lors de l'absorption d'eau neutre/menthol, d'eau froide/menthol et de glace pilée/menthol. Les valeurs moyennes et SD sont présentés.

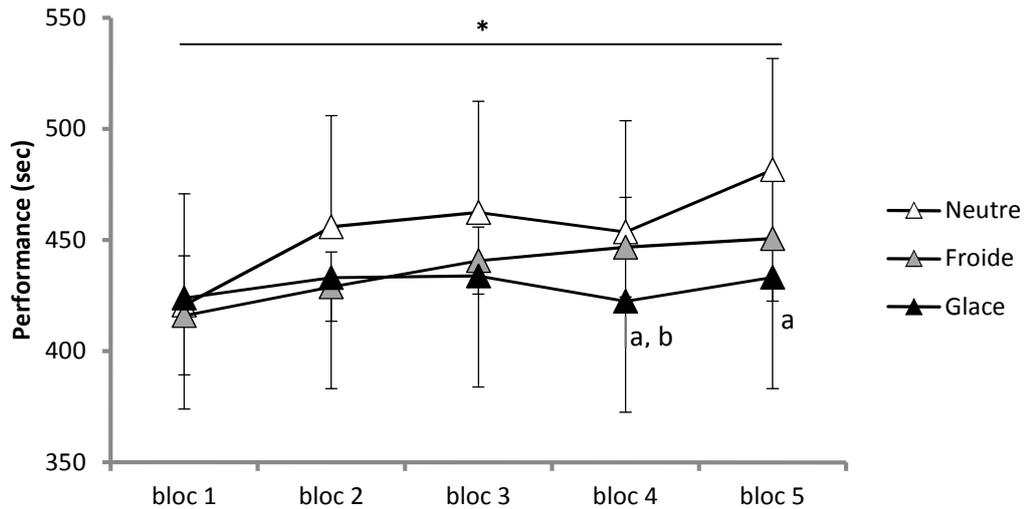


Figure 3.7. Performance (en secondes) en cyclisme lors de l'absorption d'eau neutre, d'eau froide et de glace pilée. \* dénote l'interaction du temps x la température de boisson ( $P < 0.004$ ). <sup>a</sup> dénote une différence significative par rapport à l'eau neutre ( $P < 0.02$ ), <sup>b</sup> dénote une différence significative par rapport à l'eau froide ( $P < 0.02$ ). Les valeurs moyennes et SD sont présentés.

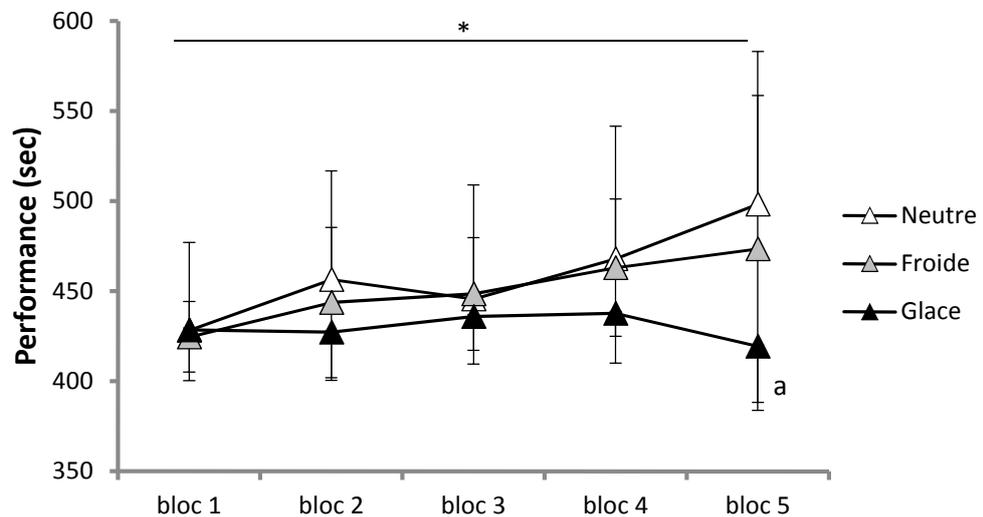


Figure 3.8. Performance (en secondes) en course à pied lors de l'absorption d'eau neutre/menthol, d'eau froide/menthol et de glace pilée/menthol. \* dénote l'interaction du temps x la température de boisson ( $P < 0.03$ ). <sup>a</sup> dénote une différence significative par rapport à l'eau neutre ( $P = 0.01$ ). Les valeurs moyennes et SD sont présentés.

## Température centrale

Il n'y avait pas de différence significative de la Tcen entre les essais avant l'exercice (pour l'eau neutre :  $36.9\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ , l'eau froide:  $37.3\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ , la glace pilée:  $37.3\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 0.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $P > 0.05$ ). Pendant les essais, la Tcen a augmenté au fil du temps ( $P < 0.0001$ ), sans différence significative entre les essais ( $P > 0.05$ ) (figure 3.9). Il n'y avait pas de différence significative de la Tcen pour le cyclisme, la course à pied ou les blocs entre les essais ( $P > 0.05$ ). Cependant, la Tcen a été significativement affectée par le temps dans les essais ( $P < 0.0001$ ).

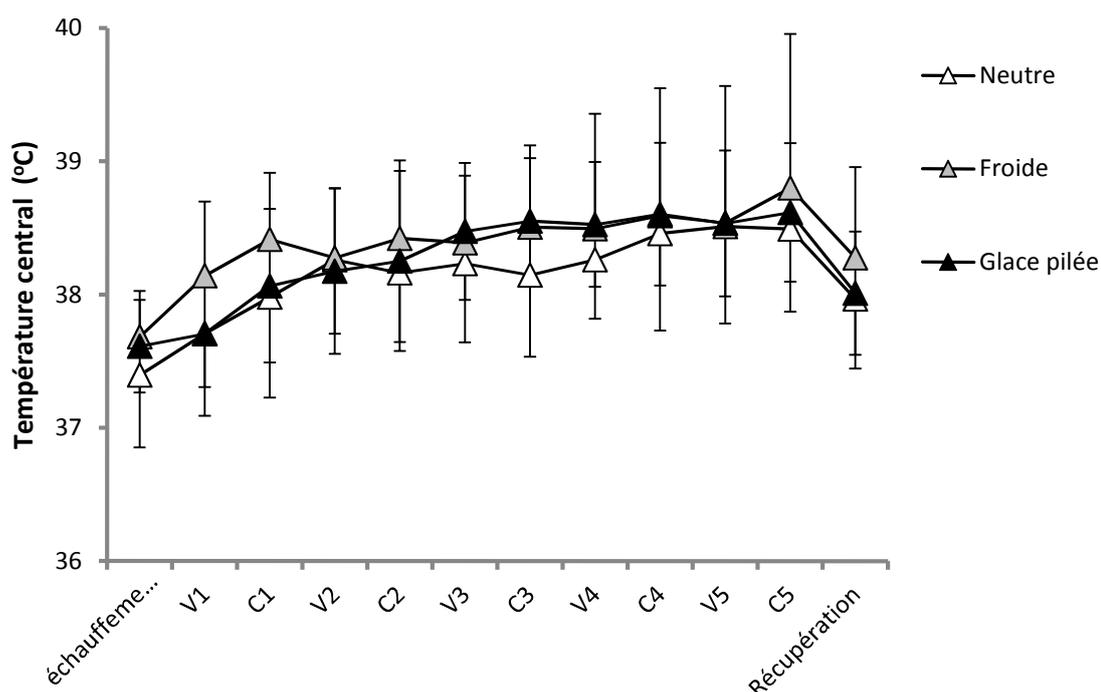


Figure 3.9. Tcen ( $^{\circ}\text{C}$ ) pendant l'échauffement, l'exercice et la récupération lors de l'absorption d'eau neutre/menthol, d'eau froide/menthol et de glace pilée/menthol. A l'axe horizontal, V note la pédalage et C note la course-a-pied des blocs. Les valeurs moyennes et SD sont présentés.

### Fréquence cardiaque

La FC a augmenté de manière significative au cours des essais, de l'échauffement jusqu'à la fin de l'exercice ( $P < 0.0001$ ), mais il n'y avait pas de différence significative de la FC entre les essais ( $P > 0.05$ ) (figure 3.10). Il n'y avait pas de différence significative de la FC pour le cyclisme, la course à pied ou les blocs entre les essais ( $P > 0.05$ ). Toutefois, la FC a été significativement affectée par le temps ( $P < 0.0001$ ).

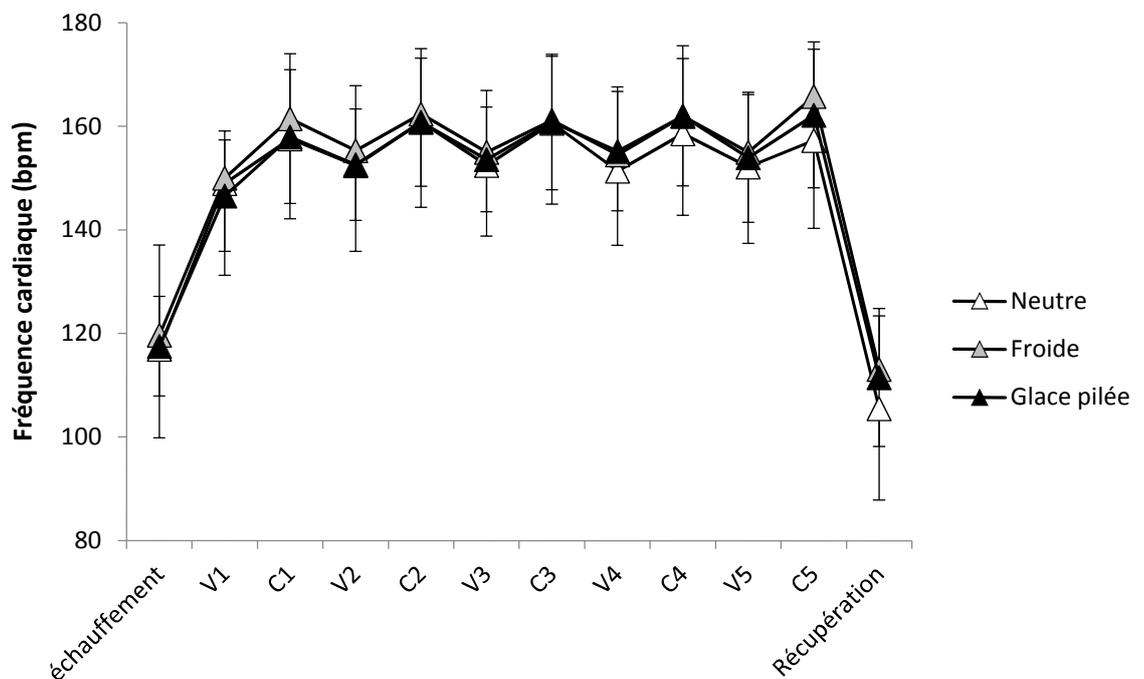


Figure 3.10. FC (battement.min<sup>-1</sup>) pendant l'échauffement, l'exercice et la récupération lors de l'absorption d'eau neutre/menthol, d'eau froide/menthol et de glace pilée/menthol. A l'axe horizontal, V note la pédalage et C note la course-a-pied des blocs. Les valeurs moyennes et SD sont présentés.

### ***Sensation thermique, confort thermique et niveau de difficulté perçu***

La ST était significativement inférieure avec la glace pilée ( $3.5 \pm 0.8$ ) et l'eau froide ( $3.4 \pm 1.0$ ) que l'eau neutre ( $4.0 \pm 1.2$ ) ( $P < 0.05$  et  $P < 0.02$ , respectivement). Il n'y avait pas de différence significative dans le CT (pour l'eau neutre:  $2.3 \pm 0.9$ , l'eau froide:  $2.1 \pm 0.8$ , la glace pilée:  $2.0 \pm 0.8$ ,  $P > 0.05$ ) ou le NDP ( $P > 0.05$ ), tous augmentant continuellement avec le temps ( $P < 0.0001$ ).

### ***Poids corporel perdu***

Il n'y avait pas de différence du poids corporel perdu entre les conditions (pour l'eau neutre:  $2.3 \text{ kg} \pm 0.9 \text{ kg}$ , l'eau froide:  $2.2 \text{ kg} \pm 1.3 \text{ kg}$  et la glace pilée:  $2.2 \text{ kg} \pm 0.7 \text{ kg}$ ,  $P > 0.05$ ).

### **3.3. Etude 3: Evaluation des effets d'une combinaison entre le précooling interne et le percooling interne sur la performance d'exercice dans un environnement chaud/humide.**

#### **Introduction**

L'ingestion d'eau froide ou de glace pilée comme technique de refroidissement interne peut être appliquée avant (pré-refroidissement interne) ou pendant l'exercice (refroidissement interne). Tous les deux s'ont indiqués comme stratégie pour réduire le stockage de la chaleur dans le corps, améliorant ainsi la performance d'endurance dans

des environnements chauds (Riera et coll. 2014; Stevens et coll. 2013; Yeo et coll. 2012; Ihsan et coll. 2010). Une quantité importante d'énergie absorbée par l'eau froide ou la glace pilée conduit à une réduction de  $T_{cen}$  dans la phase de repos avant l'exercice (Siegel et coll. 2010) ou permet d'atténuer l'augmentation de la  $T_{cen}$ , causée par la production de chaleur métabolique au cours d'un exercice d'intensité croissante (Riera et coll. 2014). Bongers et coll. (2015) ont émis l'hypothèse que la combinaison de refroidissement avant et de refroidissement pendant l'exercice peut être plus efficace pour l'amélioration de la performance qu'une stratégie de refroidissement unique. Nos premières et deuxièmes études ont montré que le percooling interne avec de la glace pilée au menthol semblait être la combinaison la mieux à même d'augmenter la performance pendant l'exercice. Après ces résultats, une troisième étude a été menée pour vérifier si la performance d'exercice était améliorée par une combinaison du pré-refroidissement interne et du refroidissement interne.

## **Protocole**

Rappel: Une étape de précooling de 30 minutes de repos est réalisée avant l'exercice pendant laquelle les athlètes ont bu un total de  $7 \text{ g.kg}^{-1}$  de l'eau neutre sans menthol à  $23 \text{ }^{\circ}\text{C}$  (condition de NGM) ou de l'eau froide sans menthol à  $3 \text{ }^{\circ}\text{C}$  (condition de FGM) au début, 15 et 30 minutes. Puis, les sujets ont effectué 10 min d'échauffement, suivie par 30 km de pédalage en contre la montre et 10 minutes de récupération. Pendant 30 km de contre-la-montre des deux conditions (NGM et FGM), les sujets ont absorbé un total de  $7 \text{ g.kg}^{-1}$  de glace pilée au menthol à  $-1 \text{ }^{\circ}\text{C}$  à 0 km, 7.5 km, 15 km, 22.5 km et 30 km de l'exercice. La  $T_{cen}$ , la FC, la ST, le CT, le NDP et la performance en temps ont été enregistrés.

## Résultats

### *Performance*

La performance globale n'a pas été affectée par la condition ( $P > 0.05$ ), avec la performance de condition de NGM (neutre-glace/menthol) ( $3737 \text{ s} \pm 552 \text{ s}$ ) et de FGM (froide-glace/menthol) ( $3815 \text{ s} \pm 455 \text{ s}$ ) (figure 3.11). Lorsque la performance est exprimée par bloc (5km), la performance moyenne n'est pas affectée par la condition ( $P > 0.05$ ), avec NGM ( $624 \text{ s} \pm 56 \text{ s}$ ) et FGM ( $650 \text{ s} \pm 70 \text{ s}$ ). La performance par bloc a été affectée par le temps ( $P < 0.0001$ ): la performance dans les deux conditions a diminué avec le temps.

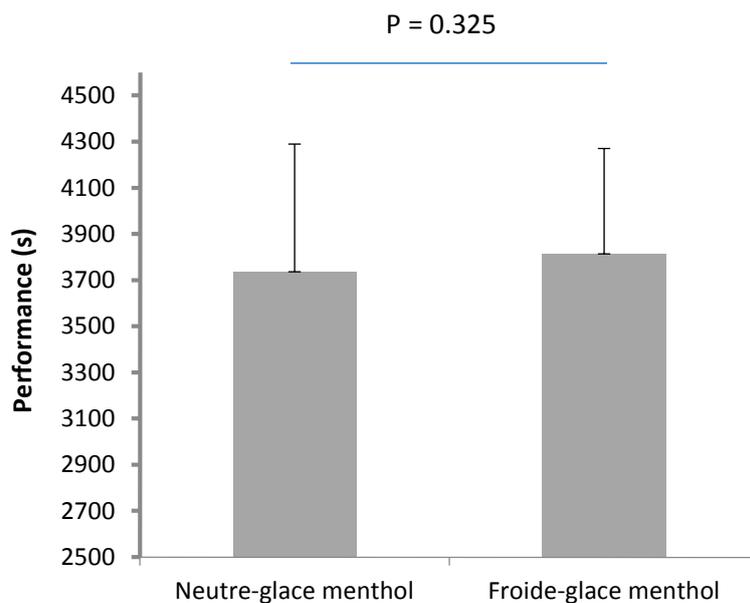


Figure 3.11. Performance d'exercice (en seconds) dans deux conditions. Les valeurs moyennes et SD sont présentés.

### *Température centrale*

Il n'y avait pas de différence significative ( $P > 0.05$ ) dans la Tcen avant 30 min de période de précooling (la Tcen moyenne pour les deux conditions:  $37.3 \text{ °C} \pm 0.3 \text{ °C}$ ). La Tcen a réduit de  $0.3 \text{ °C}$  ( $37.0 \text{ °C} \pm 0.3 \text{ °C}$ ,  $P < 0.02$ ) après 30 min de précooling avec l'ingestion d'eau froide, mais la Tcen n'a pas changé ( $37.3 \text{ °C} \pm 0.31 \text{ °C}$ ,  $P > 0.05$ ) avec l'ingestion d'eau neutre. Pendant les 30 km de pédalage, la Tcen a augmenté au cours du temps ( $P < 0.0001$ ), mais sans différence entre les deux conditions ( $P > 0.05$ ) (figure 3.12).

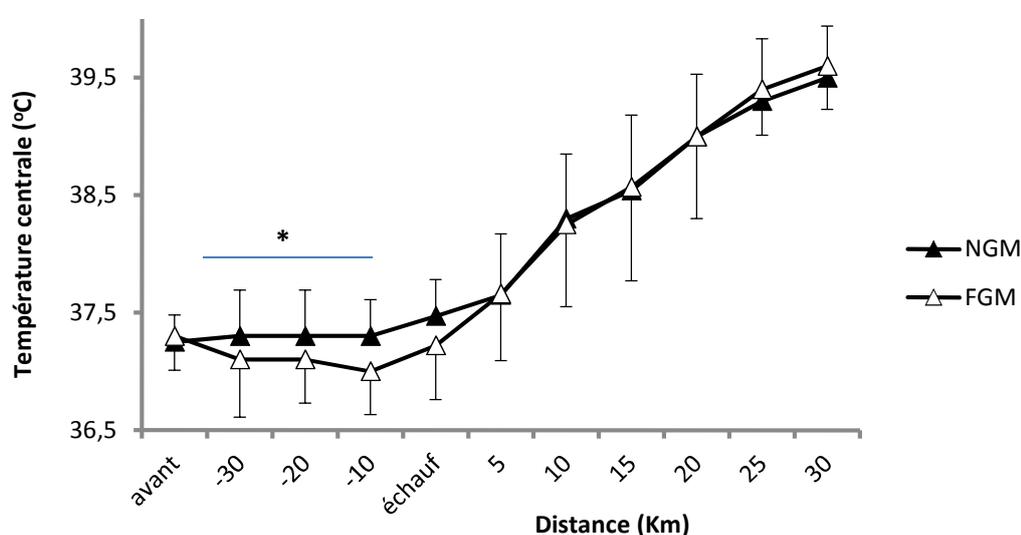


Figure 3.12. Tcen pendant la période de précooling, l'échauffement et l'exercice dans les deux conditions. Les valeurs moyennes et SD sont présentés. \* différence significative entre les deux conditions ( $P < 0.05$ ).

### *Fréquence cardiaque*

Il n'y avait pas de différence significative dans la FC entre deux conditions pendant les 30 min de précooling ( $P > 0.05$ ) et pendant l'exercice ( $P > 0.05$ ). La FC a augmenté de l'échauffement jusqu'à la fin de l'exercice ( $P < 0.0001$ ) (figure 3.13).

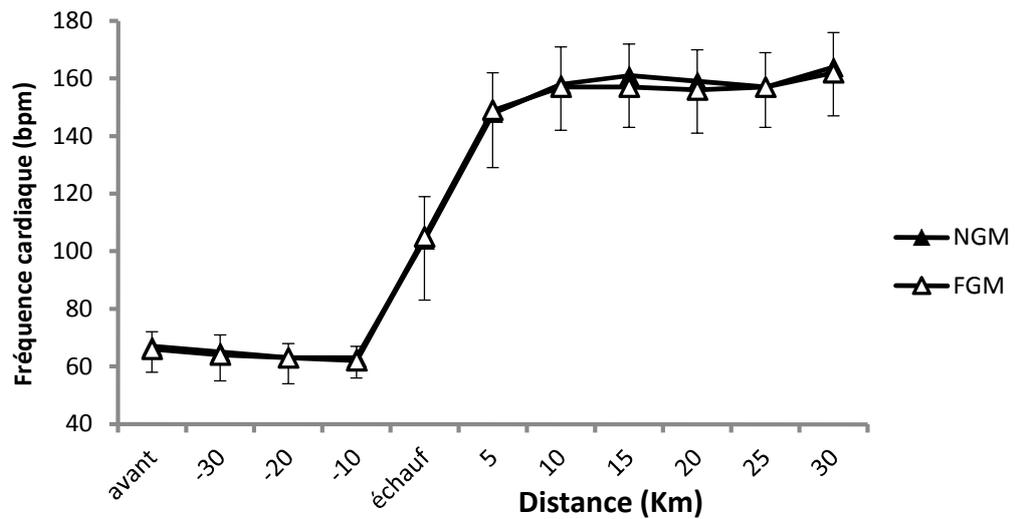


Figure 3.13. FC (batttement.min<sup>-1</sup>) pendant la période de précooling, l'échauffement et l'exercice dans deux conditions. Les valeurs moyennes et SD sont présentés.

### *Sensation thermique, confort thermique et niveau de difficulté perçu*

Il n'y avait pas de différence dans la ST, le CT entre deux conditions pendant 30 min de précooling ( $P > 0.05$ ) et pendant l'exercice ( $P = 0.692$ ). Il n'y avait pas de différence ( $P > 0.05$ ) dans le NDP entre les deux conditions, mais le NDP était affecté par l'interaction du temps x condition ( $P = 0.01$ ), avec le NDP dans la condition de FGM inférieure à la condition NGM à 30 km ( $P = 0.047$ ) (figure 3.14). Tous les trois ST, CT et NDP ont augmenté au cours de l'exercice ( $P < 0.001$ ).

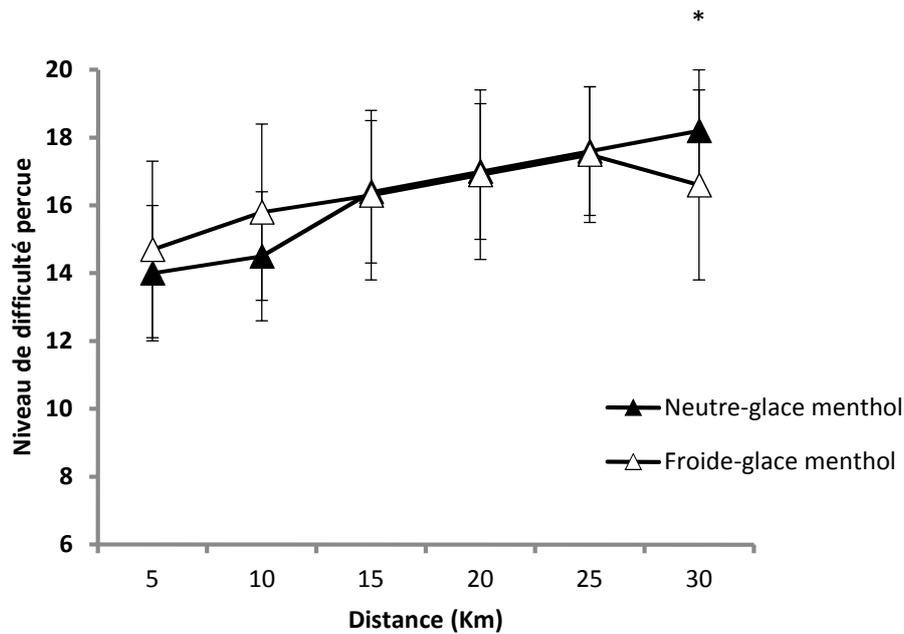


Figure 3.14. NDP pendant l'exercice dans les deux conditions. Les valeurs moyennes et SD sont présentés. \* différence significative entre les deux conditions (P = 0.047)

### *Poids corporel*

Il n'y avait pas de différence dans le poids entre deux conditions avant l'étude (74.5 kg  $\pm$  7.5 kg, P > 0.05) et dans le poids perdu après l'étude (pour NGM: 1.1 kg  $\pm$  0.5 kg, FGM: 1.2 kg  $\pm$  0.6 kg, P > 0.05).

## **4. Discussion générale**

Le premier axe de travail de cette thèse teste l'hypothèse que l'ingestion de l'eau froide/menthol ou la glace pilée/menthol pourrait améliorer la performance d'exercice dans un environnement chaud et humide comparé aux boissons non cumulatives (glace pilée, eau froide, neutre ou boissons au menthol) (étude 1). Cette étude a mis en

évidence des augmentations des performances d'exercice avec les boissons froides mentholées (i.e., eau froide, glace pilée). Tandis que les études sur l'exercice effectuées dans des conditions extérieures valides sont particulièrement importantes pour comprendre comment les réponses physiologiques sont affectées (Dugas 2010), les essais de l'étude 1 ont été effectués dans le laboratoire où plusieurs facteurs environnementaux (vent, rayonnement solaire) n'ont pas été pris en compte et où l'impact des conditions environnementales a été éliminé, limitant les résultats aux conséquences directes de la prise de boisson. Par conséquent, le second travail de cette thèse a déterminé si les résultats positifs (augmentation de la performance d'exercice) avec l'ingestion de l'eau froide/glace pilée au menthol trouvé dans le laboratoire pourraient s'étendre à d'autres sports (cyclisme et course à pied) ou des exercices pluridisciplinaires (duathlon) dans des conditions extérieures, c'est à dire les conditions réelles de compétition (étude 2). La revue de littérature a montré que le refroidissement interne par l'ingestion d'eau froide avant ou pendant l'exercice ou les deux cumulées permettent d'augmenter la performance dans un environnement chaud. Il est aussi suggéré que la combinaison des deux stratégies pourrait conduire à augmenter encore la performance de l'exercice (Bongers et coll. 2015). Ces résultats ainsi que de nos précédents travaux (étude 1 et 2) nous ont conduit à tester l'hypothèse qu'une combinaison d'ingestion d'eau froide avant l'exercice et de glace pilée/menthol pendant l'exercice pourrait limiter le stress de chaleur au cours de l'exercice conduisant une augmentation encore plus forte de la performance (étude 3).

