

LES EFFETS DU CLIMAT TROPICAL SUR LA PERFORMANCE AEROBIE : STRATEGIES DE COOLING MENTHOLE

KEVIN RINALDI

THESE PRESENTEE POUR OBTENIR LE GRADE DE :

DOCTEUR DE L'UNIVERSITE DES ANTILLES

DISCIPLINE : STAPS

SOUTENUE LE 21 DECEMBRE 2018

JURY

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

Mr Thierry BERNARD, MCF-HDR, Université de Toulon, **Rapporteur**

Mr Frédéric GRAPPE, MCF-HDR, (en détachement) Université de Besançon,

Directeur Performance team Groupama-FDJ, **Rapporteur**

Mr Olivier HUE, Professeur, Université des Antilles, **Directeur**

Mr Romuald LEPERS, Professeur, Université de Bourgogne, **Président**

Mr Michel CARLES, PU-Pr., CHU Guadeloupe, **Assesseur**

Remerciements

Je remercie tout d'abord mon directeur de Thèse, *Olivier Hue*. Depuis la première rencontre jusqu'à la soutenance, son aide et son soutien m'ont permis de mener à bien cette thèse. Tout au long de mon parcours les obstacles ont été nombreux et sa patience mais aussi son accompagnement ont été très précieux afin de terminer ce doctorat. Olivier, merci de m'avoir laissé la liberté de construire ce travail tout en bâtissant ma carrière professionnelle dans le monde du cyclisme.

Au président du Jury,

Mr *Romuald Lepers*, à qui j'exprime mes plus sincères remerciements de m'avoir fait l'honneur d'accepter de présider le jury de thèse. Cette nouvelle étape avec un expert de la discipline ne fait que renforcer ce travail de thèse qui je l'espère permettra de nouvelles ouvertures sur ces thématiques.

Aux rapporteurs,

Vous incarnez les différentes étapes de mon parcours personnel et professionnel. *Thierry* qui m'a ouvert les portes d'un laboratoire et m'a permis de trouver une direction. *Fred* qui a été le lien entre le monde de la recherche et du terrain, et sans qui je ne serai pas en Guadeloupe. Votre regard sur mon travail ainsi que votre expertise sont pour moi d'une très grande richesse, et veuillez croire qu'ils ont aidés à rendre ce document meilleur. Je suis très honoré de votre contribution et je vous en remercie.

Un immense merci à *Sophie Antoine-Jonville*. D'une disponibilité infinie et un soutien au quotidien qui m'ont permis d'avancer à chacune des étapes de mon cursus de doctorant. Sophie, sincèrement merci.

Michelle, que je ne saurais remercier assez, pour sa patience, son aide, son soutien, et par dessus tout son amitié.

Than, qui au delà de son amitié m'a permis d'approfondir les connaissances sur ce sujet si spécifique, et m'a aidé dans le cheminement de ma réflexion. A bientôt pour une salade Vietnamiennne...

Aux amis d'aujourd'hui, qui tout du long m'ont fait bénéficier de leurs aides, regards, remarques et critiques, mais qui par dessous tout m'ont accompagnés afin de mener à bien ce projet : *Aurélie, Bérénice, Catharina, Cécile, Clovis, Maëva, Maryse, Myriam, Shelby, Steph* ... Merci à vous !

Merci aux différents acteurs du monde cycliste qui par delà mon doctorat m'ont fait évoluer et progresser dans le monde du cyclisme et de la recherche, mais également humainement : *Didi et Henry* bien entendu, mais aussi *Adrien, Gio, Jordy, José, Ludo, Vivien*...

Merci aux équipes et aux coureurs volontaires pour m'avoir fait confiance afin de mener à bien ces études.

Je souhaite également remercier mes parents et mon frère, Lucas, qui malgré la distance et les absences ont su me suivre, m'aider et me soutenir dans ce projet.

Et les mots me manquent afin de rendre hommage à *Ombeline*. Ta présence au quotidien, ton soutien et ta patience sont les atouts de la réussite de ce travail. Nous avons eu la joie immense d'accueillir Ethan durant ces années de thèse. Ce n'est qu'une marche pour la suite, et la prochaine arrivée de notre petite fille ne fait que renforcer l'idée que la suite s'annonce encore plus palpitante !

Résumé

L'environnement climatique est l'un des facteurs pouvant influencer la performance aérobie. Il existe des températures idéales avec lesquelles les athlètes réalisent de meilleures performances : entre 10 et 12°C en course à pied (Maughan et coll. 2010) ou inférieures à 32°C en cyclisme (Peiffer & Abbiss 2011). Davies et coll. (2016) condensent dans une méta-analyse différentes études portant sur le CLM en cyclisme en environnement chaud et relèvent que la performance est altérée en climat chaud à partir du milieu de l'épreuve ($P < 0,02$) et jusqu'à la fin ($P = 0,01$) par rapport à une condition contrôle. Ce résultat laisse donc apparaître qu'outre la température environnementale, la durée de l'effort peut également être déterminante dans l'impact du climat sur la performance.

L'élévation de la température n'est pas le seul facteur environnemental pouvant influencer la performance. Maughan et coll. (2012) mettent en évidence qu'au plus le taux d'humidité est élevé au plus la performance aérobie est détériorée. Dans cette étude, des athlètes non acclimatés, réalisent une épreuve à vélo à 70% de $VO_2\text{max}$ jusqu'à épuisement lors de quatre sessions à 24, 40, 60 et 80% d'HR (T: 30°C). Les résultats, montrent que le temps d'exercice diminue significativement avec l'augmentation du taux d'humidité ($P < 0,05$).

A travers ce travail de recherche nous avons donc investigué la question : comment faire pour limiter cet impact du climat sur la performance ?

Pour ce faire 3 axes sont développés à travers nos études :

- a. Etudier l'efficacité de protocoles de refroidissement à plusieurs moment de la performance : avant, pendant et entre deux efforts consécutif.
- b. Déterminer si les combinaisons de froid peuvent se combiner.

c. Déterminer si l'utilisation du menthol peut permettre une optimisation des protocoles de cooling.

Les principaux résultats de cette thèse mettent en évidence que l'utilisation de méthodes de cooling est efficace mais que cette efficacité dépend du protocole utilisé. Nous avons ainsi mis en évidence (1) Qu'en pré-cooling il est nécessaire de débiter 1h avant l'effort pour avoir une efficacité de la méthode ; (2) Qu'une immersion avec du menthol est plus efficace qu'une immersion seule entre deux efforts de 20' mais qu'utilisé sur des vêtements son efficacité n'est pas prouvée; (3) Que le port d'un gilet froid cumulé à une ingestion d'une boisson froide à l'échauffement n'est pas plus efficace qu'un refroidissement interne seul (4) Que le menthol peut influencer les performances en jouant un rôle sur le SNC. L'action du menthol va permettre au SNC de percevoir l'environnement comme étant « plus favorable » et par conséquent entraîner une modification de la rétroaction thermorégulatrice, permettre une performance plus élevée. Cela sans que le menthol n'est joué un rôle délétère à la thermorégulation.