Les principaux résultats de cette thèse sont: 1) la performance est meilleure avec l'ingestion de la glace pilée par rapport à l'eau à température neutre, indépendamment de l'arôme, 2) la performance est meilleure avec le menthol, quelle que soit la température de la boisson, 3) les meilleures performances sont obtenues avec des

combinaisons soit de glace pilée avec menthol ou d'eau froide avec menthol, 4) une combinaison entre la glace pilée/eau froide et le menthol permet de limiter le déclin de la performance en condition extérieure, 5) le refroidissement interne pre-exercice n'améliore pas la performance de l'exercice durant lequel la glace pilée/menthol est consommée, 6) les stress physiologique et psychologique (i.e., Tcen, FC et NDP) ne diffèrent pas entre les essais. Pour la première fois, cette thèse a montré les effets de l'absorption d'une boisson froide au menthol sur les réponses physiologiques ainsi que sur la performance aérobie en climat chaud et humide.

Les protocoles d'exercices utilisés dans cette thèse étaient des contres la montre (exercice à rythme libre) où les athlètes devaient compléter une distance fixée le plus vite possible. Un échauffement a été effectué avant le début des essais simulant le contexte du sport en compétition. De plus, les sujets de chaque étude étaient des athlètes bien entraînés. Tout cela est compatible avec des événements sportifs dans le monde réel.

Le débat reste ouvert sur la quantité d'eau devant être bue, tel que rapporté par Burdon et coll. (2010b). Les protocoles d'ingestions de liquides varient largement, de la consommation régulière d'un volume standard non ajusté pour le poids corporel, la surface du corps ou le taux de la transpiration (Burdon et coll. 2010a; Lee et coll. 2008a) à la consommation ad libitum (Mundel et coll. 2006) ou un grand volume unique à un moment pendant l'exercice (Lee et Shirreffs 2007). D'un point de vue physiologique, la consommation de grandes quantités de boissons froides est considérée créer un dissipateur de chaleur, ce qui devrait théoriquement conduire à l'atténuation de la chaleur accumulée au cours de l'exercice et à réduire l'augmentation de la Tcen. Dans nos études, les boissons sont imposées périodiquement pendant l'exercice (études 1 et 2) ou avant et pendant l'exercice (étude 3) aux sujets avec la

moyenne de  $\approx 630 \text{ mL.h}^{-1}$  (étude 3) et de  $\approx 1.000 \text{ mL.h}^{-1}$  (études 1 et 2). Les raisons du choix de ces quantités sont liées au taux de vidange gastrique qui, dans des conditions normales (i.e., sans déshydratation ou hyperhydratation), est d'environ  $800 \text{ mL.h}^{-1}$  à  $1.200 \text{ mL.h}^{-1}$  (Gisolfi et coll. 2001). En outre, bien que certaines études aient utilisé de plus grands volumes d'eau (voir la revue de Burdon et coll. 2010b), il est bien connu que les athlètes ne boivent généralement pas un grand volume d'eau en seule fois pendant l'exercice, mais ont tendance à boire de façon intermittente. Il a aussi été démontré que la vidange de l'estomac est plus rapide avec des volumes plus petits, ce qui entraîne une réhydratation plus rapide (Hunt et MacDonald 1954). Des récents travaux de notre équipe (Baillot et Hue 2015; Baillot et coll. 2014) ont démontré que les athlètes boivent ad libitum dans un climat tropical entre  $320 \text{ mL.h}^{-1}$  à  $1.260 \text{ mL.h}^{-1}$ , avec une moyenne de  $626 \text{ mL.h}^{-1}$  au cours d'un trail de 27 km (Baillot et coll. 2014), et de  $500 \text{ mL.h}^{-1}$  à  $1.240 \text{ mL.h}^{-1}$  avec une moyenne de  $760 \text{ mL.h}^{-1}$  au cours d'un triathlon Half-Ironman.

Certaines stratégies de refroidissement interne pour améliorer la performance dans un environnement chaud ont été étudiées aussi bien avant que pendant l'exercice. Les deux stratégies ont indiqué que la performance augmente avec de l'absorption de glace pilée par rapport à l'eau neutre ou l'eau froide (Stevens et coll. 2013; Ihsan et coll. 2010; Siegel et coll. 2010). Néanmoins, certaines études ont rapporté un mal de tête de certains sujets en raison de la stimulation du nerf trijumeau situé au nasopharynx par la glace pillée lors du précooling interne (Siegel et coll. 2012, 2010; Yeo et coll. 2012). Ce phénomène est appelé le « cerveau congelé » en anglais « brain freeze » (Bird et coll. 1992). Quoique la durée du phénomène du cerveau congelé soit très courte, il n'existe aucune preuve de ses effets soient néfastes pour l'exercice (Siegel et Laursen 2012) et ses effets lors de la préparation pré-compétition des

athlètes doit encore être approfondis (Siegel et Laursen 2012). Toutefois, ce phénomène n'est pas apparu dans nos essais (études 1, 2 et 3) ni dans d'autres études (Schulze et coll. 2015; Stevens et coll. 2013) étudiant l'absorption de la glace pilée pendant l'exercice.

Afin d'éviter le mal de tête causé par l'ingestion de la glace pilée, dans l'étude 3 de cette thèse, une eau à 3 °C a été choisie pour l'ingestion par les sujets lors des 30 minutes de repos précédent l'exercice. A cette étape, une quantité de 7 g·kg<sup>-1</sup> d'eau froide (environ 510 mL pour une moyenne de 73 kg de poids corporel) a été choisie parce que nos calculs théoriques montrent que 7 g·kg<sup>-1</sup> d'eau froide à 3 °C peuvent réduire la T<sub>cen</sub> d'environ 0.3 °C. Cette diminution de la T<sub>cen</sub> permettrait l'augmentation de la performance aérobie en environnement chaud (Hasegawa et coll. 2006). En outre, Ihsan et coll. (2010) ont indiqué que 6.8 g·kg<sup>-1</sup> de glace pilée est la quantité maximale tolérable que leurs sujets ont pu consommer pendant 30 minutes lors d'un essai pilote.

La performance de l'exercice a été améliorée avec l'absorption de la glace pilée en comparaison à l'eau froide et l'eau neutre (étude 1). Nos résultats sont également compatibles avec ceux des études précédentes lors de l'ingestion de la glace pilée avant (Yeo et coll. 2012; Ihsan et coll. 2010) ou pendant l'exercice (Schulze et coll. 2015; Stevens et coll. 2013) entraînant une augmentation de la performance dans un climat chaud et humide.

Un résultat inattendu est que la performance n'a pas été augmentée avec l'absorption de l'eau froide sans menthol. Néanmoins, ce résultat est soutenu par le travail de Cavalho et coll. (2014) qui ont montré qu'il n'y a pas de différence lors d'une performance de 40 km à vélo avec l'absorption ad libitum pendant l'exercice d'eau à

10 °C ou à 37 °C. Cependant, ces résultats contrastent avec les observations antérieures de Byrne et coll. (2011) qui montre une augmentation de la performance sur 30 km à vélo avec l'absorption avant l'exercice d'eau à 2 °C vs l'eau à 37 °C. De plus, d'autres auteurs (Hasegawa et coll. 2006; Mundel et coll. 2006) ont également rapporté que la performance à un rythme fixé augmente avec l'absorption d'eau froide durant l'exercice. Ces résultats ci-dessus suggèrent que l'ingestion d'eau froide avant et pendant l'exercice conduit à une augmentation de la performance lors d'un exercice à rythme fixé. Toutefois, à l'exercice à rythme libre, la performance augmente lors de l'ingestion de l'eau froide avant l'exercice, mais pas avec l'ingestion de l'eau froide pendant l'exercice, comme constaté dans notre étude (étude 1).

La performance a augmenté en moyenne de 5.3% avec des boissons au menthol (i.e., eau neutre/menthol, eau froide/menthol et glace pilée/menthol) en comparaison à celle des boissons sans menthol (i.e., eau neutre, eau froide et glace pilée) (étude 1). Ce résultat est supporté par le travail de Mundel et Jones (2010) qui ont montré que la performance sur un ergocycle jusqu'à l'épuisement en climat chaud augmentait de 9% lors du rinçage de la bouche avec une solution de menthol (0.01%) par rapport à l'eau aromatisée à l'orange. Ces résultats mis en évidence un fort effet du menthol sur la performance d'exercice en environnement chaud et humide.

Le résultat principal obtenu lors de cette thèse est une forte augmentation de la performance mise en évidence avec l'eau froide/menthol et la glace pilée/menthol (étude 1). Cette étude est la première à démontrer un effet significatif de la combinaison entre une boisson froide (i.e., eau froide et glace pilée) et le menthol sur la performance sportive. Par exemple: la performance n'augmente pas avec l'ingestion d'eau froide. En revanche, la performance augmente de 6.8% avec l'ingestion de glace pilée en

comparaison à l'eau neutre sans menthol. Mais cette augmentation de la performance est plus prononcée avec l'eau froide/menthol et la glace pilée/menthol, augmentant la performance respectivement de 7.1% et 10.2% par rapport à l'eau neutre sans menthol. Cela suggère donc une interaction entre les boissons froides et le menthol permettant d'augmenter la performance.

De plus, la littérature rapporte que l'augmentation de la performance est nettement plus faible avec l'ingestion de la glace pilée (i.e., par rapport à l'eau neutre) en extérieur par rapport au laboratoire. En laboratoire, une augmentation significative de la performance de 6.5% et 2.5% ont été montrées par Ihsan et coll. (2010) et Stevens et coll. (2013), respectivement, mais dans une condition écologique réelle, cette augmentation n'était que de 0.5% dans l'étude de Yeo et coll. (2012). Inversement, nous avons observé une augmentation des performances de 8.2% et 5.0% avec de la glace pilée/menthol et l'eau froide/menthol comparée à l'eau neutre/menthol, en laboratoire lors de l'étude 1, alors que les taux étaient de 6.2% et de 3.0%, respectivement, dans les conditions extérieures de l'étude 2. Nous supposons que l'impact des facteurs environnementaux (i.e., vent et rayonnement solaire) a réduit les effets d'une boisson froide sans menthol (i.e., eau froide ou glace pilée) sur le corps, mais que l'impact de l'environnement est plus limité lors de l'ingestion des boissons froides contenant du menthol parce que les boissons froides au menthol provoquant une activation à la fois physique et chimique sur les récepteurs au froid. C'est la raison pour laquelle une combinaison entre la température basse des boissons et le menthol permet de conserver l'amélioration de performance observée en laboratoire (i.e., par rapport à une boisson froide unique) dans les conditions extérieures.

Dans une méta-analyse, Bongers et coll. (2015) ont suggéré qu'une combinaison de stratégies de refroidissement avant et pendant l'exercice peut conduire à une forte augmentation des performances par rapport à un seul des deux protocoles. Cependant, nous n'avons pas trouvé de différence significative de la performance lors de la comparaison de l'ingestion d'eau froide sans menthol versus l'ingestion d'eau neutre sans menthol (étude 3). Chacune de ces deux conditions comprenait l'ingestion de glace pilée mentholée pendant l'exercice. Nos résultats sont soutenus par l'étude de Schulze et coll. (2015) qui ont montré que le pré-refroidissement avec la prise de glace pilée ( $15 \text{ g.kg}^{-1}$ ) à  $-1 \text{ }^{\circ}\text{C}$  et agrémenté de serviettes glacées (sur les jambes et le torse) combiné avec l'ingestion ad libitum de glace pilée ( $-1 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ) pendant l'exercice n'a pas augmenté la performance par rapport à l'ingestion ad libitum de glace pilée pendant l'exercice seulement. Les résultats ci-dessus indiquent que le précooling interne n'a aucun effet additif sur la performance d'exercice lorsque le précooling interne avec la prise de glace pilée (avec ou sans menthol) est déjà utilisé. En outre, cela renforce l'idée que l'amélioration de la performance grâce à l'ingestion d'une boisson très froide ou de la glace pilée ne peut être davantage optimisée par précooling interne. Nos travaux permettent ainsi d'affirmer que l'absorption de la glace pilée mentholée au cours de l'exercice est une bonne stratégie pour améliorer la performance aérobie dans un climat tropical.

La boisson froide et/ou le menthol permettent de produire des performances supérieures sans augmentation proportionnelle de la  $T_{\text{cen}}$ , de la FC et du NDP (étude 1 et 2). Nous émettons l'hypothèse que la glace pilée avec ou sans menthol ou la boisson froide au menthol biaisent les informations dont l'organisme dispose sur la contrainte thermique réelle à laquelle il est exposé, provoquant ainsi une vasoconstriction périphérique réflexe. De plus, le menthol pourrait tromper l'hypothalamus sur l'accumulation réelle de chaleur se traduisant par la hausse de la

Tcen, l'empêchant ainsi de procéder à une vasodilatation sous-cutanée. Ceci permet au volume sanguin central de moins diminuer et de participer donc à une irrigation augmentée du muscle actif et un volume d'éjection systolique moins réduit. Ceci se traduit par la capacité de produire des efforts supérieurs sans augmentation significative de la FC.

On ne note cependant pas d'augmentation significative de la Tcen, malgré des performances augmentées, ce qui pourrait être considéré comme incompatible avec l'hypothèse d'une redistribution du volume sanguin vers le centre. En effet, un organisme qui produit un effort supérieur produit plus de chaleur ce qui, face à l'hypothèse d'une réduction de la réponse thermolytique, devrait se traduire par une accumulation progressive de chaleur. Il apparaît donc que les volumes d'eau froide ou de glace pilée ingérés peuvent constituer un dissipateur de chaleur suffisamment efficace pour contrecarrer la hausse de Tcen que nous devrions observer (Siegel et Laursen 2012).

Dans nos études, nous n'avons pas observé de baisse des NDP en réponse à la prise d'eau froide mentholée et de glace pilée mentholée. Néanmoins, le NDP étant simultanément influencé par des facteurs environnementaux, des facteurs internes et l'intensité de l'exercice. Il est montré que l'absorption de glace pilée (Siegel et coll. 2012, 2010) ou le rinçage de la bouche avec la solution au menthol (Mundel et Jones 2010) réduisent le NDP pendant l'exercice à intensité fixe. Donc nous soupçonnons que l'augmentation de performance (vitesse) pourrait avoir masqué l'effet de la glace pilée, de la combinaison entre l'eau froide/glacée pilée et le menthol sur le NDP.

## **Mécanismes d'effet de la boisson mentholée sur la performance**

La diminution de la Tcen avec l'absorption de l'eau froide ou de la glace pilée est supposée être le principal facteur de l'amélioration des performances à l'exercice (Yeo et coll. 2012; Ihsan et coll. 2010; Siegel et coll. 2010). Toutefois, dans une méta-analyse, Bongers et coll. (2015) ont indiqué qu'il n'y a pas de corrélation entre la réduction de Tcen et l'augmentation de la performance d'exercice. Nous n'avons pas également vu des différences du stress physiologique et psychologique (Tcen, FC et NDP) entre les essais (études 1 et 2). Cela nous conduit donc à la suggestion que les effets sensoriels potentiels d'une boisson froide ou/et du menthol sur les récepteurs au froid de la bouche, de l'oropharynx et du tractus gastro-intestinal sont les facteurs principaux, via un mécanisme de l'intégration par le régulateur central placé dans le cerveau (Noakes 2012; St Clair Gibson et Noakes 2004), d'amélioration de la performance.

En effet, Siegel et coll. (2011) ont montré que le maintien pendant 2 min d'une contraction volontaire maximale après l'ingestion de  $1.25 \text{ g.kg}^{-1}$  de glace pilée ( $-1 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ) était significativement plus élevé par rapport à l'ingestion d'un fluide chaud ( $40 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ). De plus, Meamarbashi (2014) ont indiqué que l'application de  $50 \text{ }\mu\text{l}$  d'huile de menthe poivrée pure sur la langue a augmenté (36.1%) la performance au test de force de la main. Il est expliqué que l'eau froide ou le menthol affecte les récepteurs au froid au niveau de la bouche et l'oropharynx. Les rétroactions afférentes relatif à l'état thermique du corps et/ou l'activation de régions du cerveau associées à la récompense, au plaisir et à la motivation pourraient aider à maintenir la commande centrale (central drive) et accroître la motivation à l'exercice (Siegel et coll. 2011; Burdon et coll. 2010b; Mundel et Jones 2010). De plus, comme les récepteurs thermiques sont également présents dans

le tractus gastro-intestinal (Villanova et coll. 1997), l'effet du refroidissement dans le tractus digestif supérieur peut aussi fournir la rétroaction afférente au cerveau à partir de l'intestin (Stevens et coll. 2013).

St Clair Gibson et Noakes (2004) ont introduit le modèle du régulateur central placé dans le cerveau. Avant l'exercice, le cerveau intègre l'information afférente à partir de parties du corps permettant de faire des calculs inconscients déterminant le recrutement optimal des unités motrices, mais également de maintenir une réserve physiologique et d'augmenter le rythme à la fin de l'exercice. Dès que l'exercice commence, les signaux afférents inhibiteurs des changements physiologiques (i.e., l'augmentation de la T<sub>cen</sub>, la T<sub>cu</sub>, le taux de stockage de chaleur, l'hyperventilation, la FC et la fatigue des muscles actifs) sont générés vers le cerveau. Le régulateur central effectue des modifications comme une diminution du recrutement de l'unité motrice afin d'assurer l'homéostasie, d'où la réduction de l'intensité d'exercice. Néanmoins l'absorption d'une boisson froide ou/et du menthol pourrait modifier la nature de la rétroaction sensorielle vers les régions de contrôle ou agir sur les zones spécifiques du cerveau (Noakes 2012). De cette façon le recrutement des unités musculaires est maintenu ou augmenté.

Ce modèle du régulateur central pourrait également expliquer la performance de l'exercice avec l'absorption de l'eau froide sans menthol ou de l'eau neutre mentholée (étude 1) qui n'est pas significativement différente par rapport à celle de l'eau neutre sans menthol. L'intensité des signaux afférents par stimulation de l'eau froide ou le menthol sur les récepteurs au froid au niveau de l'oropharynx ou/et du tractus gastro-intestinal est insuffisante pour supprimer les signaux afférents inhibiteurs, ne limitant pas le déclin du recrutement des unités motrices. Contrairement, la glace pilée avec ou sans menthol et l'eau froide mentholée, la sensation de fraîcheur au niveau de

l'oropharynx renforcée par la combinaison entre le menthol et une boisson froide (Green 1985) créent les signaux afférents suffisamment élevés submergeant la rétroaction inhibitrice. En conséquence, le cerveau donne une fausse évaluation de l'état thermique du corps. Cela conduit au recrutement plus important des unités motrices, ainsi la performance augmente.

Les signaux afférents créés par absorption de boissons aux températures différentes pourraient aussi interagir les uns avec les autres, les signaux plus forts submergeant les autres plus faibles et jouant un rôle décisif dans l'activité des centres de contrôle moteur. Cela pourrait expliquer pourquoi la performance d'exercice n'a pas augmenté dans la condition eau/froide - ingestion de glace pilée/menthol (étude 3).

Enfin l'ingestion de la glace pilée, avec ou sans menthol, permettrait de refroidir le sang des artères carotides amoindrissant l'élévation de la température cérébrale (Siegel et Laursen 2012) que l'on suppose constituer le signal inhibiteur envoyé aux centres du contrôle moteur (Nybo 2008).

## **5. Conclusion**

Nos études ont permis de mettre en évidence un certain nombre de résultats intéressants. L'ingestion d'une boisson au menthol augmente la performance d'exercice en climat tropical. Cette augmentation de la performance paraît s'accroître en diminuant la température du liquide ingéré. En effet, la performance est améliorée par la boisson froide mentholée, et l'est encore plus par la glace pilée mentholée. En conditions écologiques, la littérature semble montrer que la glace pilée seule peine à reproduire en extérieur (Yeo et coll. 2012) les effets positifs sur la performance observée en laboratoire (Ihsan et coll. 2010). Nos études 1 et 2 montrent qu'une fois

mentholée, cette glace pilée semble conserver, en conditions écologiques, la capacité d'amélioration de la performance observée en laboratoire. Le menthol apparaît ainsi comme un levier important d'amélioration de la performance écologique en climat tropical. Enfin, la littérature rapporte que le refroidissement interne pré-exercice, par boisson froide, améliore la performance (Lee et coll. 2008b; Byrne et coll. 2011) en climat chaud et humide. S'appuyant sur ce résultat, notre étude n° 3 a permis de démontrer que l'amélioration de la performance en climat tropical par la prise de glace pilée mentholée au cours de l'effort, est d'une telle ampleur que l'adjonction pré-exercice d'un refroidissement par boisson froide devient inutile.

## **6. Perspectives**

Cette thèse montre les avantages de l'ingestion de glace pilée mentholée pendant l'exercice pour augmenter les performances de contre-la-montre sur le terrain. La facilité de stockage (Stevens et coll. 2013) et d'utilisation de ce produit, si on le compare aux bains froids ou à la veste de refroidissement, en fait une option efficace, simple d'usage et pratique pour l'athlète. La glace pilée mentholée peut donc être recommandée comme une boisson pour les sports d'endurance (i.e., vélo, course) lors de compétitions sportives se déroulant en climat chaud (sec ou humide).

### ***Perspective 1***

La prise de 500 mL d'eau minérale contenant 0.05 mL d'huile de menthe poivrée chaque jour pendant 10 jours consécutifs a été démontrée (Meamarbashi et Rajabi 2013)

comme améliorant la performance à un test de Bruce ainsi que la puissance et le temps de parcours en climat chaud et humide. Cette amélioration résulterait de la réduction de l'excitation mentale, du changement d'humeur, et de la réduction de la fatigue mentale, induites par la menthe poivrée (Umezu 2009). La fatigue mentale entraîne en effet une augmentation du NDP (Marcora et coll. 2009) et une diminution de la performance (Pageaux et coll. 2014; Marcora et coll. 2009). La littérature, à laquelle nous avons contribué par nos travaux, indique ainsi que le menthol est utile lorsqu'il est pris pendant l'effort (Meamarbashi 2014; Mundel et Jones 2010) mais aussi en amont de l'effort (Meamarbashi et Rajabi 2013). Il serait intéressant d'étudier l'effet cumulatif de la prise de glace pilée mentholée pendant et plusieurs jours avant l'effort sur la performance aérobie en climat chaud (sec ou humide).

### *Perspective 2*

Schlader et coll. (2011c) ont démontré que l'application d'une crème à 8% de menthol sur le visage permet d'améliorer la performance aérobie sur cycloergomètre. En effet, les cyclistes ayant reçu cette crème ont allongé de 28% le temps mis à un NDP de 16 pour voir leur puissance réduite de 30%. L'impact de la pulvérisation d'une solution de 0.05% menthol sur le corps n'a, quant à lui, pas été mis en évidence à ce jour (Barwood et coll. 2015, 2012). Il serait intéressant d'étudier l'effet cumulatif de la prise de glace pilée mentholée au cours de l'effort et de l'application de menthol sur le visage en climat chaud (sec ou humide).

## Bibliographie

- Abbiss CR, Burnett A, Nosaka K, Green JP, Foster JK, Laursen PB. 2010. «Effect of hot versus cold climates on power output, muscle activation, and perceived fatigue during a dynamic 100-km cycling trial.» *J Sports Sci* 28(2): 117-25.
- Adams WC, Mack GW, Langhans GW, Nadel ER. 1992. «Effects of varied air velocity on sweating and evaporative rates during exercise.» *J Appl Physiol* 73(6):2668-74.
- Almeida MC, Steiner AA, Branco LG, Romanovsky AA. 2006. «Cold-seeking behavior as a thermoregulatory strategy in systemic inflammation.» *Eur J Neurosci* 23(12): 3359-67.
- Aoyagi Y, McLellan TM, Shephard RJ. 1994. «Effects of training and acclimation on heat tolerance in exercising men wearing protective clothing.» *Eur J Appl Physiol Occup Physiol* 68(3): 234-45.
- Armstrong LE, Epstein Y, Greenleaf JE, Haymes EM, Hubbard RW, Roberts WO, Thompson PD. 1996. «American college of sports medicine position stand. Heat and cold illnesses during distance running.» *Med Sci Sports Exerc* 28(12): i-x.
- Armstrong LE, Maresh CM. 1991. «The induction and decay of heat acclimatisation in trained athletes .» *Sports Medicine* 12(5): 302-312.
- Arngrimsson SA, Petit DS, Stueck MG, Jorgensen DK, Cureton KJ. 2004. «Cooling vest worn during active warm-up improves 5-km run performance in the heat.» *J Appl Physiol* 96: 1867–1874.
- Bae JS, Lee JB, Matsumoto T, Othman T, Min YK, Yang HM. 2006. «Prolonged residence of temperate natives in the tropics produces a suppression of sweating.» *Pflugers Arch* 453(1): 67-72.
- Baillet M, Hue O. 2015. «Hydration and thermoregulation during a half-ironman performed in tropical climate.» *J Sports Sci Med* 14(2): 263-8.

- Baillot M, Le Bris S, Hue O. 2014. «Fluid replacement strategy during a 27-Km trail run in hot and humid conditions.» *Int J Sports Med* 35(2): 147-52.
- Bain AR, Lesperance NC, Jay O. 2012. «Body heat storage during physical activity is lower with hot fluid ingestion under conditions that permit full evaporation.» *Acta Physiol (Oxf)* 206(2): 98-108.
- Baker LB, Lang JA, Kenney WL. 2009. «Change in body mass accurately and reliably predicts change in body water after endurance exercise.» *Eur J Appl Physiol* 105(6): 959-67.
- Barwood MJ, Corbett J, Thomas K, Twentyman P. 2015. «Relieving thermal discomfort: Effects of sprayed L-menthol on perception, performance, and time trial cycling in the heat.» *Scand J Med Sci Sports* 1:211-8.
- Barwood MJ, Corbett J, White D, James J. 2012. «Early change in thermal perception is not a driver of anticipatory exercise pacing in the heat.» *Br J Sports Med* 46(13): 936-42.
- Bird N, MacGregor EA, Wilkinson MI. 1992. «Ice cream headache--site, duration, and relationship to migraine.» *Headache* 32(1):35-8.
- Bongers CC, Thijssen DH, Veltmeijer MT, Hopman MT, Eijsvogels TM. 2015. «Precooling and percooling (cooling during exercise) both improve performance in the heat: a meta-analytical review.» *Br J Sports Med* 49(6): 377-84.
- Booth J, Marino F, Ward JJ. 1997. «Improved running performance in hot humid conditions following whole body precooling.» *Med Sci Sports Exerc* 29(7): 943-9.
- Borg GA. 1982. «Psychophysical bases of perceived exertion.» *Med Sci Sports Exerc* 14:377-381.
- Brotherhood JR. 2008. «Heat stress and strain in exercise and sport.» *J Sci Med Sport* 11(1):6-19.
- Buono MJ, Heaney JH, Canine KM. 1998. «Acclimation to humid heat lowers resting core temperature.» *Am J Physiol* 274(5 Pt 2): R1295-9.

- Buono MJ, Martha SL, Heaney JH. 2009. «Peripheral sweat gland function is improved with humid heat acclimation.» *J Thermal Biology* 34: 127–130.
- Burdon C, O'Connor H, Gifford J, Shirreffs S, Chapman P, Johnson N. 2010a. «Effect of drink temperature on core temperature and endurance cycling performance in warm, humid conditions.» *J Sports Sci* 28(11): 1147–1156.
- Burdon CA, Hoon MW, Johnson NA, Chapman PG, O'Connor HT. 2013. «The effect of ice-slusly ingestion and mouthwash on thermoregulation and endurance performance in the heat.» *Int J Sport Nutr Exerc Metab* 23(5):458-69.
- Burdon CA, O'Connor HT, Gifford JA, Shirreffs SM. 2010b. «Influence of beverage temperature on exercise performance in the heat: a systematic review.» *Int J Sport Nutr Exerc Metab* 20:166–174.
- Burdon CA, Ruell P, Johnson N, Chapman P, O'Brien S, O'Connor HT. 2015. «The effect of ice-slusly consumption on plasma vasoactive intestinal peptide during prolonged exercise in the heat.» *J Therm Biol* 47:59-62.
- Byrne C, Owen C, Cosnefroy A, Lee JK. 2011. «Self-paced exercise performance in the heat after pre-exercise cold-fluid ingestion.» *J Athl Train* 46(6):592-9.
- Carvalho MV, de Andrade MT, Ramos GP, Maia-Lima A, Pereira ER, Mendes TT, Marins JC, Amorim FT, Silami-Garcia E. 2014. «The temperature of water ingested ad libitum does not influence performance during a 40-km self-paced cycling trial in the heat.» *J Sports Med Phys Fitness* [Epub ahead of print].
- Castle PC, Maxwell N, Allchorn A, Mauger AR, White DK. 2012. «Deception of ambient and body core temperature improves self paced cycling in hot, humid conditions.» *Eur J Appl Physiol* 112(1): 377-85.
- Charkoudian N. 2003. «Skin blood flow in adult human thermoregulation: How it works, when it does not, and why.» *Mayo Clin Proc* 78: 603-612.
- Cheang WS, Lam MY, Wong WT, Tian XY, Lau CW, Zhu Z, Yao X, Huang Y. 2013. «Menthol relaxes rat aortae, mesenteric and coronary arteries by inhibiting calcium influx.» *Eur J Pharmacol* 702(1-3): 79-84.

- Cheung SS, McLellan TM, Tenaglia S. 2000. «The thermophysiology of uncompensable heat stress. Physiological manipulations and individual characteristics.» *Sports Med* 29(5): 329-59.
- Cheung SS. 2010. «Interconnections between thermal perception and exercise capacity in the heat.» *Scand J Med Sci Sports* 20(3): 53–59.
- Cheung SS. 2007. «Neuropsychological determinants of exercise.» *Prog Brain Res* 162: 45-60.
- Cheuvront SN and Haymes EM. 2001. «Thermoregulation and marathon running: Biological and environmental influences.» *Sports Med* 31(10): 743-762.
- Cheuvront SN, Carter R 3rd, Castellani JW, Sawka MN. 2005. «Hypohydration impairs endurance exercise performance in temperate but not cold air.» *J Appl Physiol* 99(5): 1972-6.
- Cheuvront SN, Kenefick RW, Montain SJ, Sawka MN. 2010. «Mechanisms of aerobic performance impairment with heat stress and dehydration.» *J Appl Physiol* 109: 1989–1995.
- Cheuvront SN, Kenefick RW, Montain SJ, Sawka MN. 2010. «Mechanisms of aerobic performance impairment with heat stress and dehydration.» *J Appl Physiol* 109(6): 1989-95.
- Cooper KE. 2002. «Some historical perspectives on thermoregulation.» *J Appl Physiol* 92: 1717-24.
- Cotter JD, Sleivert GG, Roberts WS, Febbraio MA. 2001. «Effect of pre-cooling, with and without thigh cooling, on strain and endurance exercise performance in the heat.» *Comp Biochem Physiol A Mol Integr Physiol* 128(4): 667-77.
- Crandall CG, Gonzalez-Alonso J. 2010. «Cardiovascular function in the heat-stressed human.» *Acta Physiol (Oxf)* 199(4): 407-23.
- Cuddy JS, Hailes WS, Ruby BC. 2014. «A reduced core to skin temperature gradient, not a critical core temperature, affects aerobic capacity in the heat.» *J Therm Biol* 43: 7-12.

- Duffield R, Green R, Castle P, Maxwell N. 2010. «Precooling can prevent the reduction of self-paced exercise intensity in the heat.» *Med. Sci. Sports Exerc* 42(3): 577–584.
- Duffield R, Marino FE. 2007. «Effects of pre-cooling procedures on intermittent-sprint exercise performance in warm conditions.» *Eur J Appl Physiol* 100: 727–735.
- Dugas JP. 2010. «How hot is too hot?: Some considerations regarding temperature and performance.» *Int J Sports Physiol Perform* 5(4): 559-64.
- Eccles R. 1994. «Menthol and related cooling compounds.» *J Pharm Pharmacol* 46(8): 618-30.
- Eccles R. 2000. «Role of cold receptors and menthol in thirst, the drive to breathe and arousal.» *Appetite* 34(1): 29-35.
- Eccles R, Jawad MS, Morris S. 1990. «The effects of oral administration of (-)-menthol on nasal resistance to airflow and nasal sensation of airflow in subjects suffering from nasal congestion associated with the common cold.» *J Pharm Pharmacol* 42(9): 652-4.
- Ely BR, Chevront SN, Kenefick RW, Sawka MN. 2010. «Aerobic performance is degraded, despite modest hyperthermia, in hot environments.» *Med Sci Sports Exerc* 42:135–141.
- Ely MR, Chevront SN, Roberts WO, Montain SJ. 2007. «Impact of weather on marathon-running performance.» *Med Sci Sports Exerc* 39:487–493.
- Eston R. 2012. «Use of ratings of perceived exertion in sports.» *Int J Sports Physiol Perform* 7(2): 175-82.
- Fritzsche RG, Switzer TW, Hodgkinson BJ, Coyle EF. 1999. «Stroke volume decline during prolonged exercise is influenced by the increase in heart rate.» *J Appl Physiol* 86(3): 799-805.
- Galloway SD and Maughan RJ. 1997. «Effects of ambient temperature on the capacity to perform prolonged cycle exercise in man.» *Med Sci* 29: 1240–9.

- Gelal A, Jacob P III, Yu L, Benowitz NL. 1999. «Disposition kinetics and effects of menthol.» *Clin Pharmacol Ther* 66(2): 128-35.
- Gillis DJ, House JR, Tipton MJ. 2010. «The influence of menthol on thermoregulation and perception during exercise in warm, humid conditions.» *Eur J Appl Physiol* 110(3): 609-18.
- Gisolfi CV, Lambert GP, Summers RW. 2001. «Intestinal fluid absorption during exercise: role of sport drink osmolality and [Na+].» *Med Sci Sports Exerc* 33(6): 907-15.
- Gleeson M. 1998. «Temperature regulation during exercise.» *Int J Sports Med* 19: S96-9.
- Green BG. 1985. «Menthol modulates oral sensations of warmth and cold.» *Physiol Behav* 35(3):427-34.
- Gonzalez-Alonso J. 2012. «Human thermoregulation and the cardiovascular system.» *Exp Physiol* 97(3):340-6.
- Gonzalez-Alonso J. 2012. «Human thermoregulation and the cardiovascular system.» *Exp Physiol* 97(3): 340-6.
- Gonzalez-Alonso J, Calbet AL. 2003. «Reductions in systemic and skeletal muscle blood flow and oxygen delivery limit maximal aerobic capacity in humans.» *Circulation* 107:824–830.
- Gonzalez-Alonso J, Crandall CG, Johnson JM. 2008. «The cardiovascular challenge of exercising in the heat.» *J Physiol* 586(1):45-53.
- Gonzalez-Alonso J, Mora-Rodriguez R, Coyle EF. 2000. «Stroke volume during exercise: interaction of environment and hydration.» *Am J Physiol Heart Circ Physiol* 278: H321–H330.
- Gonzalez-Alonso J, Mora-Rodriguez R, Coyle EF. 1999a. «Supine exercise restores arterial blood pressure and skin blood flow despite dehydration and hyperthermia.» *Am J Physiol* 277(2 Pt 2): H576-83.

- Gonzalez-Alonso J, Teller C, Andersen SL, Jensen FB, Hyldig T, Nielsen B. 1999b. «Influence of body temperature on the development of fatigue during prolonged exercise in the heat.» *J Appl Physiol* 86(3): 1032-9.
- Guest S, Grabenhorst F, Essick G, Chen Y, Young M, McGlone F, de Araujo I, Rolls ET. 2007. «Human cortical representation of oral temperature.» *Physiol Behav* 92(5): 975-84.
- Hargreaves M. 2008. «Physiological limits to exercise performance in the heat.» *J Sci Med Sport* 11(1): 66-71.
- Hasegawa H, Takatori T, Komura T, Yamasaki M. 2006. «Combined effects of pre-cooling and water ingestion on thermoregulation and physical capacity during exercise in a hot environment.» *J Sports Sci* 24(1): 3-9.
- Hessemer V, Langusch D, Brück LK, Bödeker RH, Breidenbach T. 1984. «Effect of slightly lowered body temperatures on endurance performance in humans.» *J Applied Physiology* 57(6): 1731-7.
- Hodder SG and Parsons K. 2007. «The effects of solar radiation on thermal comfort.» *Int J Biometeorol* 51(3): 233-50.
- HuntJN, MacDonald I. 1954. «The influence of volume on gastric emptying.» *J Physiol* 126(3): 459-74.
- Hue O. 2011. «The challenge of performing aerobic exercise in tropical environments: applied knowledge and perspectives.» *Int J Sports Physiol Perform* 6(4): 443-54.
- Ihsan M, Landers G, Brearley M, Peeling P. 2010. «Beneficial effects of ice ingestion as a precooling strategy on 40-km cycling time-trial performance.» *Int J Sports Physiol Perform* 5(2):140-51.
- Kashima H, Hayashi N. 2013. «Facial skin blood flow responses to irritant stimuli in the oral cavity.» *Autonomic Neuroscience: Basic and Clinical* 174: 61–65.
- Kay D, Marino FE, Cannon J, St Clair Gibson A, Lambert MI, Noakes TD. 2001. «Evidence for neuromuscular fatigue during high-intensity cycling in warm, humid conditions.» *Eur J Appl Physiol* 84(1-2):115-21.

- Kenefick RW, Cheuvront SN, Palombo LJ, Ely BR, Sawka MN. 2010. «Skin temperature modifies the impact of hypohydration on aerobic performance.» *J Appl Physiol* 109(1): 79-86.
- Kenney WL, Johnson JM. 1992. «Control of skin blood flow during exercise.» *Med Sci Sports Exerc* 24(3): 303-12.
- Kenney WL, Wilmore JH, Costill DL. 2012. *Physiology of sport and exercise*. United States of America: Human Kinetics.
- Kounalakis SN, Botonis PG, Koskolou MD, Geladas ND. 2010. «The effect of menthol application to the skin on sweating rate response during exercise in swimmers and controls.» *Eur J Appl Physiol* 109(2):183-9.
- Lee DT, Haymes EM. 1995. «Exercise duration and thermoregulatory responses after whole body precooling.» *J Appl Physiol* 79: 1971-6.
- Lee JKW, Maughan RJ, Shirreffs SM. 2008a. «The influence of serial feeding of drinks at different temperatures on thermoregulatory responses during cycling.» *J Sports Sci* 26(6): 583-90.
- Lee JKW, Shirreffs SM. 2007. «The influence of drink temperature on thermoregulatory responses during prolonged exercise in a moderate environment.» *J Sports Sci* 25:975–85.
- Lee JKW, Shirreffs SM, Maughan RJ. 2008b. «Cold drink ingestion improves exercise endurance capacity in the heat.» *Med Sci Sports Exerc* 40(9): 1637–1644.
- Lee JKW, Yeo ZW, Nio AQ, Koh AC, Teo YS, Goh LF, Tan PM, Byrne C. 2013. «Cold drink attenuates heat strain during work-rest cycles.» *Int J Sports Med* 34(12): 1037-42.
- Levels K, Teunissen L PJ, de Haan A, de Koning JJ, van Os B, Daanen H AM. 2013. «Effect of warm-up and precooling on pacing during a 15-km cycling time trial in the heat.» *Int J Sports Physiol Perform* 8(3):307-11.
- Lim CL, Byrne C, Lee JKW. 2008. «Human thermoregulation and measurement of body temperature in exercise and clinical settings.» *Ann Acad Med Singapore* 37:347-53.

- Lorenzo S, Halliwill JR, Sawka MN, Minson CT. 2010. «Heat acclimation improves exercise performance.» *J Appl Physiol* 109(4): 1140-7.
- Luomala MJ, Oksa J, Salmic JA, Linnamoc V, Holmér I, Smolander J, Dugué B. 2012. «Adding a cooling vest during cycling improves performance in warm and humid conditions.» *J Thermal Biology* 37(1): 47–55.
- Macpherson LJ, Hwang SW, Miyamoto T, Dubin AE, Patapoutian A, Story GM. 2006. «More than cool: promiscuous relationships of menthol and other sensory compounds.» *Mol Cell Neurosci* 32(4): 335-43.
- Marcora SM, Staiano W, Manning V. 2009. «Mental fatigue impairs physical performance in humans.» *J Appl Physiol* 106(3): 857-64.
- Marino F, Booth J. 1998. «Whole body cooling by immersion in water at moderate temperatures.» *J Sci Med Sport* 1:73–81.
- Marino FE. 2004. «Anticipatory regulation and avoidance of catastrophe during exercise-induced hyperthermia.» *Comp Biochem Physiol B Biochem Mol Biol* 139(4): 561-9.
- Marino FE, Mbambo Z, Kortekaas E, Wilson G, Lambert MI, Noakes TD, Dennis SC. 2000. «Advantages of smaller body mass during distance running in warm, humid environments.» *Pflugers Arch* 441(2-3): 359-67.
- Maughan RJ. 2010. «Distance running in hot environments: a thermal challenge to the elite runner.» *Scand J Med Sci Sports* 20 Suppl 3:95-102.
- Maughan RJ, Otani H, Watson P. 2012. «Influence of relative humidity on prolonged exercise capacity in a warm environment.» *Eur J Appl Physiol* 112(6): 2313-21.
- Meamarbashi A. 2014. «Instant effects of peppermint essential oil on the physiological parameters and exercise performance.» *Avicenna J Phytomed* 4(1): 72-8.
- Meamarbashi A, Rajabi A. 2013. «The effects of peppermint on exercise performance.» *J Int Soc Sports Nutr* 10(1):15.
- Mitchell JB, McFarlin BK, Dugas JP. 2003. «The effect of pre-exercise cooling on high intensity running performance in the heat.» *Int J Sports Med* 24(2): 118-24.

- Montain SJ, Coyle EF. 1992. «Influence of graded dehydration on hyperthermia and cardiovascular drift during exercise.» *J Appl Physiol* 73:1340-50.
- Morris NB, Bain AR, Cramer MN, Jay O. 2014. «Evidence that transient changes in sudomotor output with cold and warm fluid ingestion are independently modulated by abdominal, but not oral thermoreceptors.» *J Appl Physiol* 116(8): 1088-95.
- Morrison SF, Nakamura K. 2011. «Central neural pathways for thermoregulation.» *Front Biosci (Landmark Ed)* 16: 74-104.
- Moyen NE, Ellis CL, Ciccone AB, Thurston TS, Cochrane KC, Brown LE, Coburn JW, Judelson DA. 2014. «Increasing relative humidity impacts low-intensity exercise in the heat.» *Aviat Space Environ Med* 85(2): 112-9.
- Mundel T, Jones DA. 2010. «The effects of swilling an L(-) menthol solution during exercise in the heat.» *Eur J Appl Physiol* 109(1):59-65.
- Mundel T, King J, Collacott E, Jones DA. 2006. «Drink temperature influences fluid intake and endurance capacity in men during exercise in a hot, dry environment.» *Exp Physiol* 91(5): 925–933.
- Murray B. 2007. «Hydration and physical performance.» *J Am Coll Nutr* 26:542-548.
- Nadel ER, Horvath SM, Dawson CA, Tucker A. 1970. «Sensitivity to central and peripheral thermal stimulation in man.» *J Appl Physiol* 29(5): 603-9.
- Nadel ER, Wenger CB, Roberts MF, Stolwijk JA, Cafarelli E. 1977. «Physiological defenses against hyperthermia of exercise.» *Ann N Y Acad Sci* 301:98-109.
- Naito K, Komori M, Kondo Y, Takeuchi M, Iwata S. 1997. «The effect of L-menthol stimulation of the major palatine nerve on subjective and objective nasal patency.» *Auris Nasus Larynx* 24: 159-162.
- Naito K, Ohoka E, Kato R, Kondo Y, Iwata S. 1991. «The effect of L-menthol stimulation of the major palatine nerve on nasal patency.» *Auris Nasus Larynx* 18(3): 221-6.

- Nielsen B, Hales JR, Strange S, Christensen NJ, Warberg J, Saltin B. 1993. «Human circulatory and thermoregulatory adaptations with heat acclimation and exercise in a hot, dry environment.» *J Physiol* 460: 467–85.
- Nishino T, Tagaito Y, Sakurai Y. 1997. «Nasal inhalation of l-menthol reduces respiratory discomfort associated with loaded breathing.» *Am J Respir Crit Care Med* 156:309-13.
- Nishino T, Tagaito Y, Sakurai Y. 1997. «Nasal inhalation of l-menthol reduces respiratory discomfort associated with loaded breathing.» *Am J Respir Crit Care Med* 156(1): 309-13.
- Noakes TD. 2012. «Fatigue is a brain-derived emotion that regulates the exercise behavior to ensure the protection of whole body homeostasis.» *Front Physiol* 3: 82.
- Noakes TD. 1998. «Maximal oxygen uptake: “Classical” versus “contemporary” viewpoints: A rebuttal.» *Med Sci Sports Exerc* 30: 1381–98.
- Nybo L. 2010. «Review: Cycling in the heat: performance perspectives and cerebral challenges.» *Scand J Med Sci Sports* 20(3): 71–79.
- Nybo L. 2008. «Hyperthermia and fatigue.» *J Appl Physiol* 104(3): 871-8.
- Nybo L, Møller K, Volianitis S, Nielsen B, Secher NH. 2002. «Effects of hyperthermia on cerebral blood flow and metabolism during prolonged exercise in humans.» *J Appl Physiol* 93(1): 58-64.
- Nybo L, Nielsen B. 2001. «Hyperthermia and central fatigue during prolonged exercise in humans.» *J Appl Physiol* 91:1055–1060.
- Olschewski H, Brück K. 1988. «Thermoregulatory, cardiovascular, and muscular factors related to exercise after precooling.» *J Appl Physiol* 64(2): 803-11.
- Onitsuka S, Zheng X, Hasegawa H. 2015. «Ice slurry ingestion reduces both core and facial skin temperatures in a warm environment.» *J Therm Biol* 51:105-9.

- Pageaux B, Lepers R, Dietz KC, Marcora SM. 2014. «Response inhibition impairs subsequent self-paced endurance performance.» *Eur J Appl Physiol* 114(5):1095-105.
- Pan R, Tian Y, Gao R, Li H, Zhao X, Barrett JE, Hu H. 2012. «Central mechanisms of menthol-induced analgesia.» *J Pharmacol Exp Ther* 343(3): 661-72.
- Parkin JM, Carey MF, Zhao S, Febbraio MA. 1999. «Effect of ambient temperature on human skeletal muscle metabolism during fatiguing submaximal exercise.» *J Appl Physiol* 86(3): 902-8.
- Patel T, Ishiujii Y, Yosipovitch G. 2007. «Menthol: a refreshing look at this ancient compound.» *J Am Acad Dermatol* 57(5): 873-8.
- Peiffer C, Poline JB, Thivard L, Aubier M, Samson Y. 2001. «Neural substrates for the perception of acutely induced dyspnea.» *Am J Respir Crit Care Med* 163(4): 951-7.
- Peiffer JJ, Abbiss CR. 2011. «Influence of environmental temperature on 40 km cycling time-trial performance.» *Int J Sports Physiol Perform* 6(2): 208-20.
- Peiffer JJ, Abbiss CR, Watson G, Nosaka K, Laursen PB. 2010. «Effect of cold water immersion on repeated 1-km cycling performance in the heat.» *J Sci Med Sport* 13: 112–116.
- Périard JD, Caillaud C, Thompson MW. 2011a. «Central and peripheral fatigue during passive and exercise-induced hyperthermia.» *Med Sci Sports Exerc* 43(9): 1657-65.
- Périard JD, Caillaud C, Thompson MW. 2012. «The role of aerobic fitness and exercise intensity on endurance performance in uncompensable heat stress conditions.» *Eur J Appl Physiol* 112(6): 1989-99.
- Périard JD, Cramer MN, Chapman PG, Caillaud C, Thompson MW. 2011b. «Cardiovascular strain impairs prolonged self-paced exercise in the heat.» *Exp Physiol* 96(2): 134-44.
- Périard JD, Thompson MW, Caillaud C, Quaresima V. 2013. «Influence of heat stress and exercise intensity on vastus lateralis muscle and prefrontal cortex oxygenation.» *Eur J Appl Physiol* 113(1): 211-22.

- Pryor RR, Suyama J, Guyette FX, Reis SE, Hostler D. 2015. «The effects of ice slurry ingestion before exertion in Wildland firefighting gear.» *Prehosp Emerg Care* 19(2): 241-6.
- Quod MJ, Martin DT, Laursen PB, Gardner AS, Halson SL, Marino FE, Tate MP, Mainwaring DE, Gore CJ, Hahn AG. 2008. «Practical precooling: effect on cycling time trial performance in warm conditions.» *J Sports Sci* 26(14): 1477-87.
- Racinais S, Périard JD, Karlsen A, Nybo L. 2015. «Effect of heat and heat acclimatization on cycling time trial performance and pacing.» *Med Sci Sports Exerc* 47(3): 601-6.
- Rasmussen P, Nybo L, Volianitis S, Møller K, Secher NH, Gjedde A. 2010. «Cerebral oxygenation is reduced during hyperthermic exercise in humans.» *Acta Physiol (Oxf)* 199(1):63-70.
- Raudenbush B, Grayhem R, Sears T, Wilson I. 2009. «Effects of peppermint and cinnamon odor administration on simulated driving alertness, mood and workload.» *N Am J Psychol* 11(2): 245-256.
- Riera F, Trong TT, Sinnapah S, Hue O. 2014. «Physical and perceptual cooling with beverages to increase cycle performance in a tropical climate.» *PLoS One* 9(8):e103718.
- Romanovsky AA. 2007. «Thermoregulation: some concepts have changed. Functional architecture of the thermoregulatory system.» *Am J Physiol Regul Integr Comp Physiol* 292: R37–R46.
- Ross ML, Garvican LA, Jeacocke NA, Laursen PB, Abbiss CR, Martin DT, Burke LM. 2011. «Novel precooling strategy enhances time trial cycling in the heat.» *Med Sci Sports Exerc* 43(1): 123-33.
- Ross ML, Jeacocke NA, Laursen PB, Martin DT, Abbiss CR, Burke LM. 2012. «Effects of lowering body temperature via hyperhydration, with and without glycerol ingestion and practical precooling on cycling time trial performance in hot and humid conditions.» *J Int Soc Sports Nutr* 9(1): 55.

- Ruskin DN, Anand R, LaHoste GJ. 2007. «Menthol and nicotine oppositely modulate body temperature in the rat.» *Eur J Pharmacol* 559(2-3):161-4.
- Saunders AG, Dugas JP, Tucker R, Lambert MI, Noakes TD. 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):241-55.
- Sawka MN, Chevront SN, Kenefick RW. 2012. «High skin temperature and hypohydration impair aerobic performance.» *Exp Physiol* 97(3): 327-32.
- Sawka MN, Montain SJ, Latzka WA. 2001. «Hydration effects on thermoregulation and performance in the heat.» *Comp Biochem Physiol A Mol Integr Physiol* 128(4): 679-90.
- Schäfer K, Braun HA, Isenberg C. 1986. «Effect of menthol on cold receptor activity. Analysis of receptor processes.» *J Gen Physiol* 88(6): 757-76.
- Schlader ZJ, Simmons SE, Stannard SR, Mündel T. 2011a. «Skin temperature as a thermal controller of exercise intensity.» *Eur J Appl Physiol* 111(8): 1631-9.
- Schlader ZJ, Stannard SR, Mündel T. 2011b. «Is peak oxygen uptake a determinant of moderate-duration self-paced exercise performance in the heat?» *Appl Physiol Nutr Metab* 36(6): 863-72.
- Schlader ZJ1, Simmons SE, Stannard SR, Mündel T. 2011c. «The independent roles of temperature and thermal perception in the control of human thermoregulatory behavior.» *Physiol Behav* 103(2):217-24.
- Schulze E, Daanen HA, Levels K, Casadio JR, Plews DJ, Kilding AE, Siegel R, Laursen PB. 2015. «Effect of thermal state and thermal comfort on cycling performance in the heat.» *Int J Sports Physiol Perform* 10(5): 655-63.
- Siegel R, Laursen PB. 2012. «Keeping your cool: possible mechanisms for enhanced exercise performance in the heat with internal cooling methods.» *Sports Med* 42(2): 89-98.

- Siegel R, Mate J, Brearley MB, Watson G, Nosaka K, Laursen PB. 2010. «Ice slurry ingestion increases core temperature capacity and running time in the heat.» *Med Sci Sports Exerc* 42: 717–725.
- Siegel R, Maté J, Watson G, Nosaka K, Laursen PB. 2012. «Pre-cooling with ice slurry ingestion leads to similar run times to exhaustion in the heat as cold water immersion.» *J Sports Sci* 30(2):155-65.
- Siegel R, Maté J, Watson G, Nosaka K, Laursen PB. 2011. «The influence of ice slurry ingestion on maximal voluntary contraction following exercise-induced hyperthermia.» *Eur J Appl Physiol* 111(10): 2517-24.
- St Clair Gibson A, Noakes TD. 2004. «Evidence for complex system integration and dynamic neural regulation of skeletal muscle recruitment during exercise in humans.» *Br J Sports Med* 38(6): 797-806.
- Stanley J, Leveritt M, Peake JM. 2010. «Thermoregulatory responses to ice-slush beverage ingestion and exercise in the heat.» *Eur J Appl Physiol* 110:1163–1173.
- Stevens CJ, Dascombe B, Boyko A, Sculley D, Callister R. 2013. «Ice slurry ingestion during cycling improves Olympic distance triathlon performance in the heat.» *J Sports Sci* 31(12): 1271-9.
- Taylor NAS. 2006. «Challenges to temperature regulation when working in hot environments.» *Industrial Health* 44, 331–344.
- Teunissen LP, de Haan A, de Koning JJ, Daanen HA. 2013. «Effects of wind application on thermal perception and self-paced performance.» *Eur J Appl Physiol* 113(7): 1705-17.
- Tucker R, Marle T, Lambert EV, Noakes TD. 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): 905-15.
- Tucker R, Rauch L, Harley YX, Noakes TD. 2004. «Impaired exercise performance in the heat is associated with an anticipatory reduction in skeletal muscle recruitment.» *Pflugers Arch* 448(4): 422-30.

- Turkevich D, Micco A and Reeves JT. 1988. «Noninvasive measurement of the decrease in left ventricular filling time during maximal exercise in normal subjects.» *Am J Cardiol* 62: 650–652.
- Turkevich D1, Micco A, Reeves JT. 1988. «Noninvasive measurement of the decrease in left ventricular filling time during maximal exercise in normal subject.» *Am J Cardiol* 62(9): 650-2.
- Tyler CJ, Sunderland C. 2011a. «Cooling the neck region during exercise in the heat.» *J Athl Train* 46(1): 61-8.
- Tyler CJ, Sunderland C. 2011b. «Neck cooling and running performance in the heat: single versus repeated application.» *Med Sci Sports Exerc* 43(12): 2388-95.
- Tyler CJ, Wild P, Sunderland C. 2010. «Practical neck cooling and time-trial running performance in a hot environment.» *Eur J Appl Physiol* 110(5):1063-74.
- Umezu T. 2009. «Evidence for dopamine involvement in ambulation promoted by menthone in mice.» *Pharmacol Biochem Behav* 91(3): 315-20.
- Uckert S, Joch W. 2007. «Effects of warm-up and precooling on endurance performance in the heat.» *Br J Sports Med* 41(6): 380-4.
- Umezu T, Sakata A, Ito H. 2001. «Ambulation-promoting effect of peppermint oil and identification of its active constituents.» *Pharmacol Biochem Behav* 69(3-4): 383-90.
- Villanova N, Azpiroz F, Malagelada JR. 1997. «Perception and gut reflexes induced by stimulation of gastrointestinal thermoreceptors in humans.» *J Physiol* 502 (1): 215-22.
- Voltaire B, Berthouze-Aranda S, Hue O. 2003. «Influence of a hot/wet environment on exercise performance in natives to tropical climate.» *J Sports Med Phys Fitness* 43: 306-11.
- Voltaire B, Galy O, Coste O, Racinais S, Callis A, Blonc S, Hertogh C, Hue O. 2002. «Effect of fourteen days of acclimatization on athletic performance in tropical climate.» *Can J Appl Physiol* 27: 551-62.