Sommaire

Abréviations	4
Liste des figures	5
Liste des schémas	10
Liste des tableaux	10
REVUE DE LA LITTERATURE	11
Introduction générale	12
I) La thermorégulation : les différents moyens d'échange de chaleur	15
1. Principes généraux	15
2. La convection	18
3. L'évaporation	19
4. La conduction	20
5. La radiation	21
6. La respiration	22
II) Exercice en environnement chaud et humide	23
1. La performance	23
2. Les paramètres physiologiques et psychologiques	31
3. Les effets de l'entraînement en climat tropical	36
III) Différents facteurs impactant la performance en climat tropical	38
1. Thermoregulation	38
2. Ajustement cardio-vasculaire	39
3. Anticipation	41
4. Psychologie	45
5. Déshydratation	46
6. Chronobiologie	48

7. Autres hypothèses	48
IV) les différentes méthodes luttant contre la diminution de la performance en climat tropical	49
1. Externe	50
i: Immersion	50
ii: Cryothérapie	64
iii: Autres techniques	66
2. Interne	67
i: per-cooling	68
ii: pre-cooling	71
3. Cumul des techniques	73
i : Cumul de deux techniques internes	73
li : Autres stratégies de Cumul	74
4. Acclimatation ou adaptation à la chaleur	76
V) Le menthol	79
1. Effet du menthol sur la performance	79
i : Effet de l'ingestion du menthol	79
ii : Effets cutanés du menthol	82
2. Mécanistique du menthol	86
CONTRIBUTION PERSONNELLE	94
I. Objectifs et hypothèses	95
1. Généralités	95
2. Objectifs et hypothèses de travail	98
3. Liste des publications	100
4. Méthodologie générale	102
Sujets	102
Protocole	103
Conditions environnementales	104
Protocoles expérimentaux	105
Les mesures	112
5. Résultats	114

Etude 1	114
Etude 2	124
Etude 3	132
II. DISCUSSION	135
Rappel hypothèses et résultats principaux	135
Discussion générale	137
III. CONCLUSION	147
Perspectives	149
REFERENCES	151
ANNEXES	174
PUBLICATIONS	180

A b r é v i a t i o n s

CT : Confort thermique

FC : Fréquence cardiaque

FCmax : Fréquence cardiaque maximale

HR : Humidité relative

HPA : Hypothalamique hypophysaire surrénalien

IL : Interleukine

LPS : Lipopolysaccharides

NDP : Niveau de difficulté perçu

P : Puissance

SNC : système nerveux centrale

ST : Sensation thermique

T : Température ambiante

Tcen : Température centrale

Tcut : Température cutanée

Trec : Température rectale

VO₂max : Consommation maximal d'oxygène

Liste des figures

Figure 1.1 : Différents paramètres influençant la température centrale lors d'un exercice dans un environnement chaud (Cramer et coll. 2016) mettant en évidence l'importance de la balance « production de chaleur métabolique » et « perte de chaleur » dans les processus de changement de la température corporelle

Figure 1.2 : Taux de sueur corporelle en fonction des niveaux croissants de la production de chaleur et de la température ambiante, entraînant une exigence d'évaporation absolue plus élevée pour maintenir l'équilibre thermique (Gagnon et coll. 2013; Nielsen et coll. 1965, par Cramer et coll. 2016)

Figure 1.3 : La performance significativement moins bonne lors un CLM de 40 kms en condition chaude (32°C) comparées aux autres conditions à 17°C, 22°C et 27°C. (Peiffer & Abbiss. 2011). Par bloc de 5 kms la différence entre la condition 17°C et 32°C intervient dès le 15^{ème} kms.

Figure 1.4 : Méta analyse de l'évolution de la performance en condition chaude comparée à la condition neutre (Index 0). La performance est significativement affectée à partir du milieu des épreuves réalisées en ambiance chaude. (Davies et coll. 2016)

Figure 1.5 : Corrélation du déficit de performance établi par rapport à une condition neutre entre (A) température ambiante, (B) index comprenant la température ambiante, l'humidité relative et la vitesse du vent ; (C) l'index WBGT et (D) l'index UTCI. (Junge et coll. 2016)

Figure 1.6 : Influence de l'humidité relative (HR) environnementale lors d'un exercice jusqu'à épuisement (70% de VO₂ max) en cyclisme pour une température de 30°C : La durée d'exercice est significativement moins importante en condition 80% et 60% HR comparativement à 24% HR.

* P < 0,05 ; ** P < 0,01 (Maughan et coll. 2012b)

Figure 1.7 : Evolution de la température cutanée, de la FC et de la puissance lors d'un CLM de 7,5 kms avec l'application d'un radiateur infrarouge (conditions « heat » et « precool ») correspondant à la zone grisée, comparé à une condition contrôle sans exposition aux infrarouges . (Levels et coll. 2012). La puissance est significativement plus élevée dans la condition contrôle après la période d'exposition par rapport aux deux autres conditions, et s'accompagne d'une FC significativement plus basse à la fin de l'exposition aux infrarouges comparativement aux deux autres conditions.

* significativement différent par rapport aux deux autres conditions (P < 0,05)

Figure 1.8 : (a) Stockage de chaleur (S) analysé par intervalle de 30 min en fonction du taux d'humidité relative lors de 90min de marche : avec 85% d'HR (S) est significativement plus élevée comparativement aux autres conditions dès la 30^{ème} minutes.

(b) Températures rectales durant les 90 min de marche : T_{rec} est significativement plus élevée avec 85% d'HR comparativement aux 3 autres conditions et cela à partir de 40' d'activité.

(c) Températures cutanées durant les 90 min de marche : T_{cut} est significativement plus élevée avec 85% d'HR comparativement aux 3 autres conditions et cela à partir de 40' d'activité (Moyen et coll. 2014)

Figure 1.9 : Durée d'exercice (minutes) en fonction des conditions froides (15°C), neutre (25°C) et chaude (35°C). En condition chaude la durée d'effort est significativement moins bon comparativement aux deux autres conditions.

* différence significative avec neutre et froide ($P < 0,001$) (Tucker et coll. 2006)

Figure 1.10 : Effet de l'immersion en eau froide en fonction des conditions environnementales (Wegmann et coll. 2012). L'immersion est d'autant plus efficace que la condition environnementale est à une température élevée

Figure 1.11 : Vitesse de diminution de la température rectale en fonction de la température d'immersion (2°C; 8°C; 14°C; 20°C) pour atteindre 37,5°C (Proulx et coll. 2003).

Figure 1.12a : Evolution de la température corporelle au cours du protocole en fonction des différentes immersions. Vaille (2008). L'absence d'immersion (ACT, pour récupération active) ne permet pas une diminution de la température corporelle comparativement aux conditions d'immersions

Figure 1.12b : Niveau de performance établi en % par rapport à l'exercice d'avant immersion pour chacune des immersions.

* performance significativement meilleure comparée à la condition récupération active (ACT).
Vaille (2008)

Figure 1.13 : Performance (en secondes) sur un 20 kms en laboratoire, lors de l'absorption d'eau neutre/menthol, d'eau froide/menthol et de glace pilée/menthol. Les valeurs moyennes et SD sont présentées (Trong et coll. 2015). Une eau glace pilée/menthol permet une durée significativement plus courte comparativement aux deux autres conditions

Figure 1.14 : Performance (secondes) de 20 kms à vélo lors de l'ingestion d'eau neutre, froide, et de glace pilée avec ou sans menthol (Riera et coll. 2014). A température égale, une boisson mentholée permet une meilleure performance comparativement à la même eau sans menthol.