- Watson HR, Hems R, Rowsell DG, Spring DJ. 1978. «New compounds with the menthol cooling effect .» *J Soc Cosmet Chem* 29:185-200.
- Wegmann M1, Faude O, Poppendieck W, Hecksteden A, Fröhlich M, Meyer T. 2012. «Pre-cooling and sports performance: a meta-analytical review.» *Sports Med* 42(7): 545-64.
- Wendt D, van Loon LJ, Lichtenbelt WD. 2007. «Thermoregulation during exercise in the heat: strategies for maintaining health and performance.» *Sports Med* 37(8): 669-82.
- Yeo ZW, Fan PWP, Nio AQX, Byrne C, Lee JKW. 2012. «Ice slurry on outdoor running performance in heat.» *Int J Sports Med* 33: 859–866.
- Yosipovitch G, Szolar C, Hui XY, Maibach H. 1996. «Effect of topically applied menthol on thermal, pain and itch sensations and biophysical properties of the skin.» *Arch Dermatol Res* 288(5-6): 245-8.

**PARTIE TROISIEME :**

**ANNEXES**



## 1. Les paramètres psychologiques

### Sensation thermique

<b>Description</b>	<b>Valeur numérique</b>
Frais	1
Neutre	2
Légèrement	3
Chaud	4
Très chaud	5
Très très chaud	6
Etouffante	7

### Confort thermique

<b>Description</b>	<b>Valeur numérique</b>
Confortable	1
Légèrement inconfortable	2
Inconfortable	3
Très inconfortable	4

## Niveau de difficulté perçu

Description	Valeur numérique
Pas du tout effort	6
Extrêmement légère	7
	8
Très légère	9
	10
Légère	11
	12
Assez dur	13
	14
Dur (lourd)	15
	16
Très dur	17
	18
Extrêmement dur	19
Effort maximal	20

## **2. Les publications**

**Publication 1**

**Publication 2**

**Publication 3**



# Physical and Perceptual Cooling with Beverages to Increase Cycle Performance in a Tropical Climate

Florence Riera\*, Than Tran Trong, Stéphane Sinnaph, Olivier Hue

Laboratoire ACTES - EA 3596, Université des Antilles et de la Guyane Campus de Fouillole, Point à Pitre, France

## Abstract

**Purpose:** This study compares the effects of neutral temperature, cold and ice-slush beverages, with and without 0.5% menthol on cycling performance, core temperature ( $T_{co}$ ) and stress responses in a tropical climate (hot and humid conditions).

**Methods:** Twelve trained male cyclists/triathletes completed six 20-km exercise trials against the clock in  $30.7^{\circ}\text{C} \pm 0.8^{\circ}\text{C}$  and  $78\% \pm 0.03\%$  relative humidity. Before and after warm-up, and before exercise and every 5 km during exercise, athletes drank 190 mL of either aromatized (i.e., with 0.5 mL of menthol (5 gr/L)) or a non-aromatized beverage (neutral temperature:  $23^{\circ}\text{C} \pm 0.1^{\circ}\text{C}$ , cold:  $3^{\circ}\text{C} \pm 0.1^{\circ}\text{C}$ , or ice-slush:  $-1^{\circ}\text{C} \pm 0.7^{\circ}\text{C}$ ). During the trials, heart rate (HR) was continuously monitored, whereas core temperature ( $T_{co}$ ), thermal comfort (TC), thermal sensation (TS) and rate of perceived exertion (RPE) were measured before and after warm-up, every 5 km of exercise, and at the end of exercise and after recovery.

**Results:** Both the beverage aroma ( $P < 0.02$ ) and beverage temperature ( $P < 0.02$ ) had significant and positive effects on performance, which was considerably better with ice-slush than with a neutral temperature beverage, whatever the aroma ( $P < 0.002$ ), and with menthol vs non-menthol ( $P < 0.02$ ). The best performances were obtained with ice-slush/menthol and cold/menthol, as opposed to neutral/menthol. No differences were noted in HR and  $T_{co}$  between trials.

**Conclusion:** Cold water or ice-slush with menthol aroma seems to be the most effective beverage for endurance exercise in a tropical climate. Further studies are needed to explore its effects in field competition.

**Citation:** Riera F, Trong TT, Sinnaph S, Hue O (2014) Physical and Perceptual Cooling with Beverages to Increase Cycle Performance in a Tropical Climate. PLoS ONE 9(8): e103718. doi:10.1371/journal.pone.0103718

**Editor:** Naoyuki Hayashi, Tokyo Institute of Technology, Japan

**Received:** March 13, 2014; **Accepted:** July 6, 2014; **Published:** August 1, 2014

**Copyright:** © 2014 Riera et al. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original author and source are credited.

**Data Availability:** The authors confirm that all data underlying the findings are fully available without restriction. All relevant data are within the paper and its Supporting Information files.

**Funding:** The authors have no support or funding to report.

**Competing Interests:** The authors have declared that no competing interests exist.

\* Email: florence.riera@gmail.com

## Introduction

Cyclic aerobic exercise performance is negatively affected by a hot environment; this has been demonstrated for running [1] and cycling, although it depends somewhat on the race [2]. The negative effects are even more marked in a hot and humid environment (i.e., the so-called tropical climate) because the evaporative processes are limited [3,4]. Although the exact causes are not well known, explanations related to hyperthermia and/or dehydration have been proposed. During exercise, if heat storage cannot be limited (because of the failure of evaporative processes), the core temperature may limit the exercise [5] or the brain may provoke a voluntary cessation of effort – or a reduction of its intensity – to maintain thermal homeostasis [6]. A large volume of sweat loss can also gradually reduce blood and stroke volumes if not replaced, which tends to limit muscle blood flow [7].

Pre-cooling and cooling protocols, such as water immersion and cold air exposure, are among the strategies used to decrease the deleterious effect of the hot environment on aerobic performance. Although they may be successful, they are time-consuming and logistically very difficult to apply in real sports contexts [8,9]. Thus in order to reduce core temperature [10], cold fluid consumption

thus may be the most appropriate strategy [8] in a hot environment. In a systematic review, Burdon et al. [11] noted that, although the findings are mixed, cold fluids generally seem to attenuate the core temperature and improve exercise performance in the heat. Recently, studies have demonstrated a more efficient effect of ice slurry (*vs* cold water) on running and cycling performances [8,12] and this may be a practical and effective pre-competition maneuver to improve performance in warm and humid conditions [13].

Menthol is a compound of plant origin (*Mentha*) that specifically stimulates cold receptors and, when applied to the skin and mucosal surfaces, exerts a cooling sensation similar to the action of spraying cold water on the face [14]. The mucous membranes of the oropharyngeal cavity are especially sensitive to menthol. When administered orally, menthol enhances cold sensations in the mouth and modulates taste-receptor activity [15]. It has been suggested that by stimulating the major palatine nerve, oral administration of menthol might also directly influence the nasal sensation of airflow [16]. Indeed, oral administration of a menthol lozenge caused a subjective sensation of improved airflow without actual changes in airway resistance [14]. Eccles [17]

summarized these findings by noting that menthol may influence thirst, the drive to breathe and arousal due to its effects on oral and nasal cold receptors. Menthol might therefore also be used to help exercise performance in a hot climate [18]. It was recently demonstrated that swilling an L(-) menthol solution increased the exercise cycling time, suggesting that a change in oropharyngeal temperature perception during exercise in the heat positively affects endurance capacity [18] and the sense of effort. However, the cumulative effects of cold water/ice-slush and menthol ingestion on performance in the heat have never been studied.

In the present study, we thus tested the hypothesis that an ice-slush/menthol or a cold/menthol beverage would improve performance in the heat more than non-cumulative drinks (cold, ice-slush, neutral or menthol drinks).

## Methods

### Subjects

Twelve heat-acclimated trained (i.e., living and training in Guadeloupe) male cyclists and triathletes participated in the study (age =  $42 \pm 13$  years; body mass =  $74.0 \pm 6.1$  kg; height =  $180.0 \pm 8.3$  cm;  $\dot{V}O_{2\max} = 59.9 \pm 10.4$  mL.min<sup>-1</sup>.kg<sup>-1</sup>; peak power output at  $\dot{V}O_{2\max} = 340 \pm 42$  W). The athletes were training at least 10 hours per week at the time of study. The study was approved by the Ethics Committee of the Centre Médico-Sportif in Guadeloupe (Ministry of Youth and Sports) and the Ethics Committee of the Training and Research in Sport Science Unit in Guadeloupe (Ministry of Higher Education and Research). All athletes completed a medical screening questionnaire and gave written informed consent prior to the study, which was accepted by the University Ethics Committee and was conducted according to the Declaration of Helsinki.

### Preliminary measurements

On the athletes' first visit to the laboratory, maximum aerobic capacity ( $\dot{V}O_{2\max}$ ) was measured during an incremental exercise test on an electronically braked cycle ergometer (TECHMED, TM 4170, Besancon, France). The initial workload was 30 W and increased by 30 W every minute until volitional fatigue. Gas exchange was measured throughout the entire test (ZAN Ferraris, Cardiorespiratory System, Oberthulba, Germany). The  $\dot{V}O_{2\max}$  was achieved when two of the following criteria were met: (1)  $\dot{V}O_2$  did not increase with an increase in intensity, (2) a clear plateau in oxygen uptake was seen, (3) HR was within 10 beats.min<sup>-1</sup> of the age-predicted maximum of 220 - age, and (4) the respiratory exchange ratio (RER) was greater than 1.05. All the triathletes and cyclists were accustomed to this type of test but nevertheless participated in a trial to familiarize themselves with the protocol for the experimental trials, using their own bicycle fixed on a cycle trainer (Tacx Satori T1856, Tacx BV, Wassenaar, the Netherlands). The familiarization trial was performed under neutral environmental conditions ( $23^\circ\text{C} \pm 0.5^\circ\text{C}$  and  $59.9 \pm 9\%$  relative humidity (RH)).

### Experimental design

The experimental trials were separated by 3–7 days and were undertaken in a randomized crossover design. Athletes were also asked to limit their exercise to 60 minutes of light-intensity exercise the day before each trial. At the start of the trial days, the athletes consumed a standard breakfast that included food and 600 mL of beverage. The trials began at the same time of day for each athlete (between 14:00 and 16:30) to control for circadian variations in  $T_{co}$  and digestion control. During the trials, the

athletes wore cycling shorts, a chest-strapped heart rate monitor, a cycling jersey, socks and shoes.

### Experimental procedures

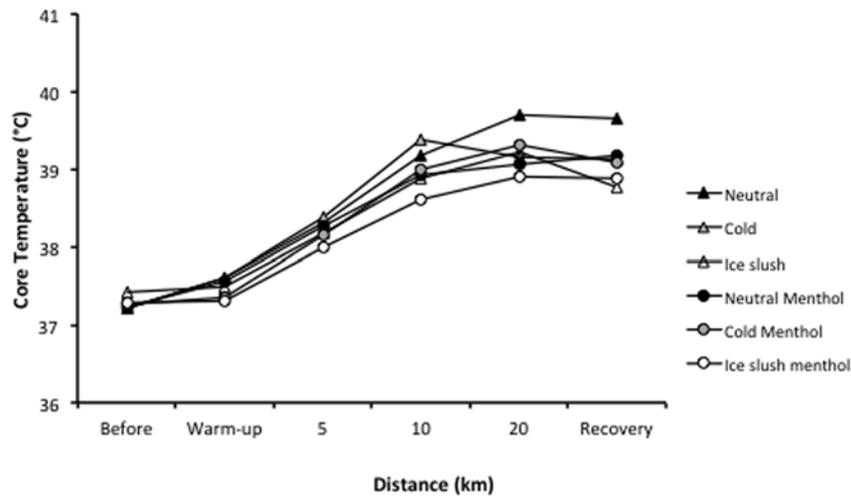
The experimental trials were performed in a laboratory in the tropical conditions of Guadeloupe, French West Indies (mean  $\pm$  SD temperature in laboratory:  $30.7^\circ\text{C} \pm 0.8^\circ\text{C}$  and  $78\% \pm 0.03\%$  RH). During the sessions, athletes were not subjected to any flow of ambient air. Heart rate (HR) was monitored continuously using a portable telemetry unit (Suunto Memory Belt, Suunto, Vantaa, Finland) recording it every 5 seconds, and the data were analyzed with Suunto software. The core temperature ( $T_{co}$ ) was assessed via the gastrointestinal temperature using ingestible temperature measurement pills (CorTemp, HQ, Inc., Palmetto, FL, USA). Athletes were instructed to ingest these pills 8 to 10 h before all experimental trials to ensure the pill was out of the stomach, thereby avoiding variability in  $T_{co}$  due to pill movement or fluid/food consumption. The experimental trial included 15 min of warm-up, with cycling at a freely chosen cadence against a resistance related to the mean power output noted at the first ventilatory threshold (i.e.,  $178 \text{ W} \pm 45 \text{ W}$ ), followed by 20 km of exercise at the fastest possible speed against a resistance related to their mean power output noted at the second ventilatory threshold (i.e.,  $335 \text{ W} \pm 90 \text{ W}$ ), and then 15 min of recovery at the warm-up resistance level. Subjects were required to cycle in a cadence-independent mode. During the experimental trial,  $T_{co}$  was measured before and after warm-up, every 5 km during the 20-km cycle time trial, at the end of cycling, and after the recovery phase.

During the experimental trials, athletes were asked to drink 190 mL of a randomly assigned beverage as fast as possible before warm-up, at the beginning of the time trial, every 5 km of exercise, at the end of the trial and at the end of the recovery. The six experimental trials were as follows: a neutral or a menthol aroma beverage at one of three temperatures: (1) neutral ( $23^\circ\text{C} \pm 0.1^\circ\text{C}$ ), (2) cold ( $3^\circ\text{C} \pm 0.1^\circ\text{C}$ ) or ice-slush ( $-1^\circ\text{C} \pm 0.7^\circ\text{C}$ ). The menthol beverages used a 0.01% natural menthol aroma (% vol: 86.0%  $\pm 1.0\%$ ; dosage: 0.50/g/L) (Robertet, Grasse, France).

The ice-slush was produced with an ice-slush machine (Brema, GB 902A, Professional Slush Machine, Ice Makers, Germany). Although ice expands in volume, we carefully ensured that the volume of ice-slush (in mL of water) was precisely the same as the volume of cold water. The temperature of each beverage was measured with a digital thermometer (YSI 409B, Yellow Springs Instruments, OH, USA). A spoon was provided to aid ingestion of the ice-slush.

### Measurements

Before and after warm-up and every 5 km of the trial,  $T_{co}$ , perceived exertion (RPE), perceived thermal sensation (TS), and perceived thermal comfort (TC) were recorded. Before the athletes drank 190 mL of neutral, cold or ice-slush beverage (with or without menthol),  $T_{co}$  was recorded and they were asked to rate their perceived exertion on the 15 grades of the Borg perceived exertion scale [19]. Perceived thermal sensation and perceived thermal comfort were determined on seven-point (a modified 7-point scale ranging from "extremely cold" (1) to "extremely hot" (7)) and four-point (a modified 4-point scale ranging from "comfortable" (1) to "very uncomfortable" (4)) scales adapted from Hodder and Parsons [20]. The RPE, TS and TC were assessed every 5 km and immediately at the end of the trial. Nude body mass was assessed ( $\pm 0.1$  kg) before and after the 20-km sessions (Tanita SC 330P, Tanita, Amsterdam, the Netherlands). An indication of hydration status throughout the experimental



**Figure 1. Core temperature (°C) before and after warm-up; at 5-km, 10-km and 20-km of the experimental trials; and during recovery.** Mean values are shown.

doi:10.1371/journal.pone.0103718.g001

trials was later determined by changes in nude body mass. During the session, athletes drank 1140 mL of beverage.

### Statistical analyses

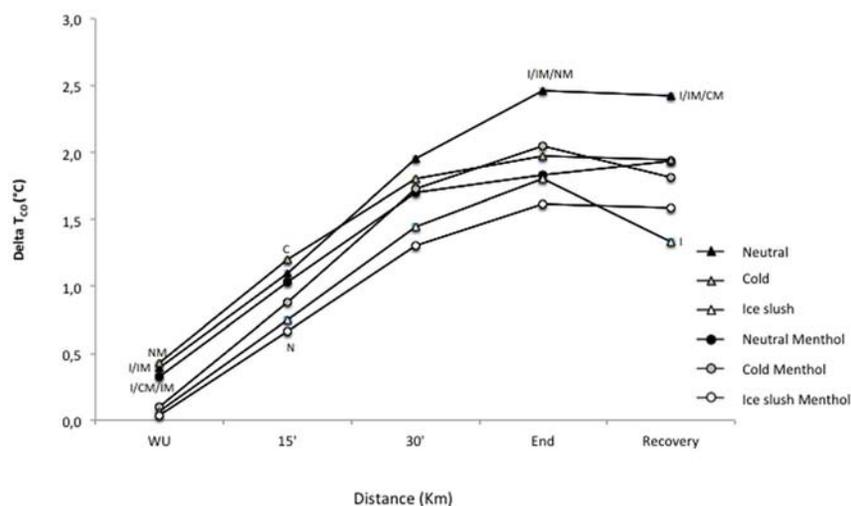
We tested for normality using Skewness and Kurtosis tests, with acceptable Z values not exceeding +1 or -1. Once the assumption of normality was confirmed, parametric tests were performed. The following variables:  $T_{co}$ , performance, HR, TC, TS and RPE, were examined along with three-way analyses of variance (ANOVA) with repeated measures (beverage condition x beverage temperature x time). Scheffé's post-hoc tests were used when required. Data analysis was performed using the Statistical Package for Social Sciences (SPSS) (Chicago, IL, USA). Significance was set at the  $P < 0.05$ . All data are presented as mean  $\pm$  SD.

### Results

#### Core temperature ( $T_{co}$ )

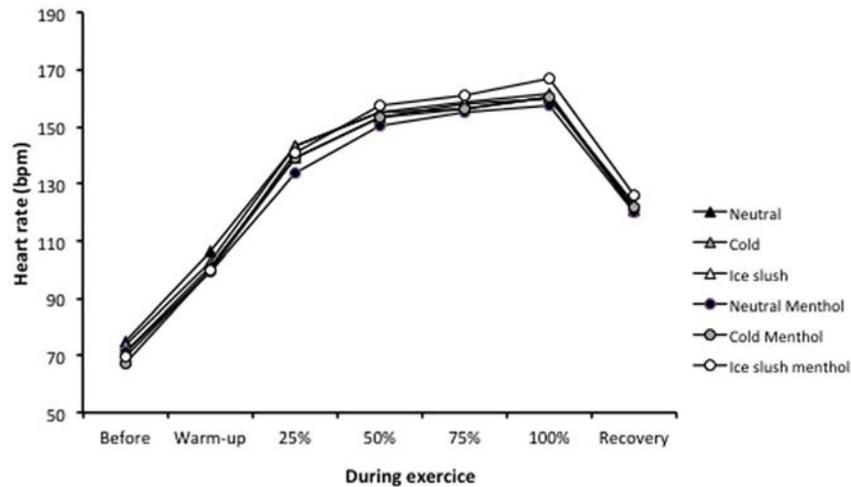
There was no significant difference in the mean  $T_{co}$  noted in the six experimental sessions before exercise ( $37.3 \pm 0.1^\circ\text{C}$ ), during warm-up ( $37.5 \pm 0.1^\circ\text{C}$ ) or during recovery ( $39.1 \pm 0.3^\circ\text{C}$ ) (Figure 1). There was no aroma or temperature effect on  $T_{co}$  but a tendency ( $P < 0.07$ ) toward a temperature x time effect, with  $T_{co}$  increasing less in the ice-slush than the neutral condition (Figure 1).

When the delta  $T_{co}$  (i.e., the increase in  $T_{co}$  with time) was analyzed, it showed a tendency toward a beverage temperature effect ( $P < 0.06$ ) with a significantly lower delta  $T_{co}$  in ice-slush *vs* neutral condition ( $P < 0.05$ ). Moreover, a significant aroma x temperature x time effect was noted ( $P < 0.02$ ) for the delta  $T_{co}$  (Figure 2).



**Figure 2. Delta core temperature (°C) after warm up; at 5-km, 10-km and 20-km of the experimental trials; and during recovery.** Significant ( $P < 0.05$ ) differences are represented by letters (N: different from neutral, C: different from cold, I: different from Ice, NM: different from Neutral-Menthol, IM: different from Ice-Menthol, CM: different from Cold-Menthol, I/IM: different from both Ice and Ice-Menthol, I/NM/IM: different from Ice, Neutral-Menthol and Ice-Menthol, I/CM/IM: different from Ice, Cold-Menthol and Ice-Menthol).

doi:10.1371/journal.pone.0103718.g002



**Figure 3. Heart rate (beats·min<sup>-1</sup>) before and during warm-up; at 25%, 50%, 75% and 100% of the cycling times; and during recovery.**

doi:10.1371/journal.pone.0103718.g003

### Heart rate

HR increased significantly from warm-up until the end of exercise (20 km) and then decreased similarly in the six conditions (time effect  $P < 0.001$ ). HR was significantly affected by aroma x time ( $P < 0.05$ ) (Figure 3).

### Performance

Mean performance was significantly affected by both the aroma condition (performance (time in seconds):  $2130 \pm 246$  s and  $2250 \pm 288$  s, in menthol and non-menthol, respectively;  $P < 0.02$ ) and the temperature condition ( $P < 0.02$ ), with a significant difference ( $P < 0.002$ ) between neutral ( $2253 \pm 240$  s) and ice-slush ( $2100 \pm 280$  s) (Figure 4).

The post-hoc analysis demonstrated significantly better performance for both cold/menthol and ice-slush/menthol as opposed to neutral ( $P < 0.05$  and  $P < 0.03$ , respectively), neutral/menthol ( $P < 0.05$  and  $P < 0.007$ , respectively) and cold ( $P < 0.003$  and  $P < 0.007$ , respectively) (Figure 4). When analyzed by 5-km bouts (Figure 4), performance, which was significantly better in the menthol condition ( $P < 0.04$ ), was affected by both time ( $P < 0.02$ )

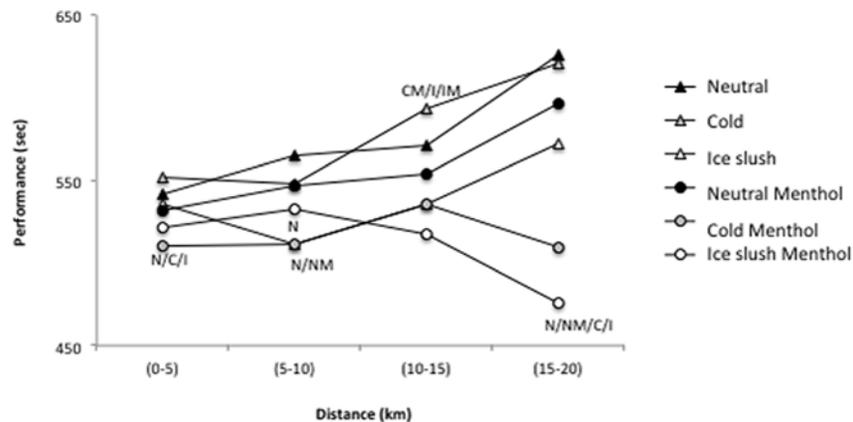
and temperature ( $P < 0.005$ ) with significantly better results in ice-slush *vs* neutral condition ( $P < 0.003$ ). As noted in Figure 2, performance showed a significant aroma x time effect ( $P < 0.01$ ), with the time over the 5-km bouts increasing, except in the cold/menthol and ice-slush/menthol conditions.

### Environmental conditions, weight and hydration status

The mean  $\pm$  SD ambient temperature was similar between trials ( $30.7^\circ\text{C} \pm 0.8^\circ\text{C}$ ), as was relative humidity ( $78\% \pm 0.03\%$ ). Athletes were instructed to consume 190 mL of beverage before exercise, 760 mL during the 20 km, and 190 mL after the recovery. The athletes' body mass was not different before sessions (mean sessions  $\pm$  SD:  $72.0 \pm 3.2$  kg) but decreased similarly after sessions (mean sessions  $\pm$  SD:  $70.6 \pm 0.3$  kg).

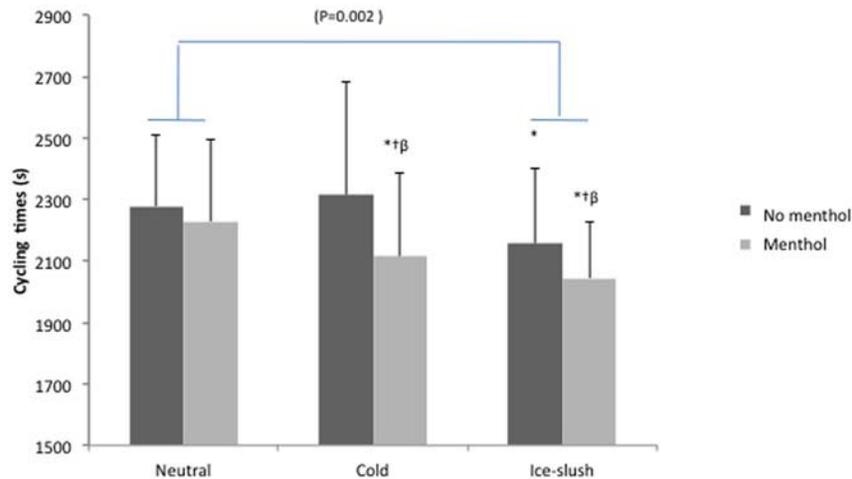
### Thermal sensation, comfort sensation and RPE

There were no significant differences in TS, CS, or RPE, with all of them increasing with time. TS was significantly affected by aroma x time (means  $\pm$  SD at the end of exercise; no menthol:  $3.5 \pm 0.5$ ; menthol:  $3.7 \pm 0.3$ ;  $P < 0.02$ ).



**Figure 4. Mean cycling distance (km) by 5-km blocks.** Differences are represented by letters (N: different from neutral, C: different from cold, I: different from Ice, NM: different from Neutral-Menthol, IM: different from Ice-Menthol, CM: different from Cold-Menthol, I/IM: different from both Ice and Ice-Menthol, I/NM/IM: different from Ice, Neutral-Menthol and Ice-Menthol, I/CM/IM: different from Ice, Cold-Menthol and Ice-Menthol).

doi:10.1371/journal.pone.0103718.g004



**Figure 5. Cycling times (seconds) for the 20-km trial with ingestion of water at neutral, cold and ice-slush temperatures, with or without the water containing 0.05% L(-) menthol.** Mean values and SD are shown. \* significantly different from Neutral ( $P < 0.01$ ), † significantly different from Neutral-Menthol ( $P < 0.01$ ), and β significantly different from water Cold-Menthol ( $P < 0.01$ ). doi:10.1371/journal.pone.0103718.g005

## Discussion

The most important findings of our study were that (1) performance was better using ice-slush than neutral temperature beverage, whatever the aroma, (2) performance was better with menthol, whatever the beverage temperature, and (3) the best performances were obtained with combinations of either ice-slush with menthol or cold water with menthol.

### Water temperature effect

The lack of a significant difference in performance between the effects of cold and neutral water has not been fully elucidated. Indeed, Lee et al. [21] demonstrated longer exercise times and lower rectal temperatures when subjects drank cold water ( $4^{\circ}\text{C}$ ) as opposed to warm beverages [ $37^{\circ}\text{C}$ ] during cycling to exhaustion in a hot environment. Burdon et al. [22] noted a positive effect of cold beverages on cycling performance, and in a recent review Burdon et al. [11] concluded that cold beverages attenuate core temperature rise and improve exercise performance in the heat. However, other studies have failed to observe any difference between cold water and ambient water intake [23,24].

The explanations for the lack of significant results are numerous and include the use of unacclimatized and/or not well-trained athletes [25], insufficient exercise intensity stimulus (i.e.,  $< 60\% \dot{V}O_{2\max}$ ), insufficient environmental stress [11], and insufficiently cold water [11]. The effect of a single bolus versus serial ingestion seems less clear: Lee et al. [1,21] found no difference in the exercise performance of subjects drinking 400 mL of  $10^{\circ}\text{C}$  or  $37^{\circ}\text{C}$  fluids every 15 min of exercise or 1L in a single bolus at 50–60 min of exercise, but they demonstrated significant effects following the intake of a beverage at  $4^{\circ}\text{C}$  drunk in a large bolus before exercise and 100 mL every 10 min of exercise [24]. Very recently, we demonstrated significant effects on core temperature and HR in swimmers drinking 190 mL of  $1.3^{\circ}\text{C}$  water (i.e., vs  $26.5^{\circ}\text{C}$ ) every 15 min of steady-pace exercise. The most likely explanation for our findings is that studies using fixed-intensity exercise have usually noted an increase in performance with cold water [18,24], whereas studies using self-paced exercise have not [23,24]. Indeed, our athletes were well trained ( $\dot{V}O_{2\max}$  of  $59.9 \text{ ml}\cdot\text{min}^{-1}\cdot\text{kg}^{-1}$ ), the 20-km exercise was performed at a

power output of  $335 \pm 90 \text{ W}$ , and the environmental stress was high.

The performance was increased with ice-slush compared with neutral temperature water. Moreover, the ice-slush tended to increase performance more than the cold beverage. This agrees with the literature: Siegel et al. [26] demonstrated that a pre-cooling beverage of  $-1^{\circ}\text{C}$  ice slurry increased submaximal endurance running time in the heat, compared with a pre-cooling beverage of  $4^{\circ}\text{C}$  water. Ihsan et al. [8] noted the same for 40-km cycling time-trial performance and Yeo et al. [13] for 10-km outdoor running. However, whereas these authors [20,36,39] noted lower core temperature before or during the first parts of exercise, we failed to see any significant difference between ice-slush or cold and neutral temperature water ingestion before and during exercise. This confirms the recent findings of Morris et al. [27], who observed no change in rectal or aural canal temperature when subjects were given that subjects either had to drink or were directly given in the stomach water at different temperatures to drink or water delivered directly to the stomach, and confirms the limitations of using thermometry to estimate body heat storage during exercise [28]. We can therefore also hypothesize that because performance was increased with the ingestion of ice-slush, the metabolic rate also increased, with the subjects producing more heat than during slower sessions. The combined effect of increased performance and ice-slush ingestion was a constant  $T_{co}$ . This also strongly suggests that ice-slush could increase exercise performance in a tropical climate without any detectable changes in  $T_{co}$ .

The cooling mechanism with the help of an icy beverage is the same as that of cooling with a cold beverage: a truly cold (very cold or ice-slush) beverage interferes with the rise in core temperature, which makes it possible to increase exercise intensity without increasing HR and core temperature, as partially noted in previous works [8,13,29]. The smaller increase in core temperature, due to cold/ice-slush ingestion (i.e., vs neutral or cold) prevents immediate blood flow redistribution to the skin, thus allowing greater blood flow to the exercising muscles. This effect could be more powerful with an ice-slush ingestion, as noted by Siegel [26], because (1) the larger heat sink created by the ingestion of the ice slurry yields bigger heat-storing capacity than liquid  $\text{H}_2\text{O}$  alone [12] and (2) given that an ice slurry is ingested

through the mouth, it has been hypothesized that it might increase brain cooling via direct heat exchange with blood in the carotid arteries [12], thus delaying the critically high brain temperatures that start both the inhibitory signal to motor control centers [30] and the cardiovascular adjustments due to  $T_{co}$  increase. However, such a mechanism was recently contested by Morris et al. [27], who suggested that a more likely mechanism would be that the thermoreceptors independently modulating sudomotor output probably reside in the abdominal area (i.e., the stomach). The significant effect of ice-slush would therefore be the following: with a temperature lower than that of cold water, ice-slush creates a larger heat sink and thus better reducing whole-body water loss, as has been suggested [27]. This in turn would positively influence the thermoreceptors in the stomach and limit the blood flow redistribution that accompanies the sudomotor activity, thereby allowing greater blood flow for exercising muscles. However, because we did not measure sweating or skin blood flow, this explanation remains speculative. A potential sensory effect of ice-slush in the mouth or oropharyngeal area may also explain the benefits of ice-slush. Indeed, although Morris et al. [27] demonstrated that local sweat production was activated following fluid delivered directly to the stomach, but not when the beverage was swilled, suggesting that, independently of core and skin temperature, the thermoreceptors modulating the sudomotor output during fluid ingestion probably reside in the abdominal area and not in the mouth, Eccles [31] reported that cold water increased thirst satiety via sensory cold receptors in the oropharynx and Guest *et al.* demonstrated that responsive regions of the human brain are also activated by intra-oral thermal stimulation [32].

In our study, it might further be hypothesized that the rate of the core temperature increase was a primary signal for pacing the cycling trials, as this rate was lowest in the ice-slush trial (Figure 5). However, the literature has reported similar rates (but better performance) with and without pre-cooling [33].

The present study is the first to demonstrate a significant effect of menthol use (i.e., as drink administration) on sports performance, whatever the beverage temperature. Other researchers have demonstrated the beneficial effects of menthol in subjects swilling an L(-) menthol solution during exercise in the heat [18], while still others have recorded subject reports of feeling cooler [34]. Yet the mechanism of the menthol effect is far from evident. Green [15] postulated that when administered orally, menthol provokes the sensation of cooling by making subsequent stimuli (inspired air, water consumed) feel cool, and oral administration of a menthol lozenge caused a subjective sensation of improved airflow. Eccles [17] also suggested that menthol may mimic the cool stimulus associated with ingestion of cold water. One of the possible mechanisms that would explain the better performance using menthol versus neutral aroma is that menthol provided a cooling sensation that was perceived as refreshing and stimulating [18], thus decreasing the RPE. One might also point out that if menthol indeed enhances sensation airflow [16], it could prevent heat-induced hypocapnia and the reduction in cerebral blood flow [30] usually has a positive effect on central fatigue. Indeed, there is some evidence that heat stress results in hyperventilation, which lowers the carbon dioxide tension and consequently reduces the cerebral blood flow [30], inducing cerebral fatigue. Inhibiting the drive to breathe because of its interaction with airway cold receptors [17], menthol may therefore limit hyperventilation, reducing hypocapnia, and by extension cerebral fatigue. However, it is difficult to explain how athletes were able to obtain better performances with menthol without any change in their HR. Although heat sensations did not prevent them from cycling (i.e.,

menthol provokes cold sensations), cycling at higher intensity should have induced an increase in HR (i.e., given that the water intake, the environmental conditions and the water losses were the same in all trials). We suggest that thermoreceptors in the hypothalamus do not detect increases in temperature because of these menthol effects and thus no inhibitory signal is sent to the motor control centers [30]. This might also prevent the redistribution of blood from the core to the periphery, with adequate cardiac output being maintained. The result would be better performance than during the non-menthol condition without any change in HR (the cardiac output not being maintained in the non-menthol condition due to hyperthermic afferences). If this hypothesis is correct, we should have noted higher  $T_{co}$  in the menthol conditions (the menthol would trick the hypothalamic thermoreceptors, giving the sensation of cold, but not prevent the core temperature from increasing), which was not the case.

### Sensations

Psychological effects have a strong influence [35] on performance in a warm environment. Although some studies have demonstrated lower rates of perceived exertion or lower thermal sensations using ice [12,13] or cold water cooling or menthol [18], others have not [29]. In the present study, we observed no significant difference in thermal sensation, thermal comfort or RPE across beverage temperatures, aroma, or beverage temperature x aroma, with these three parameters increasing over time. One explanation is that, despite the lower thermal sensation, thermal comfort and RPE under conditions of menthol and/or ice-slush beverage, with the increases in exercise intensity/performance, these three parameters remained unchanged, as hypothesized by Wegmann [35].

Specifically, the lack of change in RPE despite significantly better performance suggests an effect of both menthol and ice as physiological and/or psychological signals that combine to produce self-paced effort. Indeed, RPE has been demonstrated to be a powerful feed-forward control mechanism [36] that linearly increases with intensity in controlled conditions.

### Menthol x temperature beverages

Post-hoc analysis demonstrated significantly better performance in two conditions, ice-slush/menthol and cold/menthol beverages, indicating a strong and significant effect of combined low temperature/menthol on performance in tropical environment. When compared with the neutral condition (i.e., neutral temperature with no menthol), ice-slush/menthol and cold/menthol increased performance times by 10.2% and 7.1%, respectively, which is substantial compared with the effects of other cooling strategies in similar time-trial exercise (i.e., 1.3% for Ross et al. [37] and 6.5% for Ihsan et al. [8] during cycling; 0.5% for Yeo et al. [13] for running). This better time performance was overexpressed in the last part of the exercise (i.e., between the 15<sup>th</sup> and 20<sup>th</sup> kilometer, with 24.1% and 18.6% increases for ice-slush/menthol and cold/menthol, respectively, compared with neutral). The use of cold/menthol or ice-slush/menthol beverages during time trials in a tropical climate thus seems a good strategy to enhance performance. However, the debate remains open about the amount of water that should be drunk. As reported by Burdon et al. [11], fluid ingestion protocols vary widely, from regular consumption of a standardized bolus not adjusted for body weight or body surface [22,23] to ad libitum consumption [29] or a large single bolus at one point during exercise [24]. From a physiological point of view, consuming large amounts of cold fluid is believed to create a heat sink, which should theoretically result in

the attenuation of the heat accumulated over exercise and reduce the rise in  $T_{co}$ . However, athletes do not usually drink large volumes of water in one bolus but instead drink intermittently over the course of the exercise [38]. Moreover, it has been demonstrated that emptying is more rapid with smaller volumes [8], resulting in more rapid rehydration, as in the present study.

## Conclusion

The present study demonstrated an increase in performance using menthol or ice-slush beverage, the best performances being obtained with cold/menthol and ice-slush/menthol solutions. The mechanisms involved in these results remain undiscovered because, as noted by Cheung [39], “understanding or defining the signal, or signals, that becomes integrated to produce self-paced effort is a difficult problem to elucidate, as it is most likely an

amalgam of physiological and psychological sources and further mediated by individual factors and core temperature itself would appear to be an obvious signal.”.

Further studies are needed to elucidate the performance increase induced by menthol.

## Acknowledgments

The authors would like to acknowledge and thank the athletes for their generous time commitment and effort throughout the study.

## Author Contributions

Conceived and designed the experiments: FR. Performed the experiments: TT. Analyzed the data: OH. Contributed reagents/materials/analysis tools: SS. Contributed to the writing of the manuscript: FR.

## References

- Maughan RJ (2010) Distance running in hot environments: A thermal challenge to the elite runner. *Scand J Med Sci Sports* 20 Suppl 3: 95–102.
- Nybo L (2010) Cycling in the heat: Performance perspectives and cerebral challenges. *Scand J Med Sci Sports* 20 Suppl 3: 71–9.
- Hue O (2011) The challenge of performing aerobic exercise in tropical environments: Applied knowledge and perspectives. *Int J Sports Physiol Perform* 6: 443–54.
- Voltaire B, Galy O, Coste O, Recinais S, Callis A, et al. (2002) Effect of fourteen days of acclimatization on athletic performance in tropical climate. *Can J Appl Physiol* 27: 551–62.
- González-Alonso J, Teller C, Andersen SL, Jensen FB, Hyldig T, et al. (1999) Influence of body temperature on the development of fatigue during prolonged exercise in the heat. *J Appl Physiol* 86: 1032–9.
- Noakes TD (1998) Maximal oxygen uptake: “Classical” versus “contemporary” viewpoints: A rebuttal. *Med Sci Sports Exerc* 30: 1381–98.
- González-Alonso J (2007) Hyperthermia impairs brain, heart and muscle function in exercising humans. *Sports Med* 37: 371–3.
- Ihsan M, Landers G, Brearley M, Peeling P (2010) Beneficial effects of ice ingestion as a precooling strategy on 40-km cycling time-trial performance. *Int J Sports Physiol Perform* 5: 140–51.
- Marino FE (2002) Methods, advantages, and limitations of body cooling for exercise performance. *Br J Sports Med* 36(2):89–94.
- Hue O, Monjo R, Lazzaro M, Baillot M, Hellard P, et al. (2013) The effect of time-of-day on cold water ingestion by high-level swimmers in tropical climate. *Int J Sports Physiol Per* 8: 442–451.
- Burdon CA, O'Connor HT, Gifford JA, Shirreffs SM (2010) Influence of beverage temperature on exercise performance in the heat: A systematic review. *Int J Sport Nutr Exerc Metab* 20: 166–74.
- Siegel R, Laursen PB (2012) Keeping your cool: possible mechanisms for enhanced exercise performance in the heat with internal cooling methods. *Sports Med* 42: 89–98.
- Yeo ZW, Fan PW, Nio AQ, Byrne C, Lee JK (2012) Ice slurry on outdoor running performance in heat. *Int J Sports Med* 33: 859–66.
- Eccles R, Jawad MS, Morris S (1990) The effects of oral administration of L(-) menthol on nasal resistance to airflow and nasal sensation of airflow in subjects suffering from nasal congestion associated with the common cold. *J Pharm Pharmacol* 42: 652–4.
- Green BG (1985) Menthol modulates oral sensations of warmth and cold. *Percept Psychophys* 38: 110–4.
- Naito K, Komori M, Kondo Y, Takeuchi M, Iwata S (1997) The effect of l-menthol stimulation of the major palatine nerve on subjective and objective nasal patency. *Auris Nasus Larynx* 24:159–62.
- Eccles R, (2000), Role of cold receptors and menthol in thirst, the drive to breathe and arousal. *Appetite* 34: 29–35.
- Mündel T, Jones DA (2010) The effects of swilling an L (-)-menthol solution during exercise in the heat. *Eur J Appl Physiol* 109: 59–65.
- Borg G (1970) Perceived exertion as an indicator of somatic stress. *Scand J Rehabil Med* 2(2): 92–3.
- Hodder SG, Parsons K (2007) The effects of solar radiation on thermal comfort. *Int J Biometeorol* 51: 233–50.
- Lee JK, Shirreffs SM, Maughan RJ (2008) Cold drink ingestion improves exercise endurance capacity in the heat. *Med Sci Sports Exerc* 40: 1637–44.
- Burdon CA, O'Connor HT, Gifford JA, Shirreffs SM, Chapman P, et al. (2010) Effect of drink temperature on core temperature and endurance cycling performance in warm, humid conditions. *J Sports Sci*.
- Lee JK, Maughan RJ, Shirreffs SM (2008) The influence of serial feeding of drinks at different temperatures on thermoregulatory responses during cycling. *J Sports Sci* 26:583–90.
- Lee JK, Shirreffs SM (2007) The influence of drink temperature on thermoregulatory responses during prolonged exercise in a moderate environment. *J Sports Sci* 25:975–85.
- Hopkins WG, Hewson DJ (2001) Variability of competitive performance of distance runners. *Med Sci Sports Exerc* 33: 1588–92.
- Siegel R, Maté J, Brearley MB, Watson G, Nosaka K, et al. (2010) Ice slurry ingestion increases core temperature capacity and running time in the heat. *Med Sci Sports Exerc* 42: 717–25.
- Morris NB, Bain AR, Cramer MN, Jay O (2014) Evidence that transient changes in sudomotor output with cold and warm ingestion are independently modulated by abdominal, but not oral thermoreceptors. *J Appl Physiol* 116(8): 1088–95.
- Jay O, Reardon FD, Webb P, Ducharme MB, Ramsay T, et al. (2007) Estimating changes in mean body temperature for humans during exercise using core and skin temperatures is inaccurate even with a correction factor. *J Appl Physiol* 103: 443–451.
- Mündel T, King J, Collacott E, Jones DA (2006) Drink temperature influences fluid intake and endurance capacity in men during exercise in a hot, dry environment. *Exp Physiol* 91: 925–33.
- Nybo L (2008) Hyperthermia and fatigue. *J Appl Physiol* 104: 871–8.
- Eccles R (1994) Menthol and related cooling compounds. *J Pharm Pharmacol* 46: 618–30.
- Guest S, Grabenhorst F, Essick G, Chen Y, Young M, et al. (2007) Physiology and behaviour 94: 975–984.
- Cotter JD, Sleivert GG, Roberts WS, Febbraio MA (2001) Effect of pre-cooling, with and without thigh cooling, on strain and endurance exercise performance in the heat. *Comp Biochem Physiol A Mol Integr Physiol* 128: 667–77.
- Gillis DJ, House JR, Tipton MJ (2010) The influence of menthol on thermoregulation and perception during exercise in warm, humid conditions. *Eur J Appl Physiol* 110: 609–18.
- Wegmann M, Faude O, Poppendieck W, Hecksteden A, Fröhlich M, et al. (2012) Pre-cooling and sports performance: A meta-analytical review. *Sports Med* 42: 545–64.
- Crewe H, Tucker R, Noakes TD (2008) The rate of increase in rating of perceived exertion predicts the duration of exercise to fatigue at a fixed power output in different environmental conditions. *Eur J Appl Physiol* 103: 569–77.
- Ross ML, Garvican LA, Jeacocke NA, Laursen PB, Abbiss CR, et al. (2011) Novel precooling strategy enhances time trial cycling in the heat. *Med Sci Sports Exerc* 43: 123–33.
- Hunt JN, MacDonald I (1954) The influence of volume on gastric emptying. *J Physiol* 126: 459–74.
- Cheung SS (2007) Neuropsychological determinants of exercise tolerance in the heat. *Pro Brain Res* 162: 43–60.

RESEARCH ARTICLE

# Ingestion of a Cold Temperature/Menthol Beverage Increases Outdoor Exercise Performance in a Hot, Humid Environment

Than Tran Trong<sup>®</sup>, Florence Riera<sup>®\*</sup>, Kévin Rinaldi<sup>®</sup>, Walid Briki<sup>®</sup>, Olivier Hue<sup>®</sup>

Laboratoire ACTES—EA 3596, Université des Antilles et de la Guyane, Campus de Fouillole, Point à Pitre, France

These authors contributed equally to this work.

\* [florence.riera@gmail.com](mailto:florence.riera@gmail.com)



OPEN ACCESS

**Citation:** Tran Trong T, Riera F, Rinaldi K, Briki W, Hue O (2015) Ingestion of a Cold Temperature/Menthol Beverage Increases Outdoor Exercise Performance in a Hot, Humid Environment. PLoS ONE 10(4): e0123815. doi:10.1371/journal.pone.0123815

**Academic Editor:** Andrej A. Romanovsky, St. Joseph's Hospital and Medical Center, UNITED STATES

**Received:** October 20, 2014

**Accepted:** March 7, 2015

**Published:** April 9, 2015

**Copyright:** © 2015 Tran Trong et al. This is an open access article distributed under the terms of the [Creative Commons Attribution License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original author and source are credited.

**Data Availability Statement:** All relevant data are within the paper and its Supporting Information files.

**Funding:** The authors have no support or funding to report.

**Competing Interests:** The authors have declared that no competing interests exist.

## Abstract

### Purpose

A recent laboratory study demonstrated that the ingestion of a cold/menthol beverage improved exercise performance in a hot and humid environment during 20 km of all-out cycling. Therefore, the aim of this study was to determine whether the ingestion of cold water/ice-slurry with menthol would improve performance in hot and humid outdoor conditions.

### Methods

Ten trained males completed three trials of five blocks consisting of 4-km cycling and 1.5-km running. During warm-up, every block and recovery, the athletes drank 190 ml of aromatized (*i.e.*, with 0.05 mL of menthol) beverage at three temperatures: Neutral (ambient temperature) ( $28.7^{\circ}\text{C}\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ ), Cold ( $3.1^{\circ}\text{C}\pm 0.6^{\circ}\text{C}$ ) or Ice-slurry ( $0.17^{\circ}\text{C}\pm 0.07^{\circ}\text{C}$ ). Trial time, core temperature ( $T_{\text{co}}$ ), heart rate (HR), rate of perceived exertion (RPE), thermal sensation (TS) and thermal comfort (TC) were assessed.

### Results

Ice-slurry/menthol increased performance by 6.2% and 3.3% compared with neutral water/menthol and cold water/menthol, respectively. No between-trial differences were noted for  $T_{\text{co}}$ , HR, RPE, TC and TS was lower with ice-slurry/menthol and cold water/menthol compared with neutral water/menthol.

### Conclusion

A low drink temperature combined with menthol lessens the performance decline in hot/humid outdoor conditions (*i.e.*, compared with cold water alone). Performances were better with no difference in psycho-physiological stress ( $T_{\text{co}}$ , HR and RPE) between trials. The changes in perceptual parameters caused by absorbing a cold/menthol beverage reflect the psychological impact. The mechanism leading to these results seems to involve brain integration of signals from physiological and psychological sources.

## Introduction

Aerobic performance is decreased in tropical climates because the thermal stress exceeds the evapotranspiration process [15]. Although the processes involved in the alteration of performance are unclear, several mechanisms have been proposed, including thermoregulatory anticipation [14], decreased power output [22] and cardiovascular adjustments [20]. Whatever the mechanisms may be, the clear consensus is that the tropical climate is deleterious for those who are unacclimated [34], acclimated [34], and even native to the climate [33].

Recently, drinking cold water/ice-slurry [16, 18], swilling an L (-) menthol solution [21], and the ingestion of combined cold water/ice-slurry and menthol [24] were reported to be beneficial strategies for endurance performance in the heat. The study of Mündel et al. [21] showed a decrease in exercise-induced exhaustion when athletes periodically swilled an L (-) menthol solution of 0.01%. Because L (-) menthol creates a cooling sensation in the mouth [11], it was suggested that the thermal stimulation signal in the mouth when drinking cold mint is transmitted to the reward-motivating regions of the brain, thereby extending the exercise duration [21]. Further, it was shown that the cooling sensation in the intra-mouth was strengthened with each subsequent inhalation of cool ambient air or by cold drinking after gargling with an L (-) menthol solution [11]. Very recently, Riera et al. [24] indicated that L (-) menthol combined with cold water/ice-slurry improved exercise performance in hot and humid environments during 20 km of all-out cycling without changes in HR or  $T_{co}$ . These authors suggested that menthol might impair the heat perception process by affecting the activity of hypothalamic thermoreceptors [24].

Although studies on exercise performed in valid outdoor conditions are particularly important to understanding how physiological responses are affected [9], most of the studies cited above were performed in a laboratory and several environmental factors could not be taken into account. For example, in natural sunlight, the human body receives the radiant heat load directly, which can increase skin temperature [4,13] and thermal sensations [13] and reduce the temperature gradient between the skin and the core; this in turn accelerates the rate of heat storage and reduces the output power [31]. Furthermore, thermal regulation is also affected by the speed of air flow around the body (which is influenced by the wind velocity) [26, 30], which can positively affect endurance performance through a decrease in thermal stress [26], and this air flow may also positively affect the cold stimulus in the mouth while breathing.

Therefore, the aim of this study was to determine whether the positive results (an increase in exercise performance) for cold water/ice-slurry with L (-) menthol ingestion recently found in the laboratory could be extended to other sports (cycling and running) or exercise modalities in outdoor conditions.

## Methods

### Subjects

Ten heat-acclimated; trained (*i.e.*, living and training in Guadeloupe) male cyclists and triathletes (age:  $41 \pm 17$  years, height:  $179 \pm 9$  cm, body mass:  $73 \pm 7$  kg, maximum aerobic capacity ( $VO_{2max}$ ):  $59 \pm 11$  mL.min<sup>-1</sup>.kg<sup>-1</sup>, peak power output at max:  $335 \pm 48$  W) participated in the study. The athletes were training at least 10 hours per week at the time of study. The study was approved by the Ethics Committee of the Medicine and Sport Center in Guadeloupe (Ministry of Youth and Sports) and the Ethics Committee of the Training and Research in Sport Science Unit in Guadeloupe (Ministry of Higher Education and Research). All athletes completed a medical screening questionnaire and gave written informed consent prior to the study, which was approved by the University Ethics Committee and conducted according to the Declaration of Helsinki.

## Preliminary measurements

On the athletes' first visit to the laboratory,  $\text{VO}_{2\text{max}}$  was measured during an incremental exercise test on an electronically braked cycle ergometer (TECHMED, TM 4170, Besançon, France). The initial workload was 30 W and increased by 30 W every minute until volitional fatigue. Gas exchange was measured throughout the entire test (ZAN Ferraris, Cardiorespiratory System, Oberthulba, Germany).  $\text{VO}_{2\text{max}}$  was reached when two of the following criteria were met: (1)  $\text{VO}_2$  did not increase with an increase in intensity, (2) heart rate (HR) was within 10  $\text{beats}\cdot\text{min}^{-1}$  of the age-predicted maximum of  $220 - \text{age}$ , and (3) the respiratory exchange ratio (RER) was greater than 1.05.

## Experimental design

The experimental trials were separated by 7 days and were undertaken in a randomized cross-over design. The athletes were also asked to limit exercise to 60 minutes of light-intensity exercise the day before each trial. At the start of the trial days, the athletes consumed a standard breakfast that included food and 600 mL of beverage. The trials began at the same time of day for each athlete (between 12:00 and 15:30) to control for circadian variations in core temperature ( $T_{\text{co}}$ ) and digestion. During the trials, the athletes wore cycling shorts, a cycling jersey, socks and shoes.

## Experimental procedures

The experimental trials were performed in an outdoor cycling stadium in the hot/humid conditions of Guadeloupe, French West Indies (WBGT: mean  $\pm$  SD outdoor temperature:  $27.6^\circ\text{C} \pm 0.8^\circ\text{C}$ , dry bulb temperature:  $32.5 \pm 1.2^\circ\text{C}$ ;  $57\% \pm 0.05\%$  RH and wind:  $25.9 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1} \pm 0.7 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ ). HR was monitored continuously using a portable telemetry unit (Suunto Memory Belt, Suunto, Vantaa, Finland) with recording every 10 seconds, and the data were analyzed with Suunto software.  $T_{\text{co}}$  was assessed via the gastrointestinal temperature using ingestible temperature measurement pills (CorTemp, HQ, Inc., Palmetto, FL, USA). The athletes were instructed to ingest these pills 6 to 8 h before all experimental trials to ensure the pill was out of the stomach, thereby avoiding variability in  $T_{\text{co}}$  due to pill movement or fluid/food consumption.

The experimental trial included 15 min of warm-up with cycling at a freely chosen cadence, followed by five blocks of 4-km cycling and 1.5-km running for each block with the fastest possible time, and then 15 min of recovery at a free cadence. There were two transition periods when the participants replaced their cycling shoes with running shoes or the reverse: (1) 60 seconds at the end of 4-km cycling to the start of 1.5-km running in each block and (2) 90 seconds at the end of 1.5-km running of the previous block to the start of 4-km cycling in the next block (between blocks).