* Différence significative par rapport à l'eau neutre sans menthol ($P < 0,01$)

† Différence significative par rapport à l'eau neutre/menthol ($P < 0,01$)

β Différence significative par rapport à l'eau froide/menthol ($P < 0,01$)

Figure 1.15 : Stimulation des TRP en fonction de la température et de l'action de certains comestibles sur ces thermorécepteurs. TRPM8, TRPM3 et TRPV4 peuvent être activé par le menthol

Figure 1.16 : Action de GABA sur les récepteurs GABA_A

Figure 2.1 : Evolution de la température rectale au cours à T0, T1, T2 et à la fin de l'épreuve. T_{rec} est significativement affectée avec le temps ($P < 0,05$). La température rectale est significativement plus élevée en condition menthol après l'immersion comparativement à la condition sans menthol.

* Différence significative ($P < 0,05$)

Figure 2.2 : Evolution de la température cutanée à T0, T1, T2 et à la fin de l'épreuve. L'immersion permet de diminuer significativement T_{cut} pour les deux conditions, comparativement à avant l'immersion.

* Différence significative ($P < 0,05$)

Figure 2.3 : évolution du niveau de difficulté perçue et de la sensation thermique entre T1 et T2.

ST et NDP sont significativement plus bas après l'immersion comparativement à avant.

† Différence significative ($P < 0,05$) du NDP entre T1 et T2 en condition menthol

* Différence significative ($P < 0,05$) entre T1 et T2 en condition sans menthol

** Différence significative ($P < 0,05$) entre T1 et T2 en condition menthol

Figure 2.4 : Performance par bloc de 5 min pour les conditions neutre, pré-cooling 30min (pré-30) et pré-cooling 60min (pré-60).

Différence significative ($P < 0,03$) entre pré-60 et les deux autres conditions à partir du bloc 45^{ème} minutes

Figure 2.5 : Evolution de la température rectale au repos pour les trois conditions. Trec est significativement plus basse en condition pré-cooling 60min (Pré-60) comparativement à pré-cooling 30min (Pré-30) et neutre à la fin du pré-cooling.

* Différence significative ($P = 0,035$) entre Pré-60 et les deux autres conditions

Figure 2.6 : Evolution de la température rectale durant les 60 min d'exercice pour les trois conditions. Effet temps pour les 3 conditions.

Différence significative ($P < 0,001$) au cours du temps jusqu'à 45 min d'efforts

Figure 2.7 : Evolution de la performance globale au cours du temps. Effet temps ($P < 0,001$) sans différence entre les 3 conditions : neutre, pré-cooling 30min (pré-30) et pré-cooling 60min (pré-60)

Liste des schémas

Schéma 2.1 : Protocole étude 1

Schéma 2.2 : Protocole étude 2

Schéma 2.3 : Protocole étude 3

Liste des tableaux

Tableau 1.1 : Durée d'effort (minutes) et puissance moyenne (Watt) sur un CLM de 20 kms en conditions chaude et froide (Tucker et coll. 2004). La puissance est significativement plus élevée, et le temps significativement plus court en condition froide comparativement à la condition chaude.

Tableau 1.2 : Les effets de l'application cutanée du menthol sur la capacité d'exercice et la performance (d'après Stevens et coll. 2016).

Tableau 2.1 : Données générales des sujets (moyennes et écart-types)

Tableau 2.2 : Conditions environnementales des études 1, 2 et 3.

REVUE DE LA LITTERATURE

INTRODUCTION GENERALE

La performance sportive est multifactorielle. Celle-ci peut dépendre de l'adaptation à l'entraînement, de la récupération, du type d'effort... Cette liste non exhaustive comprend également un facteur important et pourtant souvent peu étudié : l'environnement. Par exemple, la performance en endurance est altérée dans un environnement contraignant (e.g. où la température et le taux d'humidité sont élevés, en altitude...). Cela implique des adaptations et des réponses physiologiques différentes qu'en milieu dit « neutre ». C'est le cas de la performance en climat tropical (Hue 2011) : la performance aérobie dans ce milieu est altérée par l'action de différents mécanismes.

L'un des mécanismes le plus souvent mis en avant est la thermorégulation, et implicitement l'hyperthermie : González-Alonso et coll. (1999) suggèrent que le temps d'épuisement dans des environnements chauds est inversement lié à la température centrale initiale et directement lié à la vitesse de stockage de la chaleur. Kenefick et coll. (2010) mettent en évidence également que la diminution de la performance est associée avec une température cutanée élevée en environnement chaud. D'autres facteurs sont suggérés tels que l'anticipation (Tucker et coll. 2006), l'ajustement cardio-vasculaire (Périard et coll. 2011), la déshydratation (Kenefick et coll. 2010), les effets psychologiques (Wegmann et coll. 2012) ou plus récemment l'aspect psychobiologique (Pageaux et coll. 2014). Les mécanismes pouvant impacter la performance sont donc multiples, et ne s'opposent pas nécessairement et peuvent être complémentaires. Mais globalement les différents facteurs utilisés pour expliquer cette diminution de la performance restent débattus.

Afin de lutter contre ces différents mécanismes et ainsi minimiser leurs impacts sur la détérioration de la performance, plusieurs stratégies ont été étudiées. C'est le cas notamment de l'utilisation de procédés de refroidissement. Il existe trois grandes catégories de refroidissement :

- Le refroidissement externe : on peut répertorier dans cette catégorie les refroidissements par l'immersion (Vaile et coll. 2008a; Clements et coll. 2002), le port de vestes réfrigérées (Uckert & Joch 2007; Arngrímsson et coll. 2004) ou encore la cryothérapie (Bouzigon et coll. 2016).

- Le refroidissement interne : par l'ingestion de boissons froides ou de la glace pilée durant l'effort (per-cooling) (Trong et coll. 2015; Riera et coll. 2014), avant l'effort (pré-cooling) (Naito et coll. 2017) ou une combinaison entre pré-cooling et per-cooling (Riera et coll. 2016; Schulze et coll. 2015; Ross et coll. 2011).

- Le cumul de plusieurs refroidissements comme dans la publication de Quod et coll. (2008) où les auteurs combinent une veste de refroidissement avec une immersion.

Néanmoins, d'autres techniques peuvent également être utilisées sans forcément rentrer dans ces catégories telles que l'acclimatation (Racinais et coll. 2015).

Récemment un nouveau champ a également intéressé la communauté scientifique : l'effet du menthol. Les différentes publications s'orientent notamment sur ses actions analgésiques (Liu et coll. 2014; Pan et coll. 2012) et son effet de sensation de froid (Eccles 1994) afin de limiter la dégradation de la performance en environnement chaud. Le menthol peut être utilisé sous différentes formes : que ce soit par son ingestion dans des boissons (Trong et coll. 2015) ou par application cutanée (Barwood et coll. 2015).

Dans le cadre de cette thèse, le travail sera recentré sur différentes stratégies permettant de limiter l'impact du climat tropical lors de performance aérobie et au seuil anaérobie. Dans un premier temps sera développée une revue de la littérature permettant de décrire l'impact du climat tropical sur la performance, les différents mécanismes sous-jacents à cet impact pour enfin décrire les différents procédés utilisés afin d'en limiter les contraintes. Dans un second temps il sera proposé la contribution personnelle portant sur les études expérimentales réalisées. Ainsi dans la 1^{ère} étude nous nous sommes intéressé aux effets du menthol utilisé durant une immersion entre deux épreuves de 20 min en cyclisme. L'hypothèse étant que le menthol va permettre, à même température d'immersion, d'augmenter la sensation de froid induisant des effets bénéfiques sur la performance. Dans la seconde étude nous allons nous intéresser au pré-cooling afin de déterminer si un pré-cooling avec de la glace pilée et du menthol peut renforcer les résultats positifs de l'ingestion d'eau froide mentholée durant un exercice maximum d'une heure. Dans une dernière étude nous expérimentons le cumul de deux techniques de pré-cooling, l'une interne (boisson froide mentholée) et l'autre externe (gilet avec ou sans menthol). Par cette dernière étude nous souhaitons voir si un pré-cooling interne peut avoir un effet cumulatif avec le port d'une veste froide.

Cette thèse s'articule donc autour du développement de stratégies de cooling déjà étudiées par la littérature scientifique (tel que l'ingestion de boisson froide, l'immersion ou le port de gilet) afin d'en optimiser et d'approfondir les connaissances liés à ces protocoles.

I) LA THERMOREGULATION : LES DIFFERENTS MOYENS D'ÉCHANGE DE CHALEUR

1. Principes généraux

La température du corps est le résultat des phénomènes conjugués de production et de déperdition de chaleur : la thermogenèse et la thermolyse. L'homme étant homéotherme il doit maintenir sa température centrale relativement stable.

S'il est établi que les deux principales manières que possède le corps pour se refroidir sont la transpiration et l'augmentation de la circulation sanguine cutanée, Notley et coll. (2017) viennent de confirmer que la différence dans la réponse à la chaleur dépend de la taille et de la forme du corps et non d'autres facteurs, tel que le sexe.

Il est couramment utilisé un modèle bi-compartimental afin d'expliquer les échanges de chaleur :

- Un noyau central constitué des organes thoraciques, viscères, du système nerveux central ainsi que des muscles striés squelettiques.

Une enveloppe périphérique constituée de la peau et du tissu sous-cutané.

Alors que l'enveloppe périphérique peut avoir une amplitude thermique importante (de 20°C à 40°C environ) sans que cela n'impact négativement l'organisme, il est important que la température du noyau central reste relativement stable : autour de 37°C. Cela permet de préserver les conditions optimales de fonctionnement de l'organisme telles que le maintien fonctionnel des réactions enzymatiques ou encore l'activation des principaux mécanismes intracellulaires.

Afin de lutter contre l'augmentation de la chaleur induite par l'exercice, résultant des réactions chimiques intracellulaires et des contractions musculaires, qui s'ajoutent à la chaleur reçue de l'extérieur, l'organisme met en place des mécanismes de thermorégulation. Pour cela la thermorégulation est favorisée par la conduction, la convection, le rayonnement, et l'évaporation à la surface de la peau (Gisolfi & Wenger 1984). L'utilisation ou non de chacun de ces mécanismes est dépendant des contraintes environnementales telles que la température, l'humidité ou le vent (Cheuvront & Haymes 2001). Récemment, Cramer & Jay (2016) relèvent, dans une revue de littérature, les différents facteurs pouvant affecter la température centrale lors d'un exercice en environnement chaud. Il en ressort que la capacité à maintenir l'équilibre thermique par une vasodilatation cutanée et la transpiration est souvent limitée par un environnement thermique contraignant : l'équilibre thermique peut être impossible en dépit de l'augmentation du flux sanguin cutané et des taux de production de sueur. L'interaction complexe entre la production de chaleur métabolique, les propriétés physiques de la peau et de l'environnement et la taille du corps sont les principaux composants qui déterminent les réponses à la température du noyau (figure 1). Si l'équilibre thermique est altéré alors la température du noyau augmente progressivement jusqu'à des niveaux potentiellement nuisibles pour la performance voir pour la santé.

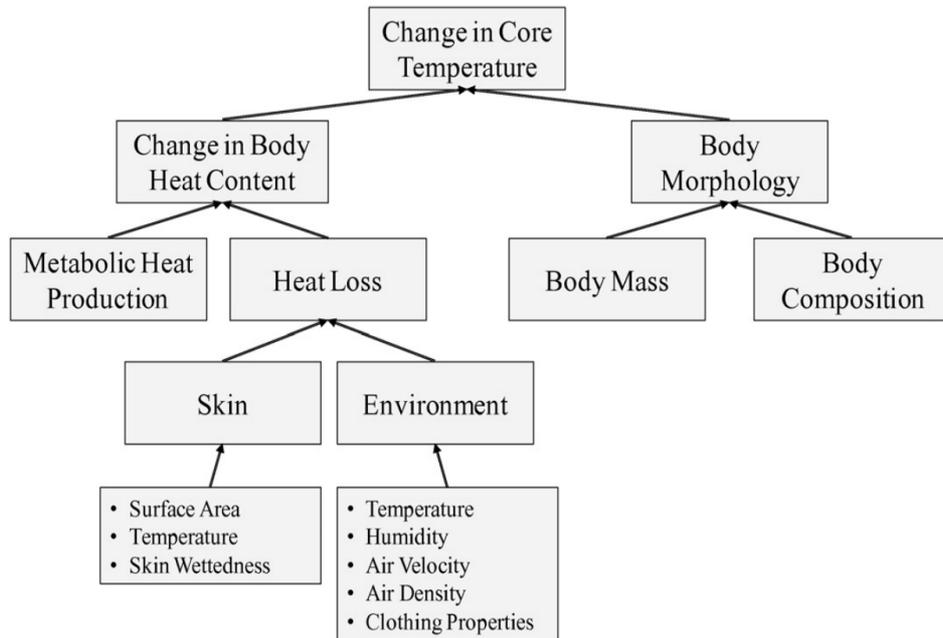


Figure 1.1: Différents paramètres influençant la température centrale lors d'un exercice dans un environnement chaud (Cramer et coll. 2016) mettant en évidence l'importance de la balance « production de chaleur métabolique » et « perte de chaleur » dans les processus de changement de la température corporelle

2. La convection

La convection peut se définir par le processus de deux milieux de températures différentes se déplaçant l'un par rapport à l'autre. Par exemple ce type d'échange est réalisé entre la surface cutanée avec l'air ou l'eau. Dans les cas précédemment décrit on peut parler de convection naturelle. Généralement on distingue la convection naturelle à la convection forcée. Cette dernière correspond à l'application d'une circulation artificielle permettant d'accélérer le transfert de chaleur, comme avec l'ajout d'un ventilateur. Il a été mis en évidence que la vitesse de déplacement de l'air influence la perte de chaleur par l'augmentation de la convection permettant ainsi les capacités de thermolyse par l'évaporation (Saunders et coll. 2005). Les auteurs de cette étude montrent qu'au plus la vitesse de l'air (appliquée par un ventilateur) est élevée durant un effort de 2h à vélo (T: 33°C ; HR: 59%), au moins l'accumulation de chaleur et l'augmentation de la température sont importantes : la convection avec l'air facilite l'évaporation de la sueur, ce qui entraîne un taux plus élevé de perte de chaleur totale pouvant ainsi préserver de l'hyperthermie lors d'un stress thermique sévère (Jay & Cramer 2016; Ravanelli et coll. 2014).