During the experimental trials, the athletes were asked to drink 190 mL of a randomly assigned beverage during the 15-min warm-up, during the running segment in each block, and during the 15-min recovery. The three experimental trials differed as follows: a menthol aroma beverage was ingested at one of three temperatures: (1) Neutral ( $28.7^\circ\text{C} \pm 0.5^\circ\text{C}$ ), (2) Cold ( $3.1^\circ\text{C} \pm 0.6^\circ\text{C}$ ) or (3) Ice-slurry ( $0.17^\circ\text{C} \pm 0.07^\circ\text{C}$ ). The L (-) menthol beverages used a 0.025% natural menthol aroma (% vol:  $86.0\% \pm 1.0$ ; dosage recommendation by manufactory: 5/g/L) (Robertet, Grasse, France). The ice-slurry was produced with an ice-slurry machine (Brema, GB 902A, Professional Slush Machine, Ice Makers, Germany). Although ice expands in volume, we carefully ensured that the volume of ice-slurry (in mL of water) was precisely the same as the volume of cold water. The temperature of each beverage was measured with a digital thermometer (YSI 409B, Yellow Springs Instruments, OH, USA). A straw with a 1.5 cm diameter was connected to the lid of the water bottle to aid ingestion of the ice-slurry.

## Measurements

Perceived exertion (RPE), perceived thermal sensation (TS), and perceived thermal comfort (TC) were recorded, as thermal perception and physiological strain during exercise are known to affect pacing strategy and performance [8]. During the experimental trials,  $T_{co}$  was measured before and after warm-up, at the end of every 4km of cycling and every 1.5km of running, and after the recovery phase. Before and after warm-up and at the end of each block (at the end of 1.5-km running) of the trial, the athletes were asked to rate their perceived TS and perceived TC, respectively, on a 7-point scale (ranging from “extremely cold” (1) to “extremely hot” (7)) and a 4-point scale (ranging from “comfortable” (1) to “very uncomfortable” (4)) adapted from Hodder and Parsons [13]. They were asked to rate their perceived exertion according to the 15 grades of Borg’s perceived exertion scale [2] at the end of each block. Nude body mass was assessed ( $\pm 0.1$  kg) before and after each session with an electronic scale (Terraillon Pop, France). Hydration status throughout the experimental trials was estimated by changes in nude body mass. During the session, the athletes drank a total of 1330 mL of beverage.

## Statistical analyses

We tested for normality using Skewness and Kurtosis tests, with acceptable Z values not exceeding +1 or -1. Once the assumption of normality was confirmed, parametric tests (Mauchly’s sphericity test) were performed. To examine our hypotheses regarding the changes in  $T_{co}$ , performance, HR, TS, TC and RPE as a function of time, a  $3 \times 5$  repeated measures ANOVA (Drink Temperature [Neutral vs. Cold vs. Ice-slurry]  $\times$  Time Period [T1, T2, T3, T4, and T5]) was conducted, and Tukey’s post hoc test assessed the differences between adjacent time periods, with significant differences reflecting abrupt changes in performance, and between distant periods, with significant differences reflecting only gradual changes [3]. Data analysis was performed using the Statistical Package for Social Sciences (SPSS version 19.0). Significance was set at the  $P < 0.05$ . All data are presented as mean  $\pm$  SD.

## Results

### Performance

The global performance was affected by Drink Temperature ( $P < 0.03$ ), with the performance with Ice-slurry ( $4289 \pm 190$ s) significantly better than with Cold ( $4436 \pm 171$ s,  $P < 0.002$ ) or Neutral ( $4572 \pm 423$ s,  $P < 0.04$ ). The global performance was also affected by Time Period ( $P < 0.02$ ) and the Time Period  $\times$  Drink Temperature interaction ( $P < 0.007$ ) (S1 Fig).

When expressed by block (cycling + running), the performance was significantly affected by Drink Temperature ( $P < 0.004$ ), with Ice-slurry ( $858 \pm 7$ s) greater than Cold ( $887 \pm 32$ s,  $P < 0.007$ ) and Neutral ( $914 \pm 92$ s,  $P < 0.008$ ). The block performance was also affected by Time Period ( $P < 0.007$ ) and the Time Period  $\times$  Drink Temperature interaction ( $P < 0.004$ ) (S2 Fig).

Although there was no exercise (i.e., cycling or running)  $\times$  condition interaction ( $P > 0.05$ ), both types of exercise being affected by the Time Period  $\times$  Drink Temperature interaction (i.e.,  $P < 0.004$  and  $P < 0.03$  for cycling and running, respectively), the mean time with Ice-slurry was better than Neutral in cycling ( $429 \pm 5$ s vs.  $455 \pm 22$  s for Ice-slurry and Neutral, respectively,  $P < 0.05$ ) and better than Cold in running (i.e.,  $430 \pm 7$ s vs.  $450 \pm 18$ s for Ice-slurry and Cold, respectively,  $P < 0.006$ ).

### Core temperature ( $T_{co}$ ), heart rate (HR)

There was no significant difference in the mean  $T_{co}$  noted in the trials before exercise (for Neutral:  $36.9^\circ\text{C} \pm 0.5^\circ\text{C}$ , Cold:  $37.3^\circ\text{C} \pm 0.5^\circ\text{C}$ , Ice-slurry:  $37.3^\circ\text{C} \pm 0.3^\circ\text{C}$ ,  $P > 0.05$ ). During the trials,

$T_{co}$  increased over time ( $P < 0.0001$ ) with no significant difference between trials ( $P > 0.05$ ) (S3 Fig). There were no significant differences in  $T_{co}$  for cycling, running or blocks (cycling + running) between trials ( $P > 0.05$ ) (S1 Table). However,  $T_{co}$  was significantly affected by Time Period in the trials ( $P < 0.0001$ ).

HR increased significantly during the trials from warm-up to the end of exercise ( $P < 0.0001$ ), but there was no significant difference in the mean HR between trials ( $P > 0.05$ ) (S4 Fig). There were no significant differences in HR for cycling, running or blocks (cycling + running) between trials ( $P > 0.05$ ) (S1 Table). However, HR was significantly affected by Time Period in the trials ( $P < 0.0001$ ).

### RPE, thermal sensation, thermal comfort

TS was significantly lower in the Ice-slurry ( $3.5 \pm 0.8$ ) and Cold ( $3.4 \pm 1.0$ ) conditions than in Neutral condition ( $4.0 \pm 1.2$ ) ( $P < 0.05$  and  $P < 0.02$ , respectively) (S5A Fig). There were no significant differences in TC (for Neutral:  $2.3 \pm 0.9$ , Cold:  $2.1 \pm 0.8$ , Ice-slurry:  $2.0 \pm 0.8$ ,  $P > 0.05$ ) (S5B Fig) or RPE ( $P > 0.05$ ) (S5C Fig), with all of them increasing continuously with Time Period ( $P < 0.0001$ ).

### Environmental conditions, weight and hydration status

There was no difference in the mean temperature (WBGT:  $27.6^\circ\text{C} \pm 0.8^\circ\text{C}$ , dry bulb temperature:  $32.5^\circ\text{C} \pm 1.2^\circ\text{C}$ ,  $P > 0.05$ ), relative humidity ( $57\% \pm 0.05\%$ ,  $P > 0.05$ ) or wind speed ( $25.9 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1} \pm 0.7 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ ,  $P > 0.05$ ) in the area where the three trials took place and the athletes' body weight loss did not differ between trials (for Neutral:  $2.3 \pm 0.9\text{kg}$ , Cold:  $2.2 \pm 1.3\text{kg}$ , and Ice-slurry:  $2.2 \pm 0.7\text{kg}$ ,  $P > 0.05$ ).

## Discussion

The most important results of this study were the following: (1) the ingestion of the ice-slurry/menthol drink increased performance by 6.2% and 3.3% compared with neutral water/menthol and cold water/menthol, respectively. Although not significant, the performance with cold water/menthol ingestion was 3% better than with neutral water/menthol; and (2) despite the improvement in performance, psycho-physiological stress ( $T_{co}$ , HR and RPE) did not differ between trials.

### Influences of the combination of cold drink/ice-slurry and L (-) menthol on exercise performance

In a laboratory study, Riera et al. [24] showed significantly better performance with the absorption of ice-slurry/menthol and cold water/menthol compared with neutral water/menthol. In the present study, the post-hoc analysis demonstrated significantly better performance with ice-slurry/menthol, but not with cold water/menthol (*i.e.*, compared with neutral water/menthol). Despite this lack of significance, we believe our results support the findings of Riera et al. [24]. Indeed, a significantly lower performance benefit has been observed with ice-slurry (*i.e.*, compared with neutral water) in laboratory settings as opposed to field settings. In the laboratory, a significant increase of 6.8% and 2.5% in performance was shown by Ishan et al. [16] and Stevens et al. [29], respectively, but in an actual field setting this increase was only 0.5% in the study of Yeo et al. [35]. Conversely, the decline in performance benefit was not significant in the case of a cold beverage with menthol (*i.e.*, cold water/menthol or ice-slurry/menthol). Riera et al. [24] observed a performance increase of 8.2% and 5.0% with ice-slurry/menthol and cold water/menthol compared with neutral water/menthol, respectively, whereas the rates were

6.2% and 3.0% in our study. We assume that the impact of environmental factors (*i.e.*, wind and solar radiation) reduced the effects of a cold beverage (*i.e.*, cold water, ice-slurry) on the body but that this impact was attenuated by the cold beverages containing menthol versus no menthol because the cold temperature beverages with menthol elicited both physical and chemical activation of cold receptors. Thus, a low temperature/menthol combination lessens the decline in performance benefit (*i.e.*, compared with only cold beverage) in outdoor conditions. Moreover, although some studies with ice-slurry absorption in self-paced exercise have failed to show further performance improvement when combined with other strategies, such as external precooling [19, 25] and hyper hydration [25], or an improvement compared with neutral water [23, 28], the 6.2% increase in performance with ice-slurry/menthol demonstrated in the present study was significant.

The best time performance was over-expressed in blocks 4 and 5 (S2 Fig). This is consistent with the results of several studies [16, 24, 29, 35], in which the better performances with ice-slurry or ice-slurry/menthol appeared near the end of exercise.

### Influences of the combination of cold drink/ice-slurry and L (-) menthol

The decrease in  $T_{co}$  with the absorption of cold water or ice-slurry, as compared with the absorption of neutral water, is assumed to be the main factor in improved exercise performance [16, 18, 27]. However, studies [5, 24] have shown that exercise performance may increase with the absorption of a cold drink without any change in  $T_{co}$  and/or HR. It has therefore been suggested that the cooling sensation created in the throat by drinking a cold beverage also contributes to the increase in exercise performance [5, 27]. In our study,  $T_{co}$  was not reduced by ingestion of a cold drink with menthol (cold water, ice-slurry), and both the feeling of freshness in the pharynx and the taste of menthol may have contributed to the increase in exercise performance [5, 21]. Indeed, some of the same human brain regions involved in detecting temperature were found to also be involved in sensing pleasantness by intra-oral thermal stimulation [12], and the suggestion was made that the pleasant stimulus created by cold absorption may help to maintain central drive and increase motivation for exercise [6]. Moreover, Mündel and [21] showed that the pleasant sensation generated by gargling regularly with a solution of L(-) menthol enhanced exercise performance compared with placebo, but created no difference in the  $T_{co}$  between trials.

It has also been hypothesized that a false signal [7] or an incorrect assessment of thermal stress [32] can create a subconscious physiological effect that leads to improved performance. Tyler et al. [32] showed that the application of a cooling collar decreased the neck skin temperature, and exercise performance increased by 6% without an alteration in  $T_{co}$ , HR, RPE or neuroendocrinological response. The explanation was that the lower neck skin temperature from the cooling collars created signals which overrode inhibitory feedback, thereby giving a false assessment of the body's thermal status. This was assumed to lead to the selection of a faster pace, and exercise capacity subsequently increased compared with the no cooling condition [32]. We suspect that the effect of cold water and menthol in the oropharyngeal region may have been similar.

In an outdoor environment, the physiological processes (*i.e.*, thermoregulation) are affected by a number of factors such as wind and solar radiation. During the rest period before exercise (or when athletes move at low speed), the impact of wind on psychological and physiological processes (*i.e.*, TS, TC, thermoregulation) is not significant [15, 26], whereas solar radiation can cause an increase in skin temperature [4] and thermal sensation [13]. L (-) menthol creates a cooling sensation in the mouth, which is strengthened when combined with a cold beverage [11], creating higher intensities of the stimuli in the throat compared with neutral water/menthol. In

addition, Gibson and Noakes [10] introduced the central governor model through which the brain makes calculations in order to determine the optimal pacing strategy and maintain a physiological reserve to enable increased exercise capacity at the end of exercise. According to this model, the afferent input from skin and signals of coolness from drinking cold beverage/menthol (*i.e.*, cold or ice-slurry) are integrated in the brain and interact. We suspect that sufficiently high intensities of the stimuli in the present study, that is, ice-slurry and menthol, may have overwhelmed the heat stress signals (from skin), whereas the combination of cold water and menthol was insufficient to elicit this effect.

Thus, it is plausible that the ingestion of ice-slurry/menthol created more pleasant sensations and/or an incorrect assessment of thermal stress, based on which the governor region of the brain established an intensity to enable an increase in exercise performance. The central governor model would also explain why the improved exercise performance with ice-slurry/menthol, as opposed to that with cold water/menthol and neutral water/menthol, appeared in the last blocks (4 and 5) (S2 Fig).

### $T_{co}$ and HR

We observed no between-trial difference in  $T_{co}$  for the three types of beverage/menthol (*i.e.*, at 28.7, 3.1 and 0.17°C) during the 15-min warm-up, running in each block, and the recovery (S3 Fig). Previous studies have indicated that the timing of water ingestion is an important factor in determining the reduction in  $T_{co}$ . The study results of Ihsan et al. [16], Siegel et al. [27] and Lee et al. [18] all indicated that an effective strategy to reduce  $T_{co}$  was to ingest a cold beverage during the rest phase before exercise or during the period separating two series of exercise [28]. Conversely, the studies of Riera et al. [24], Burdon et al. [5], Burdon et al. [6], and Lee et al. [17] indicated that the absorption of cool water (*i.e.*, cold water, ice-slurry) during exercise did not reduce  $T_{co}$  compared with neutral water. Lee et al. [17] hypothesized a response mechanism to the impact of exogenous heat on the body, whereby cold-water ingestion during exercise cannot reduce  $T_{co}$ . If such a mechanism exists, we suspect that it is not operational in the rest state before exercise; hence,  $T_{co}$  decreases with the ingestion of a cold drink. Instead, we suspect that this putative mechanism is activated only once exercise begins (including warm-up at low intensity), which would explain the lack of difference in  $T_{co}$  between trials in our study. Another explanation is that the body produces more heat as performance increases. Thus, the combined effect of increased performance and ice-slurry ingestion led to a constant  $T_{co}$  [24].

In this study, the best performance was obtained with ice-slurry/menthol with no difference in HR between trials (S4 Fig). We hypothesize that the ingestion of ice-slurry/menthol provided the brain with false information on heat stress, causing a reflex that decreased blood flow to the skin [7]. This is supported by the study of Riera et al. [24], who suggested that under the influence of menthol, the hypothalamus does not detect increases in  $T_{co}$  and thus no inhibitory signal is sent to the motor control centers. If this assumption is correct, blood would not have been redistributed from the core to the periphery, thereby allowing the central blood volume to increase and, thus, improving perfusion to the exercising muscles. Further, the improved central blood would have ensured larger stroke volume; hence, the HR remained constant (the stroke volume not being maintained in the neutral water/menthol and cold water/menthol condition). This would explain the better performance with ingestion of ice-slurry/menthol without any change in HR.

## Sensations

Psychological effects have a powerful influence on performance in a warm environment [8]. In the present study, the ingestion of ice-slurry/menthol and cold water/menthol led to lower thermal sensations compared with neutral water/menthol (S5A Fig). Nevertheless, exercise performance differed only between the ice-slurry/menthol and neutral water/menthol conditions. Teunissen et al. [30] and Barwood et al. [1] hypothesized that RPE, rather than thermal perception, is the primary factor for improving pacing strategy and performance in hot environments, based on Mündel [21] demonstration that periodic gargling with a different concentration of menthol solution compared with placebo resulted in lower rates of perceived exertion. We might have expected lower RPEs for the combination of cold or ice with menthol, which was not the case (S5C Fig). However, our results agree with those of Riera et al. [24], who conducted a laboratory study with similar exercising and beverage conditions. Because RPE is influenced by both environmental, internal factors and exercise intensity, we suspect that the increase in performance (thus in the relative intensity) noted in both the ice-slurry and cold conditions compared with neutral condition may have masked the effect of combined cold/ice-menthol on RPE.

## Conclusions

This study showed that a low drink temperature combined with menthol lessened the performance decline in hot and humid outdoor conditions (*i.e.*, compared with cold water alone). Performances were better with no difference in psycho-physiological stress ( $T_{co}$ , HR and RPE) between trials. The changes in perceptual parameters caused by absorbing a cold drink with menthol reflect the impact on psychological factors. The mechanism leading to these results seems to involve brain integration of signals from physiological and psychological sources.

## Perspectives

The results of this investigation showed the benefits of cold beverage/menthol to increase time-trial performance in actual field settings. Furthermore, the ice-slurry equipment is compact [29] and preparation for the athlete is easy. The ingestion of ice-slurry/menthol can therefore be recommended for endurance sports (*i.e.*, cycling, running) when competitions are held in a hot climate. However, we expect that the benefits of cold beverage/menthol may also be extended further. In fact, previous studies [16, 35] have shown that ice-slurry ingestion before exercise (internal precooling) reduces  $T_{co}$ , which results in an increase in self-paced performance. The results of Riera et al. [24] and the present work have demonstrated that ice-slurry/menthol ingestion in the course of exercise does not reduce  $T_{co}$ , although exercise performance increases. Therefore, a strategy of internal precooling through ice-slurry/menthol ingestion to increase self-paced performance in a hot environment should be further examined in future studies.

## Supporting Information

**S1 Fig. Trial times (seconds) for cycling (C) and running (R) during trials with the ingestion of Neutral water, Cold water and Ice-slurry.** Mean values and SD are shown.  $\beta$ ,  $\dagger$  denote that global performance was affected by Time Period ( $P < 0.02$ ) and the Time Period x Drink Temperature interaction ( $P < 0.007$ ), respectively. (EPS)

**S2 Fig. Trial times (seconds) for blocks (cycling+running) during the trials with the ingestion of Neutral water, Cold water and Ice-slurry.** <sup>a</sup> Significantly different from Neutral water

( $P < 0.05$ ), <sup>b</sup> Significantly different from Cold ( $P < 0.05$ ). Mean values and SD are shown.  $\beta, \dagger$  denote that block performance was affected by Time Period ( $P < 0.007$ ) and the Time Period x Drink Temperature interaction ( $P < 0.004$ ), respectively.

(EPS)

**S3 Fig. Core temperature during warm-up, exercise and recovery for trials with the ingestion of Neutral water, Cold water and Ice-slurry.** On the horizontal axis, C denotes cycling and R denotes running within the blocks. Mean values and SD are shown.

(EPS)

**S4 Fig. Heart rate (beats.min<sup>-1</sup>) during warm-up, exercise and recovery for trials with the ingestion of Neutral water, Cold water and Ice-slurry.** On the horizontal axis, C denotes cycling and R denotes running within the blocks. Mean values and SD are shown.

(EPS)

**S5 Fig. (A) Rating of thermal sensation, (B) rating of thermal comfort and (C) rate of perceived exertion during trials with the ingestion of Neutral water, Cold water and Ice-slurry.**

<sup>a</sup> Significantly different from Neutral water ( $P < 0.05$ ). Mean values and SD are shown.

(EPS)

**S1 Table. Core temperature and Heart rate for cycling, running and blocks when absorbing neutral water/menthol, cold water/menthol and ice-slurry/menthol.** Mean  $\pm$  SD are shown.

(EPS)

## Acknowledgments

The authors would like to thank the athletes for their generous time commitment and effort throughout the study.

## Author Contributions

Conceived and designed the experiments: TT FR KR WB OH. Performed the experiments: TT FR KR WB OH. Analyzed the data: TT FR KR WB OH. Contributed reagents/materials/analysis tools: TT FR KR WB OH. Wrote the paper: TT FR KR WB OH.

## References

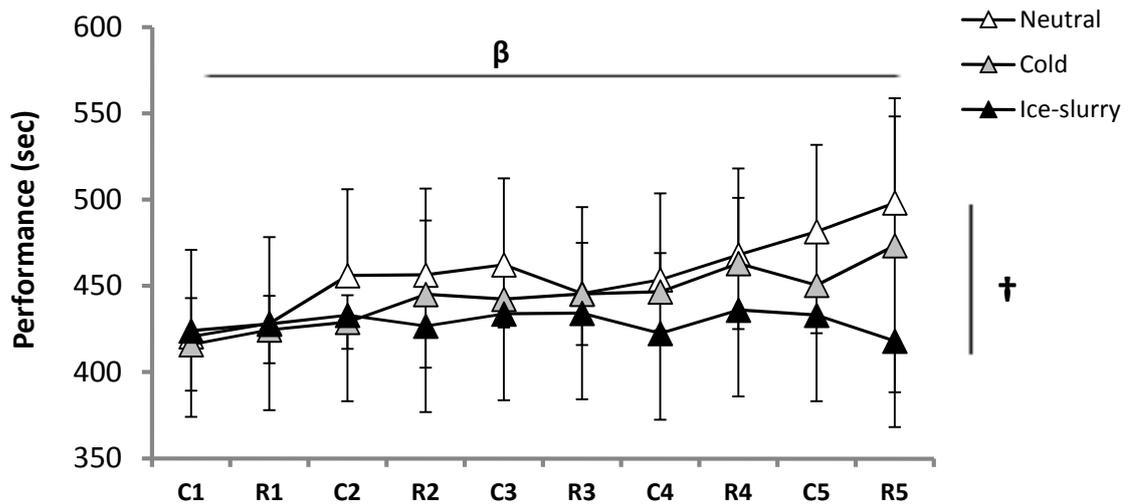
1. Barwood MJ, Corbett J, White DK, James J (2012) Early change in thermal perception is not a driver of anticipatory exercise pacing during exercise in the heat. *Br J Sport Med* 46:936–942. PMID: [22144003](#)
2. Borg G (1970) Perceived exertion as an indicator of somatic stress. *Scand J Rehabil Med* 2(2): 92–8. PMID: [5523831](#)
3. Briki W, Hartighb RJRD, Markman KD, Gernigon C (2014) How do supporters perceive positive and negative psychological momentum changes during a simulated cycling competition?. *Psychology of Sport and Exercise* 15: 216–221.
4. Brotherhood JR (2008) Heat stress and strain in exercise and sport. *Journal of Science and Medicine in Sport* 11: 6–19 PMID: [17997136](#)
5. Burdon CA, Hoon MW, Johnson NA, Chapman PG, O'Connor HT (2013) The effect of ice slushy ingestion and mouthwash on thermoregulation and endurance performance in the heat. *International Journal of Sport Nutrition and Exercise Metabolism* 23: 458–469. PMID: [24172992](#)
6. Burdon C, O'Connor H, Gifford J, Shirreffs S, Chapman P, Johnson N (2010) Effect of drink temperature on core temperature and endurance cycling performance in warm, humid conditions. *Journal of Sports Sciences* 28(11): 1147–1156. doi: [10.1080/02640414.2010.489197](#) PMID: [20694887](#)
7. Castle PC, Maxwell N, Allchorn A, Mauger AR, White DK (2012) Deception of ambient and body core temperature improves self-paced cycling in hot, humid conditions. *Eur J Appl Physiol* 112:377–385. doi: [10.1007/s00421-011-1988-y](#) PMID: [21573777](#)

8. Cheung SS (2007) Neuropsychological determinants of exercise tolerance in the heat. *Pro Brain Res* 162: 43–60.
9. Dugas JP (2010) How hot is too hot?: some considerations regarding temperature and performance. *IJSP* 5:559–564. PMID: [21266739](#)
10. Gibson ASC, Noakes TD (2004) Evidence for a complex system integration and dynamic neural regulation of skeletal muscle recruitment during exercise in humans. *Br J Sports Med* 38:797–806. PMID: [15562183](#)
11. Green BG (1985) Menthol modulates oral sensations of warmth and cold. *Percept Psychophys* 38: 110–4. PMID: [4088802](#)
12. Guest S, Grabenhorst F, Essick G, Chen Y, Young M, McGlone F (2007) Human cortical representation of oral temperature. *Physiol Behav* 92:975–984 PMID: [17689575](#)
13. Hodder SG, Parsons K (2007) The effects of solar radiation on thermal comfort. *Int J Biometeorol* 51: 233–50. PMID: [17009012](#)
14. Hue O, Galy O (2012) The effect of a silicone swim cap on swimming performance in tropical conditions in pre-adolescents. *J Sports Sci Med* 11:156–61. PMID: [24149132](#)
15. Hue O (2011) The challenge of performing aerobic exercise in tropical environments: Applied knowledge and perspectives. *Int J Sports Physiol Perform* 6:443–54. PMID: [22248546](#)
16. Ihsan M, Landers G, Brearley M, Peeling P (2010) Beneficial effects of ice ingestion as a precooling strategy on 40-km cycling time-trial performance. *Int J Sports Physiol Perform* 5: 140–51. PMID: [20625187](#)
17. Lee JK, Maughan RJ, Shirreffs SM (2008) The influence of serial feeding of drinks at different temperatures on thermoregulatory responses during cycling. *J Sports Sci* 26: 583–90. doi: [10.1080/02640410701697388](#) PMID: [18344129](#)
18. Lee JKW, Shirreffs SM, Maughan RJ (2008) Cold drink ingestion improves exercise endurance capacity in the heat. *Med Sci Sports Exerc* 40: 1637–1644. doi: [10.1249/MSS.0b013e318178465d](#) PMID: [18685527](#)
19. Levels K, Teunissen LPJ, de Haan A, de Koning JJ, van Os B, Daanen HAM (2013) Effect of warm-up and precooling on pacing during a 15-km cycling time trial in the heat. *Int J Sports Physiol Perform* 8: 307–311. PMID: [23038703](#)
20. Montain SJ, Coyle EF (1992) Influence of graded dehydration on hyperthermia and cardiovascular drift during exercise. *J Appl Physiol* 73:1340–50. PMID: [1447078](#)
21. Mündel T, Jones DA (2010) The effects of swilling an L (-)-menthol solution during exercise in the heat. *Eur J Appl Physiol* 109: 59–65. doi: [10.1007/s00421-009-1180-9](#) PMID: [19727797](#)
22. Périard JD, Cramer MN, Chapman PG, Caillaud C, Thompson MW (2011) Neuromuscular function following prolonged intense self-paced exercise in hot climatic conditions. *Eur J Appl Physiol* 111:1561–9. doi: [10.1007/s00421-010-1781-3](#)
23. Pryor RR, Suyama J, Guyette FX, Reis SE, Hostler D (2014) The effects of ice slurry ingestion before exertion in wild land firefighting gear. *Prehospital Emergency Care*. In press.
24. Riera F, Trong TT, Sinnapah S, Hue O (2014) Physical and perceptual cooling with beverages to increase cycle performance in a tropical climate. *PLoS ONE* 9(8): e103718. doi: [10.1371/journal.pone.0103718](#) PMID: [25084009](#)
25. Ross MLR, Jeacocke NA, Laursen PB, Martin DT, Abbiss CR, Martin DT (2012) Effects of lowering body temperature via hyper hydration, with and without glycerol ingestion and practical precooling on cycling time trial performance in hot and humid conditions. *Journal of the International Society of Sports Nutrition* 9: 55. doi: [10.1186/1550-2783-9-55](#) PMID: [23245800](#)
26. Saunders AG, Dugas JP, Tucker R, Lambert MI, Noakes TD (2005) The effects of different air velocities on heat storage and body temperature in humans cycling in a hot, humid environment. *Acta Physiol Scand* 183:241–255.
27. Siegel R, Maté J, Brearley MB, Watson G, Nosaka K, Laursen PB (2010) Ice slurry ingestion increases core temperature capacity and running time in the heat. *Med Sci Sports Exerc* 42: 717–25. doi: [10.1249/MSS.0b013e3181bf257a](#) PMID: [19952832](#)
28. Stanley J, Leveritt M, Peake JM (2010) Thermoregulatory responses to ice-slush beverage ingestion and exercise in the heat. *Eur J Appl Physiol* 110:1163–1173. doi: [10.1007/s00421-010-1607-3](#) PMID: [20714767](#)
29. Stevens CJ, Dascombe B, Boyko A, Sculley D, Callister R (2013) Ice slurry ingestion during cycling improves Olympic distance triathlon performance in the heat. *Journal of Sports Sciences* 31: 1271–1279 doi: [10.1080/02640414.2013.779740](#) PMID: [23506436](#)

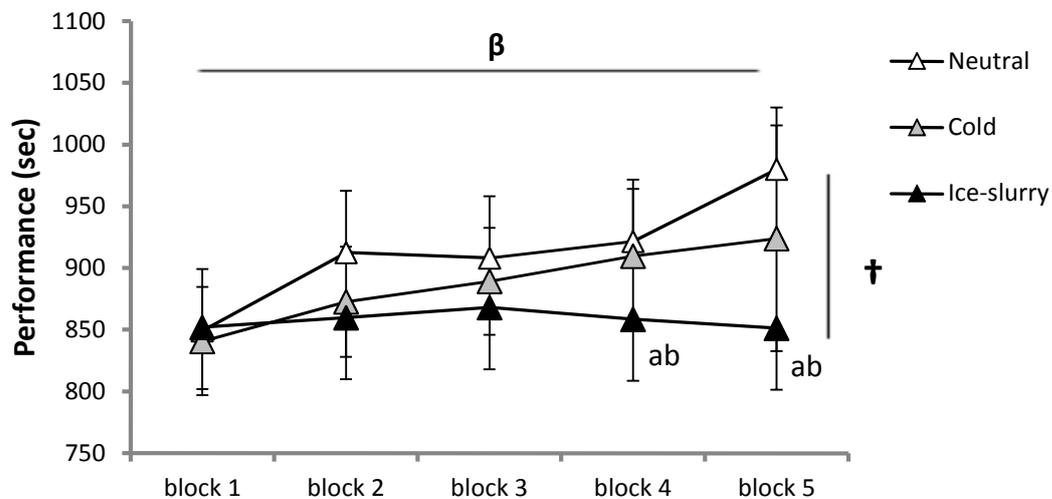
30. Teunissen LPJ, deHaan A, de Koning JJ, Daanen HAM (2013) Effects of wind application on thermal perception and self-paced performance. *Eur J Appl Physiol* 113: 1705–1717. doi: [10.1007/s00421-013-2596-9](https://doi.org/10.1007/s00421-013-2596-9) PMID: [23385657](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/23385657/)
31. Tucker R, Marle T, Lambert EV, Noakes TD (2006) The rate of heat storage mediates an anticipatory reduction in exercise intensity during cycling at a fixed rating of perceived exertion. *J Physiol* 574:905–915. PMID: [16497719](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/16497719/)
32. Tyler CJ, Wild P, Sunderland C (2010) Practical neck cooling and time-trial running performance in a hot environment. *Eur J Appl Physiol* 110:1063–1074. doi: [10.1007/s00421-010-1567-7](https://doi.org/10.1007/s00421-010-1567-7) PMID: [20694731](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/20694731/)
33. Voltaire B, Berthouze-Aranda S, Hue O (2003) Influence of a hot/wet environment on exercise performance in natives to tropical climate. *J Sports Med Phys Fitness* 43:306–11. PMID: [14625511](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/14625511/)
34. Voltaire B, Galy O, Coste O, Racinais S, Callis A, Blonc S (2002) Effect of fourteen days of acclimatization on athletic performance in tropical climate. *Can J Appl Physiol* 27:551–62. PMID: [12500994](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/12500994/)
35. Yeo ZW, Fan PW, Nio AQ, Byrne C, Lee JK (2012) Ice slurry on outdoor running performance in heat. *Int J Sports Med* 33: 859–66. doi: [10.1055/s-0032-1304643](https://doi.org/10.1055/s-0032-1304643) PMID: [22730052](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/22730052/)

**Table 1. Core temperature and heart rate for cycling (C), running (R) and blocks when absorbing neutral water/menthol, cold water/menthol and ice-slurry/menthol. Mean  $\pm$  SD are shown.**

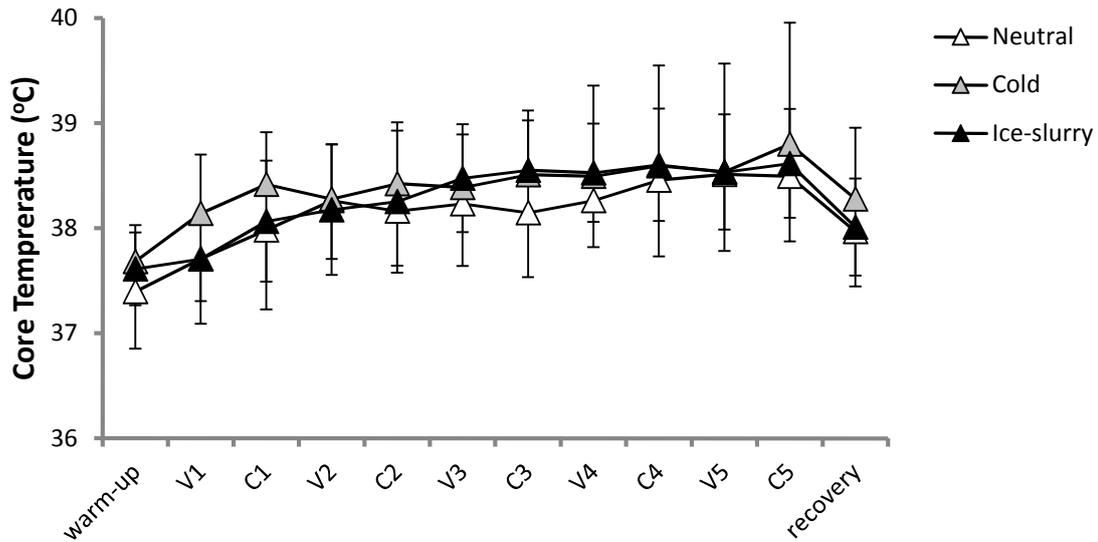
		Block 1		Block 2		Block 3		Block 4		Block 5	
		C	R	C	R	C	R	C	R	C	R
<b>Core temperature</b> (°C)	Neutral	37.6 $\pm$ 0.6	37.9 $\pm$ 0.7	38.2 $\pm$ 0.6	38.1 $\pm$ 0.6	38.2 $\pm$ 0.6	38.0 $\pm$ 0.6	38.2 $\pm$ 0.5	38.3 $\pm$ 0.8	38.5 $\pm$ 0.8	38.4 $\pm$ 0.8
	Cold	38.0 $\pm$ 0.5	38.3 $\pm$ 0.4	38.3 $\pm$ 0.5	38.4 $\pm$ 0.6	38.4 $\pm$ 0.5	38.5 $\pm$ 0.6	38.5 $\pm$ 0.9	38.6 $\pm$ 0.9	38.6 $\pm$ 1.0	38.7 $\pm$ 1.1
	Ice-slurry	37.8 $\pm$ 0.6	38.2 $\pm$ 0.7	38.2 $\pm$ 0.6	38.3 $\pm$ 0.7	38.5 $\pm$ 0.5	38.5 $\pm$ 0.5	38.6 $\pm$ 0.5	38.5 $\pm$ 0.5	38.5 $\pm$ 0.6	38.7 $\pm$ 0.6
<b>Heart rate</b> (beats.min <sup>-1</sup> )	Neutral	149 $\pm$ 18	158 $\pm$ 16	152 $\pm$ 17	161 $\pm$ 17	152 $\pm$ 14	161 $\pm$ 16	151 $\pm$ 14	159 $\pm$ 16	152 $\pm$ 15	157 $\pm$ 17
	Cold	150 $\pm$ 9	162 $\pm$ 13	155 $\pm$ 13	163 $\pm$ 3	155 $\pm$ 12	161 $\pm$ 12	155 $\pm$ 13	162 $\pm$ 11	155 $\pm$ 11	166 $\pm$ 9
	Ice-slurry	147 $\pm$ 11	158 $\pm$ 13	153 $\pm$ 11	161 $\pm$ 1	154 $\pm$ 10	161 $\pm$ 13	155 $\pm$ 12	162 $\pm$ 14	154 $\pm$ 13	162 $\pm$ 14



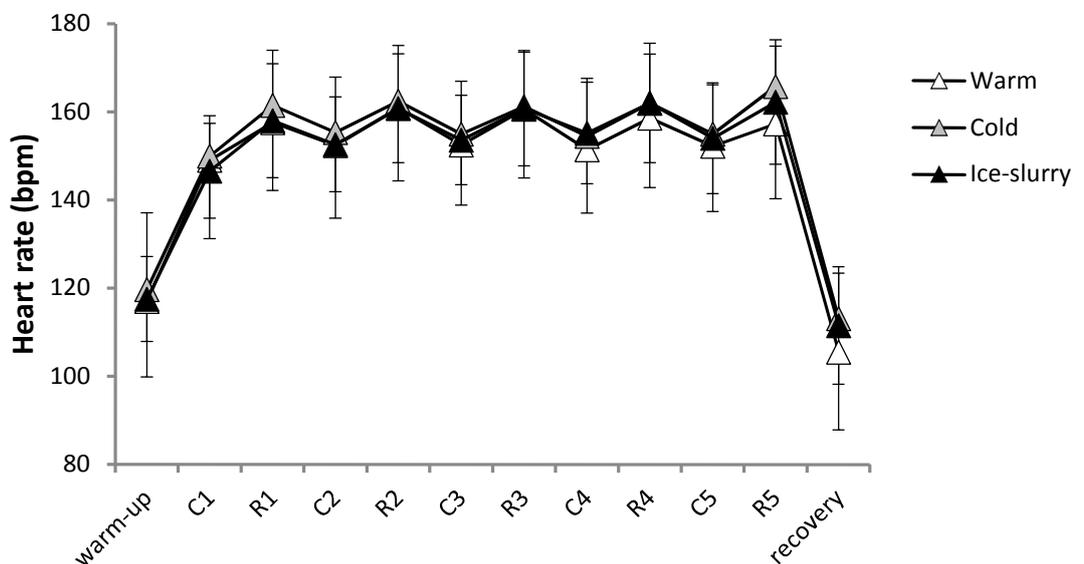
**S1\_Figure 1. Trial times (seconds) for cycling (C) and running (R) during trials with the ingestion of Neutral water, Cold water and Ice-slurry.** Mean values and SD are shown.  $\beta, \dagger$  denote that global performance was affected by Time Period ( $P < 0.02$ ) and the Time Period x Drink Temperature interaction ( $P < 0.007$ ), respectively.



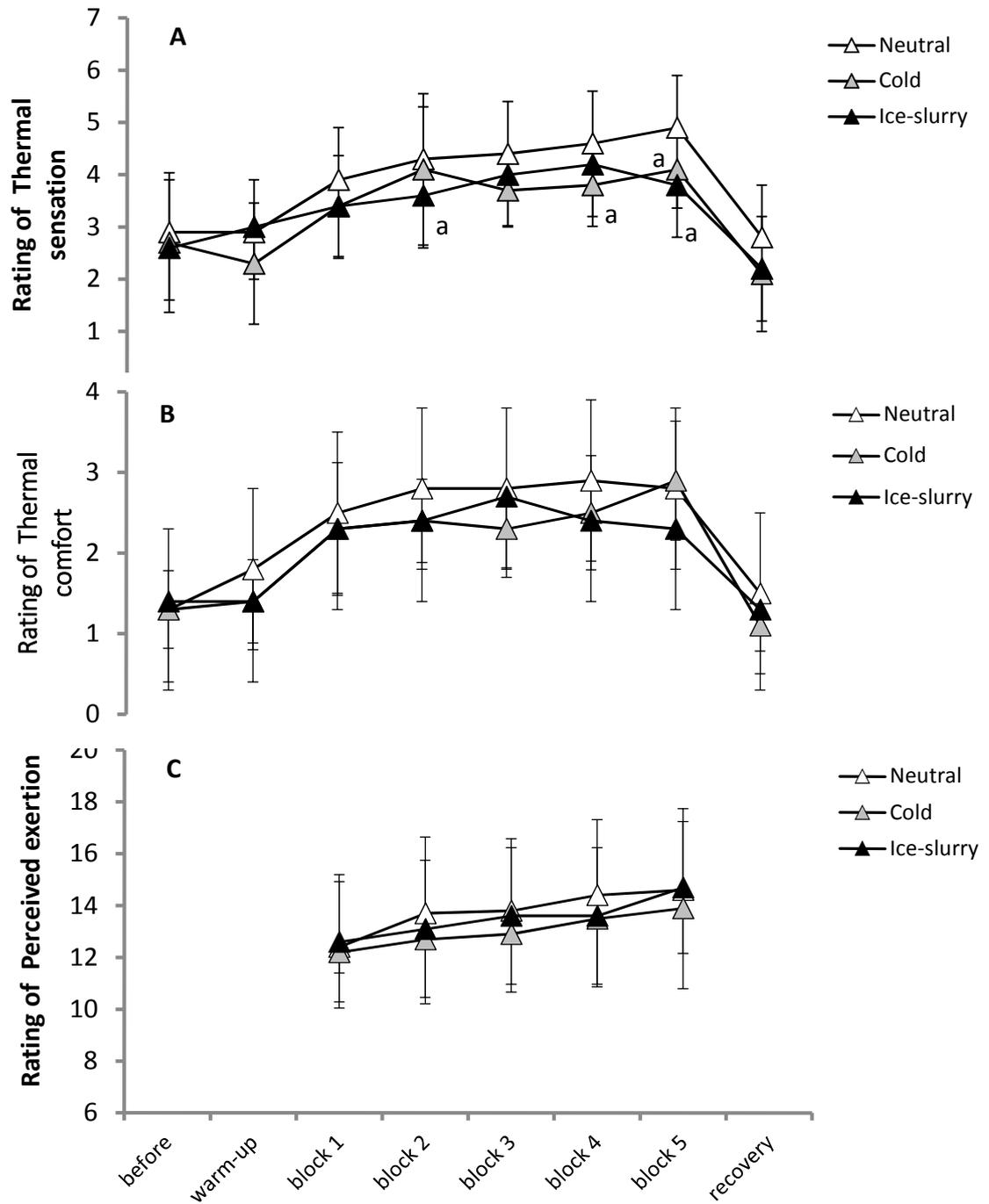
**S2\_Figure 2. Trial times (seconds) for blocks (cycling+running) during the trials with the ingestion of Neutral water, Cold water and Ice-slurry.** <sup>a</sup> Significantly different from Neutral water ( $P < 0.05$ ), <sup>b</sup> Significantly different from Cold ( $P < 0.05$ ). Mean values and SD are shown.  $\beta, \dagger$  denote that block performance was affected by Time Period ( $P < 0.007$ ) and the Time Period x Drink Temperature interaction ( $P < 0.004$ ), respectively.



**S3\_Figure 3. Core temperature during warm-up, exercise and recovery for trials with the ingestion of Neutral water, Cold water and Ice-slurry.** On the horizontal axis, C denotes cycling and R denotes running within the blocks. Mean values and SD are shown.



**S4\_Figure 4. Heart rate (beats.min<sup>-1</sup>) during warm-up, exercise and recovery for trials with the ingestion of Neutral water, Cold water and Ice-slurry.** On the horizontal axis, C denotes cycling and R denotes running within the blocks. Mean values and SD are shown.



**S5\_Figure 5. (A) Rating of thermal sensation, (B) rating of thermal comfort and (C) rate of perceived exertion during trials with the ingestion of Neutral water, Cold water and Ice-slurry. <sup>a</sup> Significantly different from Neutral water ( $P < 0.05$ ). Mean values and SD are shown.**

## Research Article

**Title: Precooling does not enhance the effect of percooling with ice slush/menthol on 30-km cycling performance**

**Authors:** Than Tran Trong<sup>1¶</sup>, Florence Riera<sup>\*1¶</sup>, Kévin Rinaldi<sup>1¶</sup>, Olivier Hue<sup>1¶</sup>

<sup>1</sup>Laboratoire ACTES - EA 3596, Université des Antilles et de la Guyane, Campus de Fouillole, Point à Pitre, France

\* Corresponding author:

E-mail:

¶ These authors contributed equally to this work.

**Key words:** hot/wet climate, internal cooling, menthol beverage, aerobic performance

## **Abstract**

**Purpose:** This study was to investigate whether the combination of internal precooling and internal percooling would enhance performance more than percooling alone.

**Methods:** Nine trained males completed two 30-km cycling trials. For 30 minutes before exercise, the subjects sat quietly and drank 7 g.kg<sup>-1</sup> of water at 23°C (NIM) or at 3°C (CIM). During the NIM and CIM time trials, they drank 7 g.kg<sup>-1</sup> of ice-slush/menthol beverage (*i.e.*, 0.025% menthol). Trial time, core temperature ( $T_{co}$ ), heart rate (HR), rate of perceived exertion (RPE), thermal sensation (TS), and thermal comfort (TC) were assessed. **Results:** Performance time was not significantly different ( $P>0.05$ ) between NIM and CIM. Before exercise,  $T_{co}$  was lower with precooling. During exercise, no between-trial differences were noted for  $T_{co}$ , HR, RPE, TC and TS, but RPE was significantly lower with CIM in the latter stages ( $P<0.05$ ). **Conclusion:** (1) cold beverage intake in the 30 min before exercise did not improve the subsequent exercise performance with ice-slush/menthol beverage intake, and (2) despite no increase in performance, RPE declined in the latter stages of exercise in the condition of combined internal precooling (cold water) and internal percooling (ice-slush/menthol), suggesting that this combination might be beneficial for longer exercise.

## Introduction

Prolonged exercise is negatively affected by hot environments [17, 18]. The exact mechanisms are not well known, but hyperthermia and/or dehydration have been implicated. A large volume of sweat loss during exercise can gradually reduce blood and stroke volumes if not replaced, which tends to limit muscle blood flow [10]. If heat storage cannot be limited (because of the failure of evaporation processes), core temperature may limit exercise [11] or the brain may provoke a voluntary cessation of effort – or a reduction in its intensity – to maintain thermal homeostasis [20].

Internal cooling by the ingestion of cold water or ice-slush prior to (internal precooling) or during exercise (internal percooling) [4] has been proposed as a strategy to enhance heat storage capacity, thereby increasing endurance performance in hot environments [15, 22, 26, 29, 34]. A significant amount of energy is absorbed by cold water or ice, reducing core temperature ( $T_{co}$ ) in the rest phase before exercise [27] and attenuating the increase in  $T_{co}$  that is the consequence of increased metabolic heat production due to increased exercise intensity or limited thermoregulation processes [22].

Riera et al. [22] showed that internal percooling with the ingestion of ice-slush/menthol increases exercise performance in a hot and humid environment compared with the ingestion of ice-slush or cold/menthol beverages. Recently, in a meta-analytical review, Bongers et al. [4] hypothesized that a combination of precooling and percooling may be more effective in improving exercise performance than a single cooling strategy. Therefore, the aim of the current study was to determine whether the positive results for ice-slush/menthol ingestion during exercise would be further enhanced by the addition of internal precooling. We hypothesized that a combination of internal precooling with cold

water ingestion and internal percooling with ice-slush/menthol ingestion would restrict heat stress over the entire exercise period, which in turn would improve performance.

## **Methods**

### **Subjects**

Nine heat-acclimated (*i.e.*, living and training in Guadeloupe), trained male cyclists and triathletes [age:  $41 \pm 17$  years, height:  $179 \pm 9$  cm, body mass:  $73 \pm 7$  kg, maximum aerobic capacity ( $VO_{2max}$ ):  $59 \pm 11$  mL.min<sup>-1</sup>.kg<sup>-1</sup>, peak power output at max:  $335 \pm 48$  W] participated in the study. The athletes were training at least 10 hours per week at the time of study. The study was approved by the Ethics Committee of the Medicine and Sport Center in Guadeloupe (Ministry of Youth and Sports) and the Ethics Committee of the Training and Research in Sport Science Unit in Guadeloupe (Ministry of Higher Education and Research). All athletes completed a medical screening questionnaire and gave written informed consent prior to the study, which was also approved by the University Ethics Committee and conducted according to the Declaration of Helsinki.

### **Preliminary measurements**

On the athletes' first visit to the laboratory,  $VO_{2max}$  was measured during an incremental exercise test on an electronically braked cycle ergometer (TECHMED, TM 4170, Besancon, France). The initial workload was 30 W and increased by 30 W every minute until volitional fatigue. Gas exchange was measured throughout the entire test (ZANFerraris, Cardiorespiratory System, Oberthulba, Germany).  $VO_{2max}$  was achieved when two of the following criteria were met: (1)  $VO_2$  did not increase with an increase in intensity, (2) a clear plateau in oxygen uptake was seen, (3) HR was within 10 beats.min<sup>-1</sup> of

the age-predicted maximum of  $220 - \text{age}$ , and (4) the respiratory exchange ratio (RER) was greater than 1.05. Although the athletes (both triathletes and cyclists) were accustomed to this type of test, they participated in a trial to familiarize themselves with the protocol of the experimental trials using their own bicycle fixed on a cycle trainer (Tacx Satori T1856, Tacx BV, Wassenaar, the Netherlands). The familiarization trial was performed under neutral environmental conditions [ $23 \pm 0.5^\circ\text{C}$  and  $59.9 \pm 9\%$  relative humidity (RH)].

## **Experimental design**

The experimental trials were separated by 7 days and were undertaken in a randomized crossover design. The athletes were also asked to limit exercise to 60 minutes of light-intensity exercise the day before each trial. At the start of the trial days, the athletes consumed a standard breakfast that included food and 500 mL of beverage. The trials began at the same time of day for each athlete (between 12:00 and 15:30) to control for circadian variations in  $T_{co}$  and digestion. During the trials, the athletes wore cycling shorts, a cycling jersey, socks and shoes.

## **Experimental procedure**

The experimental trials were performed in laboratory in the tropical conditions of Guadeloupe, French West Indies (mean $\pm$ SD temperature in laboratory:  $30.7 \pm 0.8^\circ\text{C}$  and  $78 \pm 0.03\%$  RH). During the sessions, the athletes were not subjected to any flow of ambient air. Heart rate (HR) was monitored continuously using a portable telemetry unit (Suunto Memory Belt, Suunto, Vantaa, Finland) with recording every 5 seconds, and the data were analyzed with Suunto software.  $T_{co}$  was assessed via the gastrointestinal temperature using ingestible temperature measurement pills (CorTemp, HQ, Inc., Palmetto, FL, USA). The athletes were instructed to ingest these pills 8 to 10 hours before all experimental trials to

ensure the pill was out of the stomach, thereby avoiding variability in  $T_{co}$  due to pill movement or fluid/food consumption. The athletes completed two experimental trials: (1) a control trial where they drank a neutral beverage at 23°C during the 30-minute pre-exercise period and ice-slush/menthol at -1°C during exercise (NIM trial) and (2) a trial where they drank a cold beverage at 3°C during the 30-minute pre-exercise period and ice-slush/menthol at -1°C during exercise (CIM trial). During the 30 minutes of pre-exercise, they athletes drank 7 g.kg<sup>-1</sup> of neutral water (NIM trial) or cold water (CIM trial) at 0, 15 and 30 minutes. During exercise in both the NIM and CIM trials, the athletes drank 7 g.kg<sup>-1</sup> of ice-slush/menthol (-1°C) at 0, 7.5, 15, 22.5 and 30 km of exercise.

After the 30 minutes of pre-exercise, the athletes warmed up for 10 minutes by cycling at a freely chosen cadence at a power output of 178±45 W (*i.e.*, corresponding to the mean power output noted for the subjects at the first ventilatory threshold), cycled for 30 km at the fastest possible speed with a resistance level fixed to their mean power output noted at the second ventilatory threshold (*i.e.*, 335±90 W), and then cooled down for 10 minutes at the warm-up resistance level.

The L (-) menthol beverages contained a 0.025% natural menthol aroma (% vol: 86.0±1.0%; manufacturer's recommended dosage: 0.50 g.L<sup>-1</sup>)(Robertet, Grasse, France). The ice-slush was produced with an ice-slush machine (Brema, GB 902A, Professional Slush Machine, Ice Makers, Germany). The temperature of each beverage was measured with a digital thermometer (YSI 409B, Yellow Springs Instruments, OH, USA). A spoon was provided to aid ingestion of the ice-slush.

### ***Measurements***

$T_{co}$ , perceived thermal sensation (TS), perceived thermal comfort (TC), perceived exertion (RPE) and the performance time were recorded.  $T_{co}$ , TS and TC were recorded

before and every 10 minutes of the 30-minute rest phase and then every 5 km during exercise. TS and TC were determined on 7-point [modified 7-point scale ranging from “extremely cold” (1) to “extremely hot” (7)] and 4-point [modified 4-point scale ranging from “comfortable” (1) to “very uncomfortable” (4)] scales adapted from Hodder and Parsons [13]. RPE and the time performance were assessed every 5 km. Perceived exertion was rated using Borg’s 15-grade scale [3]. Nude body mass was assessed ( $\pm 0.1$  kg) before and after the 30-km trials (Tanita SC 330P, Tanita, Amsterdam, the Netherlands). Hydration status throughout the trials was later estimated by changes in nude body mass.

## **Statistical analyses**

Performance and RPE were analyzed during exercise, whereas  $T_{co}$ , HR, TS, and TC were analyzed in two phases: during the 30 minutes of rest and during exercise. We tested for normality using Skewness and Kurtosis tests, with acceptable Z values not exceeding +1 or -1. Once the assumption of normality was confirmed, parametric tests were performed. The variables were analyzed with two-way analyses of variance (ANOVA) with repeated measures (*i.e.*, beverage condition x time). Post-hoc analysis using Tukey’s post-hoc tests was conducted when required. Data analysis was performed with the Statistical Package for Social Sciences (SPSS version 19.0) (Chicago, IL, USA). Significance was set at the  $P < 0.05$ . All data are presented as mean $\pm$ SD.

## **Results**

### **Performance**

Global performance was not affected by condition ( $P > 0.05$ ): NIM ( $3737 \pm 552$  s) and CIM ( $3815 \pm 455$  s). When expressed by block (5 km), the performance means were not

significantly affected by condition ( $P>0.05$ ): NIM ( $624\pm 56$  s) and CIM ( $650\pm 70$  s). Block performance was affected by time ( $P<0.0001$ ) (Fig. 1).

### **Core temperature ( $T_{co}$ )**

There was no significant difference in the mean  $T_{co}$  during the resting periods of the two trials before drinking (for the two conditions:  $37.3\pm 0.3^{\circ}\text{C}$ ,  $P>0.05$ ). At the end of the resting period,  $T_{co}$  remained relatively unchanged at  $37.3\pm 0.31^{\circ}\text{C}$  after ingestion of neutral water ( $P>0.05$ ) but dropped by  $0.3\pm 0.1^{\circ}\text{C}$  to  $37.0\pm 0.3^{\circ}\text{C}$  ( $P<0.02$ ) after ingestion of cold water. During exercise,  $T_{co}$  increased over time ( $P<0.0001$ ) with no significant difference between trials ( $P>0.05$ ) (Fig. 2).

### **Heart rate (HR)**

The mean HR did not significantly differ between trials during the 30 minutes of pre-exercise ( $P>0.05$ ) or during exercise ( $P>0.05$ ). HR increased significantly from warm-up until the end of exercise ( $P<0.0001$ ) (Fig. 3).