Inversement, dès lors que la température de l'air est supérieure à la température de la peau alors le corps ne perd plus de chaleur mais en gagne en augmentant l'accumulation de la chaleur. Cette augmentation de chaleur est aussi présente dans le cas où la convection n'est pas possible : dans les sports avec peu de déplacements, des déplacements lents, ou avec le port de vêtements longs. Dans ces cas l'organisme devra s'appuyer sur d'autres leviers thermorégulateurs afin d'évacuer la chaleur emmagasinée, et notamment l'évaporation. Seul le cyclisme, (et dans une moindre mesure la natation), permet l'optimisation du processus de convection, par la vitesse de

déplacement élevée notamment.

3 . L ' é v a p o r a t i o n

L'évaporation est un processus en deux étapes impliquant la transition de l'état liquide à l'état de vapeur de la sueur corporelle, puis de la diffusion de la vapeur à travers l'air environnant. Ce mécanisme d'évaporation nécessite l'utilisation d'énergie thermique, estimée à 2,4 kJ par ml, ce qui explique l'effet thermorégulateur de l'évaporation. Elle se fait principalement par diffusion passive au niveau de la peau, des muqueuses buccale et respiratoire et par le phénomène actif de la sudation (ou transpiration). L'évaporation peut être influencée par la vitesse de l'air : des vitesses d'air plus élevées conduisent à des élévations simultanées de la convection et de l'évaporation (Saunders et coll. 2005; Adams et coll. 1992; Clifford et coll. 1959).

A l'exercice, ce mécanisme de thermorégulation est le seul moyen par lequel les humains peuvent dissiper la chaleur cutanée lorsque la température ambiante dépasse celle de la peau, condition qui autrement conduirait à un gain de chaleur. L'évaporation de la sueur est donc nécessaire pour rétablir l'équilibre thermique lorsque le taux de perte de chaleur sèche totale ne peut pas compenser le taux de production de chaleur métabolique (Cramer et coll. 2016). Le taux d'évaporation est donc croissant avec l'augmentation de la production de chaleur (Figure 2). Cependant, en climat tropical, l'évaporation peut être limitée par une humidité environnementale élevée : une humidité relative de l'air importante entraîne une limitation du processus d'évaporation. Une humidité relative correspondante à 100% entraîne une incapacité du processus évaporatoire.

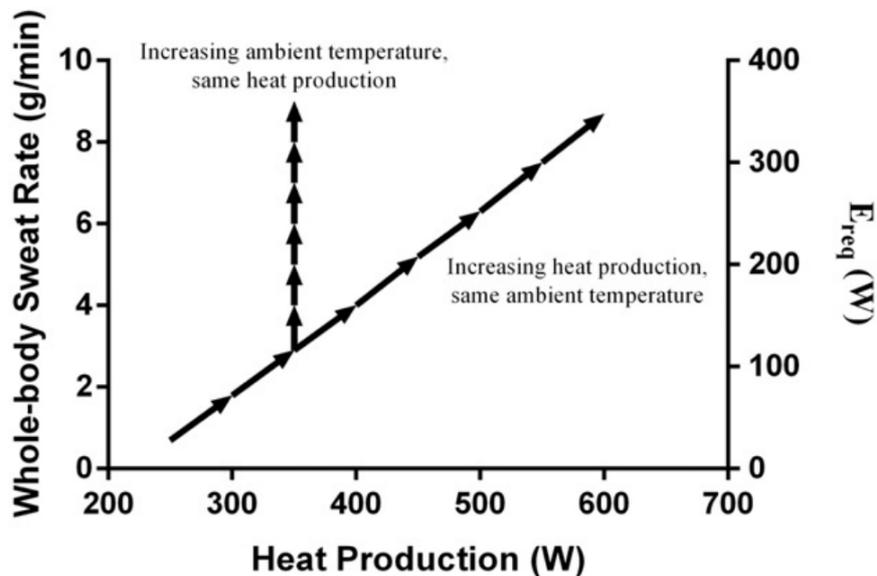


Figure 1.2 : Taux de sueur corporelle en fonction des niveaux croissants de la production de chaleur et de la température ambiante, entraînant une exigence d'évaporation absolue plus élevée pour maintenir l'équilibre thermique (Gagnon et coll. 2013; Nielsen et coll. 1965, par Cramer et coll. 2016)

4. La conduction

La conduction se caractérise par un échange direct entre deux surfaces de températures différentes. Il est donc nécessaire à la peau d'être en contact avec un élément extérieur tel que le sol, un objet ou un vêtement afin de permettre un échange thermique de l'élément le plus chaud vers le plus froid ou inversement, puisque la surface la plus importante « gagne » toujours l'échange. Ces échanges thermiques peuvent également être assurés par la circulation sanguine et se retrouver entre les organes et les tissus sous-cutanés.

Selon la loi de Fourier (1822), la conduction est liée au gradient de température entre les surfaces, à la conductivité thermique du matériau et à l'épaisseur et à l'aire de contact entre les surfaces. La conduction avec l'environnement externe est généralement considérée comme négligeable à moins que la peau ne soit en contact avec des surfaces très conductrices pendant une durée prolongée (i.e la natation). Néanmoins Cramer et coll. (2016) mettent en exergue que les échanges de chaleurs sont possibles dans l'activité physique notamment par l'application du de froid sur la peau. C'est le cas notamment lors de l'utilisation de techniques de refroidissement en utilisant une veste froide (Ross et coll. 2011). Ce mécanisme est exacerbé lorsque les échanges se font dans un milieu hydrique. Effectivement la conductivité thermique de l'eau est 20 fois plus élevée que celle de l'air ($0,6^{\circ}\text{C}^{-1}/\text{m}^{-1}$ contre $0,02^{\circ}\text{C}^{-1}/\text{m}^{-1}$). La connaissance de ce paramètre est particulièrement intéressante lors de l'utilisation d'immersion afin de diminuer les hyperthermies induites par l'exercice physique.

5. L a r a d i a t i o n

Les échanges thermiques par radiation s'effectuent entre des surfaces de températures différentes et distantes l'une de l'autre. L'un des exemples le plus courant est le rayonnement solaire qui est absorbé par la peau. La radiation est directement liée à la surface cutanée exposée au rayonnement permettant les échanges de chaleur.

La chaleur est obtenue via un rayonnement thermique si la température moyenne du radiant dépasse la température de la peau (i.e, l'onde de chaleur) et est perdue si la température de la peau dépasse la température moyenne radiante (e.g. à température ambiante). Cependant Arens et Zhang (2006) expliquent la difficulté à évaluer ce transfert thermique du fait qu'il dépend de

plusieurs facteurs tels que l'intensité du rayonnement mais également de la capacité de la peau à absorber ces rayonnements, de la couleur de la peau ou encore de l'angle d'incidence entre le soleil et la position du corps. Il est néanmoins admis que la déperdition par la peau nue dans un environnement compris entre 21°C et 26°C est de 60% par radiation (Kenney et coll. 2012) tandis qu'à une température ambiante supérieure à celle de la peau le corps va emmagasiner de la chaleur par rayonnement infrarouge (Brotherhood 2008; Chevront & Haymes 2001)

Le rayonnement solaire peut donc augmenter la température cutanée (Brotherhood 2008), la sensation thermique (Hodder & Parsons 2007) et réduire le gradient de température entre la peau et la température centrale accélérant ainsi la vitesse du stockage de chaleur. Ces actions peuvent influencer la puissance d'un exercice en la diminuant lors d'un exercice à 35°C où les sujets doivent maintenant une intensité de 16 sur l'échelle de Borg et cela par rapport aux conditions environnementales de 15°C et 25°C (Tucker et coll. 2006).

6. L a r e s p i r a t i o n

En plus de la peau, Cramer et coll. (2016) relatent que la chaleur est également échangée entre les voies respiratoires et l'environnement externe lors de la ventilation. Ainsi, l'air inspiré se déplace dans les voies respiratoires, est chauffé par la température interne du corps et est saturé en humidité. À l'expiration, la chaleur transférée à l'air inspiré est rejetée dans l'environnement. Basé sur les principes de la perte de chaleur par convection et par évaporation, le taux d'échange de chaleur respiratoire dépendra du gradient de température entre l'air inspiré et le noyau corporel, l'humidité ambiante et la fréquence de la ventilation. Bien que la perte de chaleur respiratoire soit la plus élevée dans des conditions froides / sèches, elle contribue néanmoins

marginale à la perte totale de chaleur du corps entier due à la conductivité thermique relativement faible de l'air. La contribution de la perte de chaleur par ce mécanisme est donc relativement mineure pour maintenir l'équilibre thermique du corps entier, notamment en environnement chaud et humide.

II) EXERCICE EN ENVIRONNEMENT CHAUD ET HUMIDE

1. L a p e r f o r m a n c e

La performance des exercices aérobies est détériorée en condition chaude et humide, quel que soit le protocole utilisé : temps de maintien à une intensité donnée, puissance réalisée sur une distance définie, temps de réalisation d'une distance... (Junge et coll. 2016; Davies et coll. 2016; Racinais et coll. 2015; Maughan et coll. 2012, 2010; Peiffer & Abbiss 2011; Hue 2011; Vihma 2010)....

En période de compétition, les athlètes peuvent être amenés à voyager régulièrement et donc à passer d'un environnement neutre à un environnement chaud et humide. Ce changement brutal d'environnement entraîne également une altération de la performance (Schmit et coll. 2015; Racinais et coll. 2015, 2004; Voltaire et coll. 2002). Mais généralement les études portant sur les conditions environnementales ne font pas voyager les athlètes et sont réalisées en laboratoires (Davies et coll. 2016; Maughan et coll. 2012a; Maughan 2010; Patterson et coll. 2004; Galloway & Maughan 1997). Deux facteurs environnementaux peuvent permettre cette diminution de la performance et sont donc principalement investigués : la température et le taux d'humidité. Mais

d'autres paramètres tels que la vitesse du vent peuvent influencer la performance (Saunders et coll. 2005). Cependant, la plupart des études restent focalisées sur l'aspect thermique. Si l'importance du taux d'humidité relative pour une thermorégulation efficace durant un exercice aérobic a été reconnue dans la plupart des études, il n'y a pas eu d'investigation systématique pour confirmer et quantifier cet effet.

Concernant l'influence de la température, il existe une différence de l'impact de l'environnement en fonction du moyen de locomotion.

En course à pied, Marino et coll. (2000) testent trois températures environnementales (35°C-25°C-15°C) sur un 8 kms à intensité libre après avoir réalisé 30 minutes de course à 70% de la VMA sur tapis roulant. Les auteurs montrent que les sujets ont une performance moindre dans des conditions de 35 °C (30.4 min ± 2.9 min) par rapport à 25 °C (27.4 min ± 1.5 min) et 15 °C (27.0 min ± 1.5 min). Maughan (2010) détermine qu'il existe chez des athlètes élités une température environnementale « idéale » afin de réaliser une performance optimale : entre 10 et 12°C. Lorsque la température est plus basse ou plus élevée que cette fourchette de température la performance est détériorée. Ces résultats confirment ceux précédemment développés par Vihma (2010) qui relève les temps du marathon de Stockholm entre 1980 et 2008. Ses relevés mettent en évidence une corrélation entre les performances et les conditions environnementales : la performance diminue avec un environnement chaud chez tous les athlètes. Ce phénomène affecte encore plus les coureurs les moins rapides.

Cependant, en cyclisme la température idéale est plus élevée qu'en course à pied, puisque la dégradation de la performance arrive avec des températures d'environ 32°C (Peiffer & Abbiss. 2011). Les auteurs testent lors d'un contre la montre (CLM) de 40 kms 4 températures: 17°C-

22°C-27°C et 32°C (HR : 40%). Les résultats (figure 3) montrent que la performance est significativement moins bonne ($P < 0,05$) durant l'effort à 32°C ($309 \text{ W} \pm 35\text{W}$) comparé à 17°C ($329\text{W} \pm 31\text{W}$), 22°C ($324\text{W} \pm 34\text{W}$) et 27°C ($322\text{W} \pm 32\text{W}$). Cette diminution de la performance s'accompagne d'une température centrale significativement plus élevée ($P < 0,05$) entre le km 30 et la fin de l'exercice en condition à 32°C comparée à 17°C. Périard et coll. (2011) indiquent que la puissance développée lors d'un exercice libre de 40 km est réduite dans la condition de 35 °C ($64,3 \text{ min} \pm 2,8 \text{ min}$; 242 W) par rapport à 20 °C ($59,8 \text{ min} \pm 2,6 \text{ min}$; 279W).

Plus récemment, Davies et coll. (2016) condensent dans une méta-analyse différentes études portant sur le CLM en cyclisme en environnement chaud et relèvent que la performance est altérée en climat chaud à partir du milieu de l'épreuve ($P < 0,02$) et à la fin ($P = 0,01$) des épreuves par rapport à une condition contrôle (figure 4). Ce qui laisse donc apparaître qu'outre la température environnementale, la durée de l'effort peut également être déterminante dans l'impact du climat sur la performance.

Les études précédemment citées mettent donc en perspective que la performance en course à pied semble être impactée à des températures moins importantes que le cyclisme.

D'après Junge et coll. (2016) deux raisons majeures peuvent expliquer ce constat : (1) la course à pied permet une vitesse de mouvement moins importante ce qui génère moins de flux d'air au contact de la peau afin de faciliter l'évaporation et la convection; (2) une production de chaleur endogène plus élevée pour un taux métabolique donné. En accord avec ces considérations, Chan et coll. (2008) rapportent que les triathlètes testés dans des conditions chaudes et tempérées avec 40 km de cyclisme et 10 km de course à pied, sont 8 minutes plus lents dans l'environnement chaud, mais que cela est entièrement lié à une performance de course réduite, tandis que la performance en cyclisme ne diffère pas entre les conditions.