### **RPE, thermal sensation, thermal comfort**

TS and TC did not significantly differ between trials during the 30 minutes of pre-exercise ( $P>0.05$ ) or during exercise ( $P>0.05$ ) (Fig. 4). There was no significant difference ( $P>0.05$ ) in RPE between trials, but RPE was affected by the beverage condition x time interaction ( $P<0.01$ ), with lower RPE at 30 km in the CIM trial than the NIM trial ( $P<0.05$ ) (Fig. 5). All three variables, TS, TC and RPE, increased significantly during exercise ( $P<0.001$ ).

## **Environmental conditions, weight and hydration status**

The mean environmental temperature did not differ between trials during the 30 minutes of pre-exercise (WBGT:  $29.0 \pm 0.6^\circ\text{C}$ , dry bulb temperature:  $29.7 \pm 0.6^\circ\text{C}$ , relative humidity:  $79 \pm 2\%$ ,  $P > 0.05$ ) or during exercise (WBGT:  $29.4 \pm 0.7^\circ\text{C}$ , dry bulb temperature:  $30.1 \pm 0.5^\circ\text{C}$ , relative humidity:  $79 \pm 2\%$ ,  $P > 0.05$ ). The athletes' pre-trial mean body mass did not differ between NIM and CIM (mean body mass  $\pm$  SD:  $74.5 \pm 7.5$  kg) and weight loss did not differ between trials (for NIM:  $1.1 \pm 0.5$  kg, for CIM:  $1.2 \pm 0.6$  kg,  $P > 0.05$ ).

## **Discussion**

The most important results of this study were the following: (1) the absorption of cold beverage in the 30-minute period before exercise (internal precooling) did not improve performance during the subsequent exercise conducted with ingestion of ice-slush/menthol beverage (internal percooling), and (2) despite the unchanged performance, RPE declined in the latter stages of exercise in the condition of combined internal precooling with cold beverage and internal percooling with ice-slush/menthol.

## **Influences of the combination of internal precooling and internal percooling on $T_{co}$ and HR**

The core temperature ( $T_{co}$ ) did not vary from baseline during the 30-minute rest period after ingesting neutral water, but it decreased by  $0.3^\circ\text{C}$  after drinking cold water. During exercise, there was no difference in  $T_{co}$  between the two trials. One explanation may be that drinking cold water weakened the heat evacuation process. Although TS was shown to be closely linked to skin temperature [24], it remained unchanged over the 30-minute rest period under

the two trial conditions, as shown in Fig 4A. Therefore, we speculate that skin temperature did not decrease after absorbing cold water, resulting in a lowered core-to-skin temperature gradient because of the reduced  $T_{co}$  [26, 27, 28]. The capacity of heat transfer from the body core to the periphery was thus reduced, followed by a decrease in the ability to transfer heat to the environment. On the other hand, a lower  $T_{co}$  during the rest phase in CIM may have led to a reduction in evaporative heat loss once the exercise started, as was demonstrated when athletes absorb cold water during exercise [2, 19]. Furthermore, the similar performances in the first block indicate that the metabolic heat production generated by the exercising muscles was the same in the two conditions. This observation also supports the idea that increased heat accumulation is due to a limited heat evacuation process when cold water is ingested. In addition, Lee et al. [16] showed that  $T_{co}$  was reduced by 0.5°C after precooling and remained 0.3°C lower during exercise in athletes drinking water at 4°C as opposed to 37°C, with 900 mL in the precooling phase and 100 mL every 10 minutes during exercise. Nevertheless, a 0.3°C decrease in  $T_{co}$  in the precooling phase and/or 7g.kg<sup>-1</sup>.30km<sup>-1</sup> of ice-slush/menthol may not have been sufficient to offset the heat evacuation degradation in the current study.

The heart rate (HR) did not differ between CIM and NIM during the 30-minute rest periods or the exercise trials. Stanley et al. [28] and Lee et al. [16] reported that absorbing cold water or ice only reduces HR in the internal precooling period, but not during exercise. In contrast, other studies with internal precooling [8, 15, 26, 34] or internal percooling [5, 6, 7, 22, 29] did not indicate any differences in HR when cold water or ice-slurry absorption was compared with neutral water absorption.

## **Sensations**

Thermal sensation (TS) and thermal comfort (TC) were not significantly different at any time between the two trials (Fig. 4). Although Teunissen et al. [30] and Barwood et al. [1] hypothesized that RPE, rather than thermal perception, is the primary factor to take into account to improve pacing strategy and performance in a hot environment, we observed lower RPE in CIM compared with NIM in the final stages of exercise but no difference in performance. This reduction could nevertheless be beneficial for longer exercise. For example, mental fatigue has been shown to reduce subsequent self-paced endurance performance [21]. In the absence of differences in  $T_{co}$ , HR, TS and TC between trials, a lower RPE might reflect lower mental fatigue. In addition, a change in RPE during exercise was recorded and may have contributed to the establishment of a new "RPE template" that is thought to reflect an adjustment in the pacing strategy during self-paced exercise for the subsequent exercise [32]. We could therefore expect an increase in the exercise pace with CIM in subsequent training sessions. However, these remain extrapolations.

## **Influences of the combination of internal precooling and internal percooling on exercise performance**

Internal precooling with cold water did not improve performance in the subsequent exercise with ice-slush/menthol beverage ingestion (Fig. 1). Previous studies have shown that both internal precooling [8, 15, 26, 34] and internal percooling [6, 22, 29], with either cold water or ice-slurry, increase endurance performance in a hot environment. To our knowledge, only three studies [12, 16, 25] have examined the effects of the combination of precooling strategies (*e.g.*, internal or external precooling or a combination of both) and internal percooling on endurance performance in a hot environment. Hasegawa et al. [12] found that a combination of external precooling (water immersion at 25°C for 30 minutes)

and internal percooling (an ingested amount of water at 14-16°C equivalent to the amount of fluid lost by sweat) during 60 minutes of cycling exercise at 60%  $\text{VO}_{2\text{max}}$  enhanced performance during a subsequent cycling exercise at 80%  $\text{VO}_{2\text{max}}$  to exhaustion, compared with internal percooling alone. In a hot environment, Lee et al. [16] showed that internal precooling (with 900 mL in a 30-minute pre-exercise period) and internal percooling (with 100 mL every 10 minutes), both with water at 4°C, prolonged cycling time to exhaustion by  $23\pm 6\%$  compared with water at 37°C. In our study, we hypothesized that the combination of internal precooling and internal percooling would increase performance more than internal percooling only, but this was not confirmed. However, our results are similar to those of Schulze et al. [25], who showed that precooling with the intake of ice-slurry ( $15\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) at  $-1^\circ\text{C}$  and the use of iced towels on the legs and torso combined with the *ad libitum* intake of ice-slurry ( $-1^\circ\text{C}$ ) during self-paced exercise did not increase performance in a hot and humid environment more than *ad libitum* intake of ice slurry during exercise only. These results indicate that precooling has no additional effect when percooling with the intake of very cold or ice-slush beverage is already used. Moreover, this reinforces the idea that performance enhancement through percooling with very cold or ice-slush beverage cannot be further optimized by precooling.

A lower  $T_{co}$  with cold water or ice-slurry absorption, as compared with neutral water absorption, is assumed to be the main factor in improved exercise performance [15, 16, 27]. However, some studies have indicated increased performance with internal precooling through cold beverage absorption compared with performance with neutral water absorption, although  $T_{co}$  did not differ over most of the exercise time [15, 26]. Further, Ross et al. [23] showed that a larger performance improvement was observed with combined internal/external precooling compared with external precooling alone, despite a smaller decrease in rectal temperature after combined internal/external precooling. Hence, a greater

decrease in  $T_{co}$  does not necessarily lead to better performance and is unlikely to be the main mechanism implicated in the internal cooling strategies to improve performance. It has been suggested that heat receptors along the digestive tract supply signals [33] that reduce the influence of the afferent signals provided by an increase in  $T_{co}$ , thereby increasing muscle recruitment and thus exercise performance [29, 34]. Indeed, the pleasant stimulus created by cold absorption may help to maintain central drive, increase motivation for exercise [7], and contribute to the increase in exercise performance [6, 22]. We therefore suspect that the signals supplied by the thermal receptors in the gastrointestinal tract and/or in the oropharyngeal region upon absorption of ice-slush/menthol may have played a decisive role in the exercise performance of the current study. First, it has been suggested that the ingestion of ice-slurry/menthol creates pleasant sensations and/or provokes an incorrect assessment of thermal stress, based on which the governor region of the brain [9] establishes an intensity to enable an increase in exercise performance [31]. Second, it has also been suggested that menthol tricks the hypothalamic thermoreceptors and hence the hypothalamus does not detect changes in  $T_{co}$  [22]. We suspect that the signals of coolness from absorbing ice-slush/menthol during exercise may have been more powerful than those from absorbing cold water during pre-exercise and may have overwhelmed them. Therefore, the role of the coolness signals from drinking cold water during pre-exercise was negligible in the activities of the motor control centers in the CIM condition. This would explain the lack of difference in performance in the current study from the start of ice-slush/menthol absorption during exercise in both trials.

## **Conclusions**

The results of this study showed that: (1) the absorption of cold beverage during the 30 minutes before exercise (internal precooling) did not improve performance during the subsequent exercise with ingestion of an ice-slush/menthol beverage (internal percooling) and (2) despite no increase in performance, RPE declined in the latter stages of exercise in the condition of combined internal precooling with cold beverage and internal percooling with ice-slush/menthol, suggesting the hypothesis that this combined method may be beneficial for longer exercise.

## **Perspectives**

The results of this study together with our previous findings demonstrate that internal percooling with ice-slush/menthol obtains the best performances and is therefore an effective strategy for athletes competing in hot climates.

Further, the data from previous studies have shown that internal percooling with ice-slurry/menthol helps to maintain a steady exercise intensity during exercise [31], or it may facilitate an increase in exercise intensity at the end stage of exercise [22]. In the current study, we analyzed performance changes over time (blocks=5 km), and the post-hoc results ( $P < 0.0001$ ) showed that cycling speed continuously declined from block 2 to block 5 (Fig. 1). The speed increased at block 6 but was only equivalent to that of block 1. This decline may have been due to the amount of ice-slush offered, which was small ( $7\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot 30\text{km}^{-1}$ ). Therefore, determining the optimal amount of ice-slush that should be absorbed might help athletes to maintain a steady rhythm throughout exercise.

Although enhanced performance was not observed, the lower RPE at the end of exercise in the condition of combined internal precooling and internal percooling suggests

that this combination might be beneficial for longer time trials. In addition, a lower RPE in the run segment of the triathlon might be particularly advantageous, making the combined strategy more effective than the internal precooling strategy alone. The attenuated rise in  $T_{co}$  observed in swimmers when they absorb cold water [14] could be considered as internal precooling for the subsequent cycle segment, and would thereby lead to reduced RPE at the end of cycling. Consequently, triathletes would start running with a lower RPE.

## Acknowledgments

The authors would like to acknowledge and thank the athletes for their generous time commitment and effort throughout the study.

## References

1. *Barwood MJ, Corbett J, White DK, James J.* Early change in thermal perception is not a driver of anticipatory exercise pacing during exercise in the heat. *Br J Sport Med* 2012; 46: 936–942
2. *Bain AR, Lesperance NC, Jay O.* Body heat storage during physical activity is lower with hot fluid ingestion under conditions that permit full evaporation. *Acta Physiol* 2012; 206(2): 98–108
3. *Borg G.* Perceived exertion as an indicator of somatic stress. *Scand J Rehabil Med* 1970; 2(2): 92–8
4. *Bongers CC, Thijssen DH, Veltmeijer MT, Hopman MT, Eijssvogels TM.* Precooling and precooling (cooling during exercise) both improve performance in the heat: a meta-analytical review. *Br J Sports Med* 2015; 49: 377-84
5. *Burdon CA, Ruell P, Johnson N, Chapman P, O'Brien S, O'Connor HT.* The effect of ice-slushey consumption on plasma vasoactive intestinal peptide during prolonged exercise in the heat. *J Therm Biol* 2015; 47: 59-62

6. *Burdon CA, Hoon MW, Johnson NA, Chapman PG, O'Connor HT.* The effect of ice slushy ingestion and mouthwash on thermoregulation and endurance performance in the heat. *Int J Sport Nutr Exerc Metab* 2013; 23: 458-469
7. *Burdon C, O'Connor H, Gifford J, Shirreffs S, Chapman P, Jonhson N.* Effect of drink temperature on core temperature and endurance cycling performance in warm, humid conditions. *J Sports Sci* 2010; 28(11): 1147–1156
8. *Byrne C, Owen C, Cosnefroy A, Lee JK.* Self-paced exercise performance in the heat after pre-exercise cold-fluid ingestion. *J Athl Train* 2011; 46(6): 592-9
9. *Gibson ASC, Noakes TD.* Evidence for a complex system integration and dynamic neural regulation of skeletal muscle recruitment during exercise in humans. *Br J Sports Med* 2004; 38: 797–806
10. *González-Alonso J.* Hyperthermia impairs brain, heart and muscle function in exercising humans. *Sports Med* 2007; 37: 37–373
11. *González-Alonso J, Teller C, Andersen SL, Jensen FB, Hyldig T, Nielsen B.* Influence of body temperature on the development of fatigue during prolonged exercise in the heat. *J Appl Physiol* 1999; 86: 1032-1039
12. *Hasegawa H, Takatori T, Komura T, Yamasaki M.* Combined effects of pre-cooling and water ingestion on thermoregulation and physical capacity during exercise in a hot environment. *J Sports Sci* 2006; 24(1): 3-9
13. *Hodder SG and Parsons K.* The effects of solar radiation on thermal comfort. *Int J Biometeorol* 2007; 51: 233–50
14. *Hue O, Monjo R, Lazzaro M, Baillot M, Hellard P, Marlin L, Jean-Etienne A.* The effect of time-of-day on cold water ingestion by high-level swimmers in tropical climate. *Int J Sports Physiol Per* 2013; 8: 442–451
15. *Ihsan M, Landers G, Brearley M, Peeling P.* Beneficial effects of ice ingestion as a precooling strategy on 40-km cycling time-trial performance. *Int J Sports Physiol Perform* 2010; 5: 140-51
16. *Lee JK, Maughan RJ, Shirreffs SM.* Cold drink ingestion improves exercise endurance capacity in the heat. *Med Sci Sports Exerc* 2008; 40: 1637-1644
17. *Maughan RJ.* Distance running in hot environments: A thermal challenge to the elite runner. *Scand J MedSci Sports* 2010; 20 (Suppl 3): 95–102
18. *McCann DJ, Adams WC.* Wet bulb globe temperature index and performance in competitive distance runners. *Med Sci Sports Exerc* 1997; 29: 955–961

19. *Morris NB, Bain AR, Cramer MN, Jay O.* Evidence that transient changes in sudomotor output with cold and warm ingestion are independently modulated by abdominal, but not oral thermoreceptors. *J Appl Physiol* 2014; 116(8): 1088–95
20. *Noakes TD.* Maximal oxygen uptake: “Classical” versus “contemporary” viewpoints: A rebuttal. *Med Sci Sports Exerc* 1998; 30: 1381–398
21. *Pageaux B, Lepers R, Dietz KC, Marcora SM.* Response inhibition impairs subsequent self-paced endurance performance. *Eur J Appl Physiol* 2014; 114(5):1095-105
22. *Riera F, Trong TT, Sinnapah S, Hue O.* Physical and perceptual cooling with beverages to increase cycle performance in a tropical climate. *PLoS ONE* 2014; 9(8): e103718.
23. *Ross ML, Garvican LA, Jeacocke NA, Laursen PB, Abbiss CR, Martin DT, Burke LM.* Novel precooling strategy enhances time trial cycling in the heat. *Med Sci Sports Exerc* 2011; 43: 123-133
24. *Schlader ZJ, Simmons SE, Stannard SR, Mündel T.* Skin temperature as a thermal controller of exercise intensity. *Eur J Appl Physiol* 2011; 111(8): 1631–1639
25. *Schulze E, Daanen HA, Levels K, Casadio JR, Plews DJ, Kilding AE, Siegel R, Laursen PB.* Effect of thermal state and thermal comfort on cycling performance in heat. *Int J Sports Physiol Perform* 2015; 10(5): 655-63
26. *Siegel R, Maté J, Watson G, Nosaka K, Laursen PB.* Pre-cooling with ice slurry ingestion leads to similar run times to exhaustion in the heat as cold water immersion. *J Sports Sci* 2012; 30(2): 155-65
27. *Siegel R, Maté J, Brearley MB, Watson G, Nosaka K, Laursen PB.* Ice slurry ingestion increases core temperature capacity and running time in the heat. *Med Sci Sports Exerc* 2010; 42: 717-25
28. *Stanley J, Leveritt M, Peake JM.* Thermoregulatory responses to ice-slurry beverage ingestion and exercise in the heat. *Eur J Appl Physiol* 2010; 110: 1163-1173
29. *Stevens CJ, Dascombe B, Boyko A, Sculley D, Callister R.* "Ice slurry ingestion during cycling improves Olympic distance triathlon performance in the heat." *J Sports Sci* 2013; 31(12): 1271-9.
30. *Teunissen LPJ, deHaan A, de Koning JJ, Daanen HAM.* Effects of wind application on thermal perception and self-paced performance. *Eur J Appl Physiol* 2013; 113: 1705–1717

31. *Tran Trong T, Riera F, Rinaldi K, Briki W, Hue O.* Ingestion of a cold temperature/menthol beverage increases outdoor exercise performance in a hot, humid environment. *PLoS ONE* 2014; 10(4): e0123815
32. *Tucker R.* The anticipatory regulation of performance: the physiological basis for pacing strategies and the development of a perception-based model for exercise performance. *Br J Sports Med* 2009; 43(6): 392-400
33. *Villanova N, Azpiroz F, Malagelada JR.* Perception and gut reflexes induced by stimulation of gastrointestinal thermoreceptors in humans. *J Physiol* 1997; 502(1): 215–222
34. *Yeo ZW, Fan PW, Nio AQ, Byrne C, Lee JK.* Ice slurry on outdoor running performance in heat. *Int J Sports Med* 2012; 33: 859-66

## Supporting Information

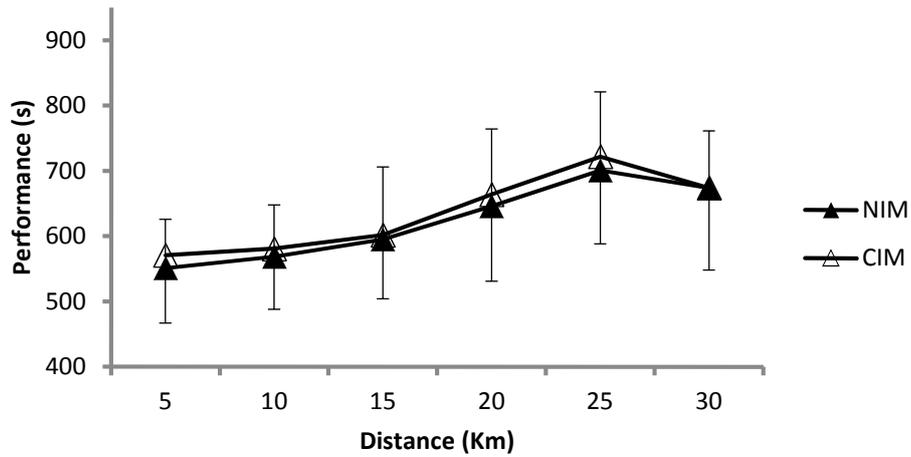
**Fig.1. Cycling times (seconds) for 5-km blocks.** Mean values and SD are shown.

**Fig. 2. Core temperature at rest, and during warm-up and exercise for trials.** Mean values and SD are shown. \* Significantly different from Neutral water (P<0.05).

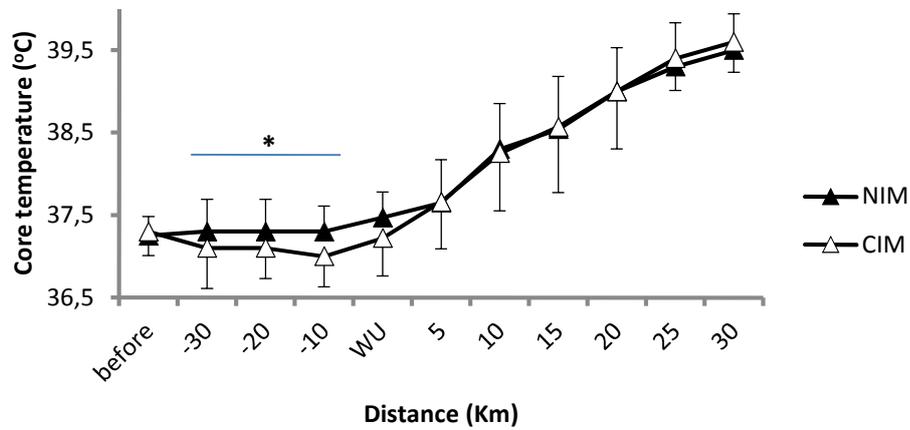
**Fig. 3. Heart rate (beats.min<sup>-1</sup>) at rest, and during warm-up and exercise for trials.** Mean values and SD are shown.

**Fig. 4. (A) Rating of thermal sensation, (B) rating of thermal comfort for trials.** Mean values and SD are shown.

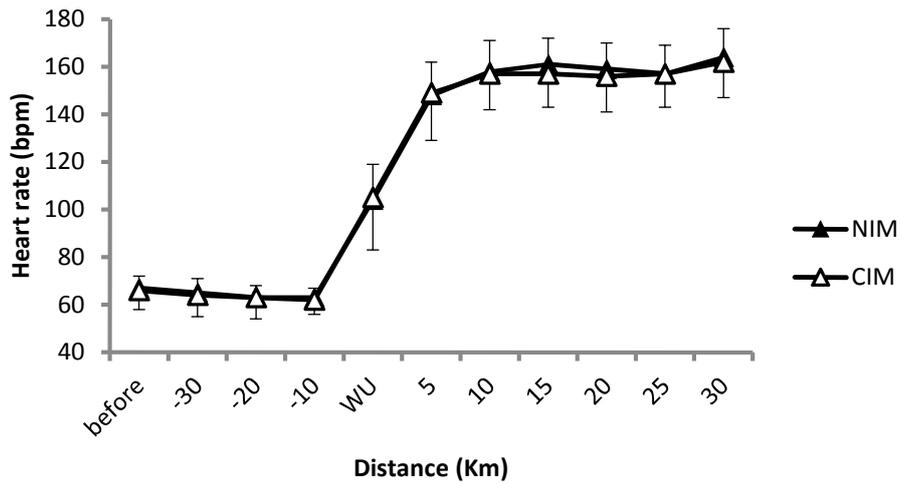
**Fig. 5. Rate of perceived exertion during trials** \*Significantly different between NIM and CIM (P<0.05). Mean values and SD are shown.



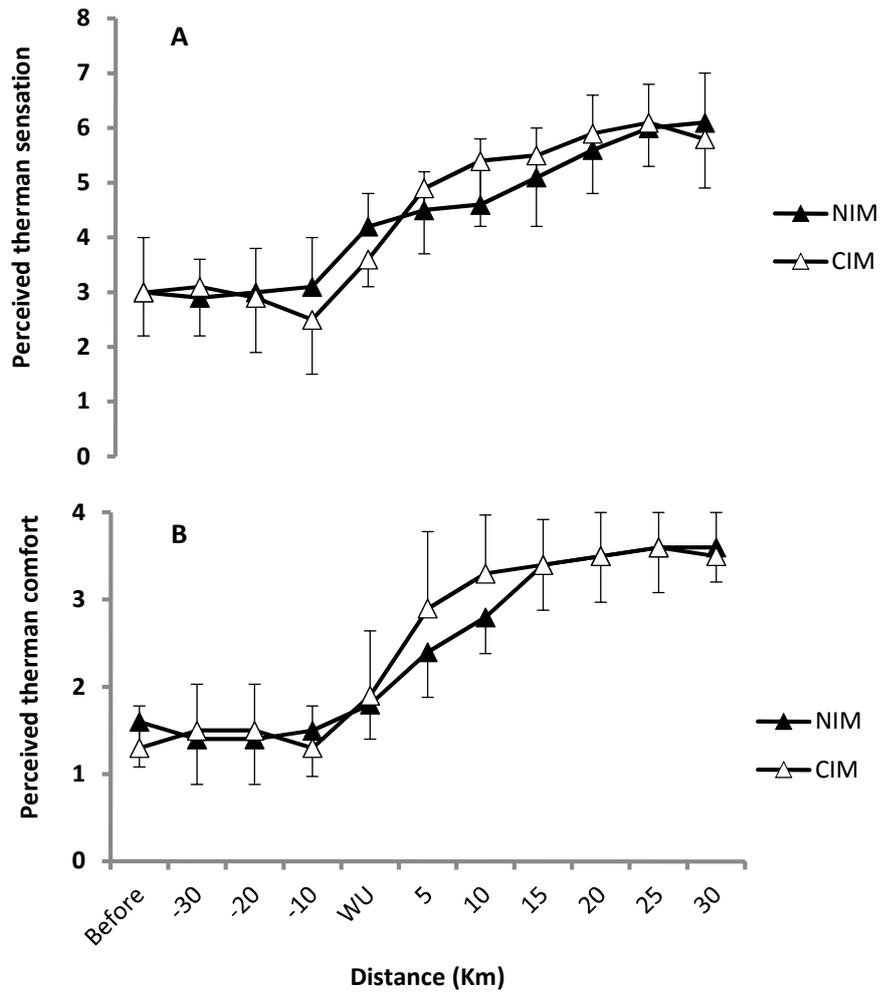
**Fig.1. Cycling times (seconds) for 5-km blocks. Mean values and SD are shown.**



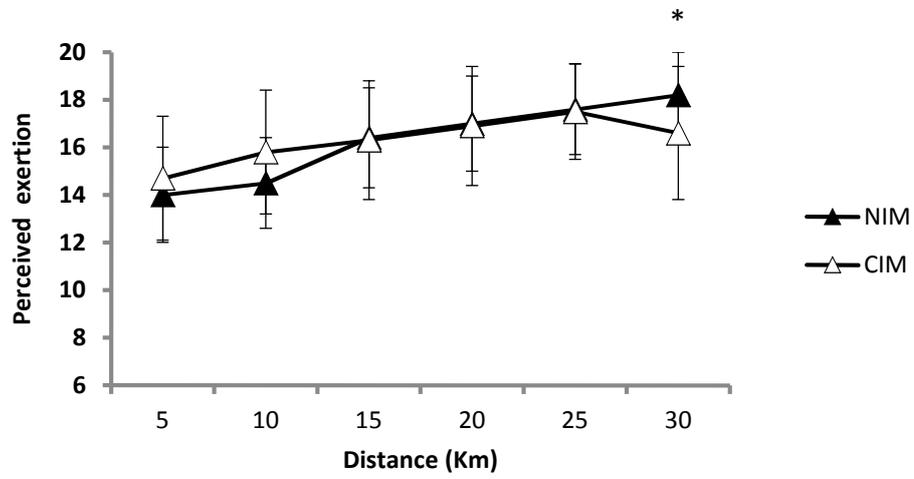
**Fig. 2. Core temperature at rest, and during warm-up and exercise for trials.** Mean values and SD are shown. \* Significantly different from neutral water (P<0.05).



**Fig. 3. Heart rate (beats.min<sup>-1</sup>) at rest, and during warm-up and exercise for trials. Mean values and SD are shown.**



**Fig.4. (A) Rating of thermal sensation, (B) rating of thermal comfort for trials. Mean values and SD are shown.**



**Fig. 5. Rate of perceived exertion during trials.** \*Significantly different between NIM and CIM ( $P < 0.05$ ). Mean values and SD are shown.