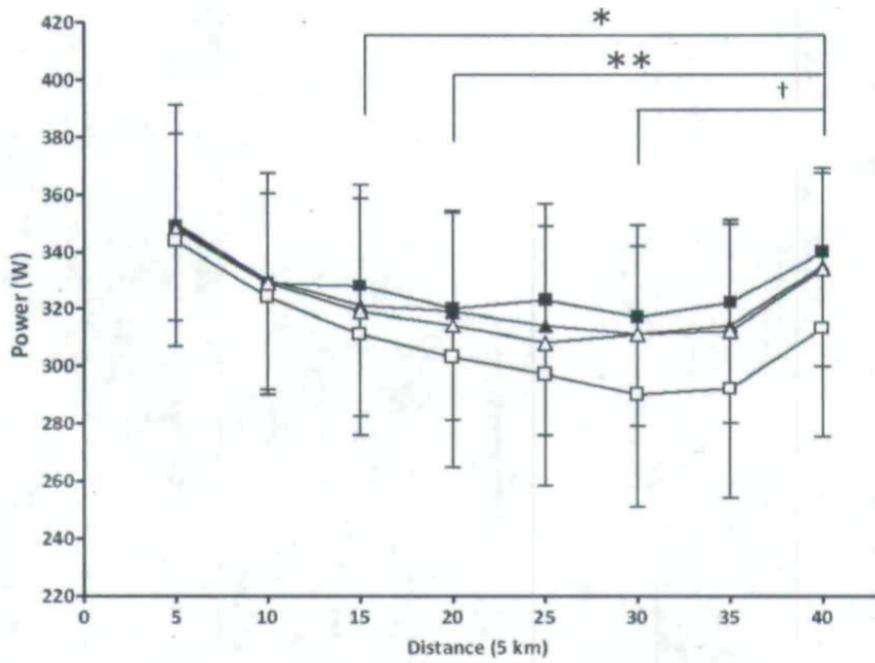


Figure 1.3 : La performance significativement moins bonne lors un CLM de 40 kms en condition chaude (32°C) comparées aux autres conditions à 17°C, 22°C et 27°C. (Peiffer & Abbiss. 2011). Par bloc de 5 kms la différence entre la condition 17°C et 32°C intervient dès le 15^{ème} kms

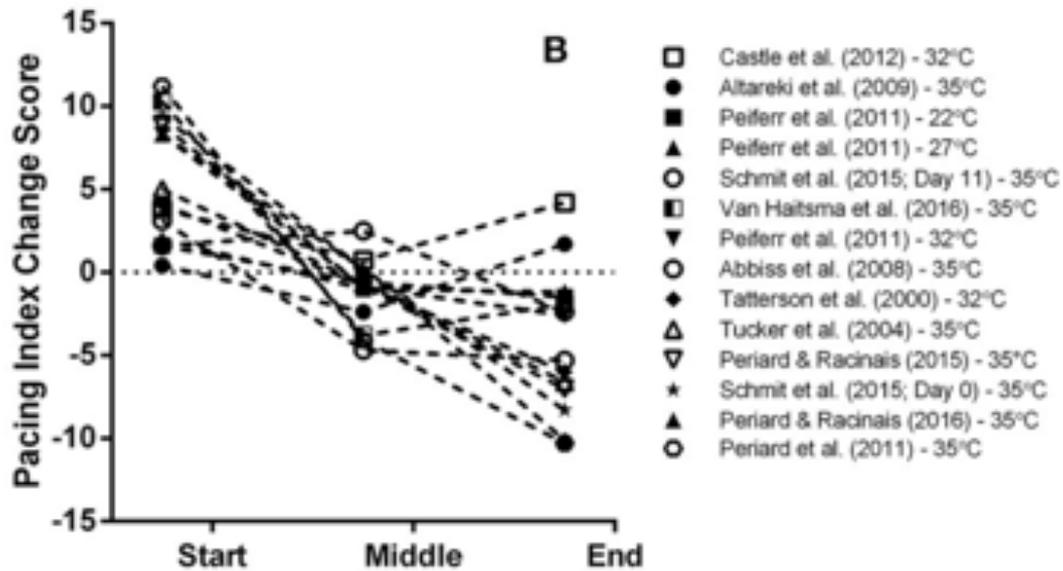


Figure 1.4 : Méta analyse de l'évolution de la performance en condition chaude comparée à la condition neutre (Index 0). La performance est significativement affectée à partir du milieu des épreuves réalisées en ambiance chaude. (Davies et coll. 2016)

Si les études portant sur les compétitions relèvent une diminution progressive de l'intensité de l'exercice avec l'augmentation du Wet Bulb Globe Temperature index (WBGT) (Vihma 2010; Ely et coll. 2007; McCann & Adams 1997), Junge et coll. (2016) mettent en évidence dans une méta-analyse portant sur la performance en climat tropical que la température seule n'est pas pour autant un bon facteur de prédiction de la diminution de la performance. Le seul modèle permettant d'obtenir une corrélation entre la diminution de la performance par rapport à une condition neutre

et l'environnement est un index intégrant la température de l'air, le taux d'humidité et la vitesse du vent (figure 5) d'après la formule :

$$\text{Index} = \frac{T.HR}{\sqrt{Vv}}$$

T : Température absolue (°C)

HR : Humidité Relative (%)

Vv : Vitesse du vent (m/s)

Dans cette étude les auteurs comparent donc la relation performance-index de chaleur sur 4 modèles : la température ambiante (figure 5A) ; leur modèle (figure 5B), le WBGT (figure 5C) et l'UTCI (figure 5D). L'effet de la vitesse du vent et l'humidité sont des facteurs prépondérants dans l'impact de l'environnement sur l'intensité d'un exercice puisqu'ils influencent directement la perte de chaleur, ou inversement peuvent accélérer le processus d'augmentation du stockage de chaleur (Junge et coll. 2016). Effectivement, une vitesse de vent inférieure à 10 km.h⁻¹ augmente significativement le stockage de chaleur comparé à des vitesses de 33 ou 50 km.h⁻¹ (Saunders et coll. 2005).

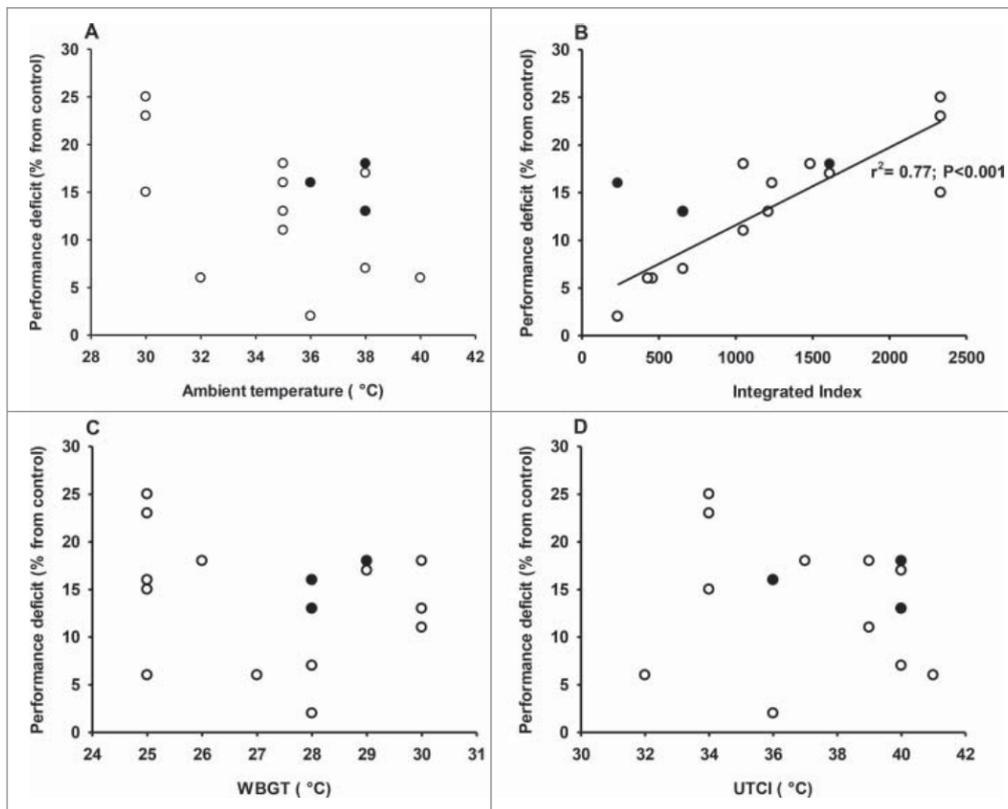


Figure 1.5 : Corrélation du déficit de performance établi par rapport à une condition neutre entre (A) température ambiante, (B) index comprenant la température ambiante, l'humidité relative et la vitesse du vent ; (C) l'index WBGT et (D) l'index UTCI. (Junge et coll. 2016)

Malgré ces constatations et le consensus réalisé autour de l'influence spécifique de l'humidité relative (HR), ce champ reste néanmoins peu exploré. Pourtant le taux d'humidité relative, à température constante, impacte négativement l'intensité de l'exercice (figure 6) lorsqu'il est plus élevé (Maughan et coll. 2012b). Dans cette étude, des athlètes non acclimatés, réalisent une

épreuve à vélo à 70% de VO_2 max jusqu'à épuisement lors de quatre sessions à 24, 40, 60 et 80% d'HR (T: 30°C). Les résultats, montrent que le temps d'exercice diminue significativement avec l'augmentation de l'humidité : 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). La fréquence cardiaque et la température corporelle ne sont pas affectées, cependant la température cutanée est significativement plus élevée lors de l'arrêt de l'exercice à 80% d'HR comparée à 24% (P < 0,001).

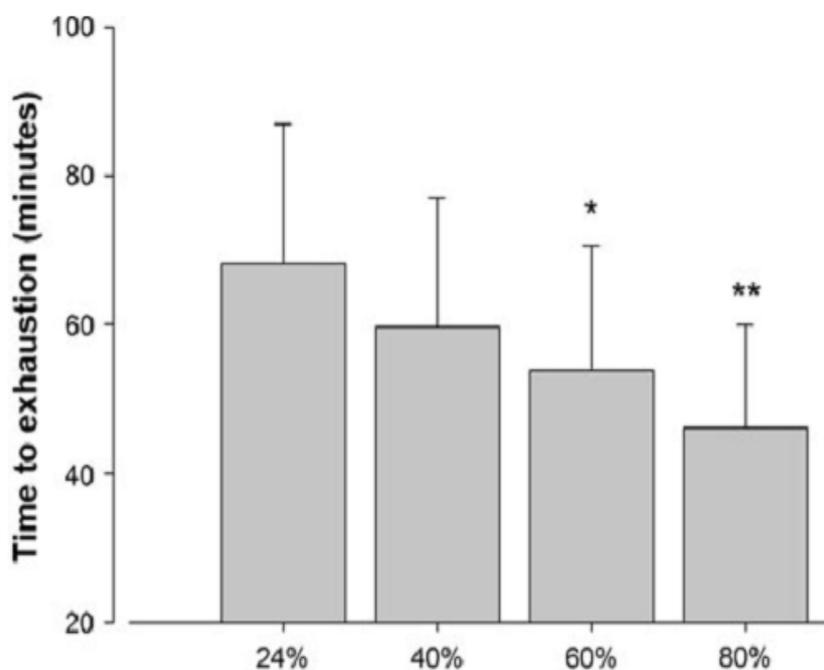


Figure 1.6 : Influence de l'humidité relative (HR) environnementale lors d'un exercice jusqu'à épuisement (70% de VO_2 max) en cyclisme pour une température de 30°C : La durée d'exercice est significativement moins importante en condition 80% et 60% HR comparativement à 24% HR.

* P < 0,05 ; ** P < 0,01 (Maughan et coll. 2012b)

La baisse de la performance est la résultante de l'altération de paramètres physiologiques et/ou psychologiques, pouvant être détériorés en climat tropical par l'effet d'une humidité relative et d'une température ambiante élevée.

2. Les paramètres physiologiques et psychologiques

L'humidité et la température sont responsables de modifications physiologiques et psychologiques qui entraînent des altérations de la performance. L'exercice en climat tropical induit une augmentation plus rapide de la température rectale et cutanée (Moyen et coll. 2014; Levels et coll. 2012) et du stockage de chaleur (Moyen et coll. 2014). De plus, le niveau de difficulté perçu (NDP) est également affecté en étant identique en milieu tropical, comparé à un environnement neutre pour une performance moins bonne en condition tropicale, ainsi que les ressentis de sensations (ST) et de confort thermique (CT) sont négativement affectés (Cheung 2010; Hodder & Parsons 2007).

Levels et coll. (2012) mettent en évidence une augmentation significative (P < 0,05) de la température cutanée lorsque les sujets sont soumis à l'exposition d'un radiateur infrarouge lors d'un CLM de 7,5 kms (exposition réalisée entre le kilomètre 1,5 et le km 6) par rapport à une condition neutre sans exposition au chaud, et ce, même lorsque les sujets ont été refroidi avant l'exercice (condition « precool ») : $+ 4^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ en condition « precool » vs contrôle et $+3.9^{\circ}\text{C} \pm 0,8^{\circ}\text{C}$ en condition chaude vs. Contrôle. De plus, à la fin de l'exposition (kms 6) la FC est significativement plus basse (P < 0,05) en condition neutre (figure 7) comparée aux deux autres

conditions. Seulement, une fois l'exposition au radiateur stoppée (fin de la zone grise sur la Figure 7), la FC n'est plus affectée, pouvant laisser entrevoir qu'une exposition prolongée à la chaleur peut impacter la FC. Cette étude ne met pas en évidence de différence de performance entre les conditions certainement par l'effort très court demandé aux sujets et une exposition ponctuelle.

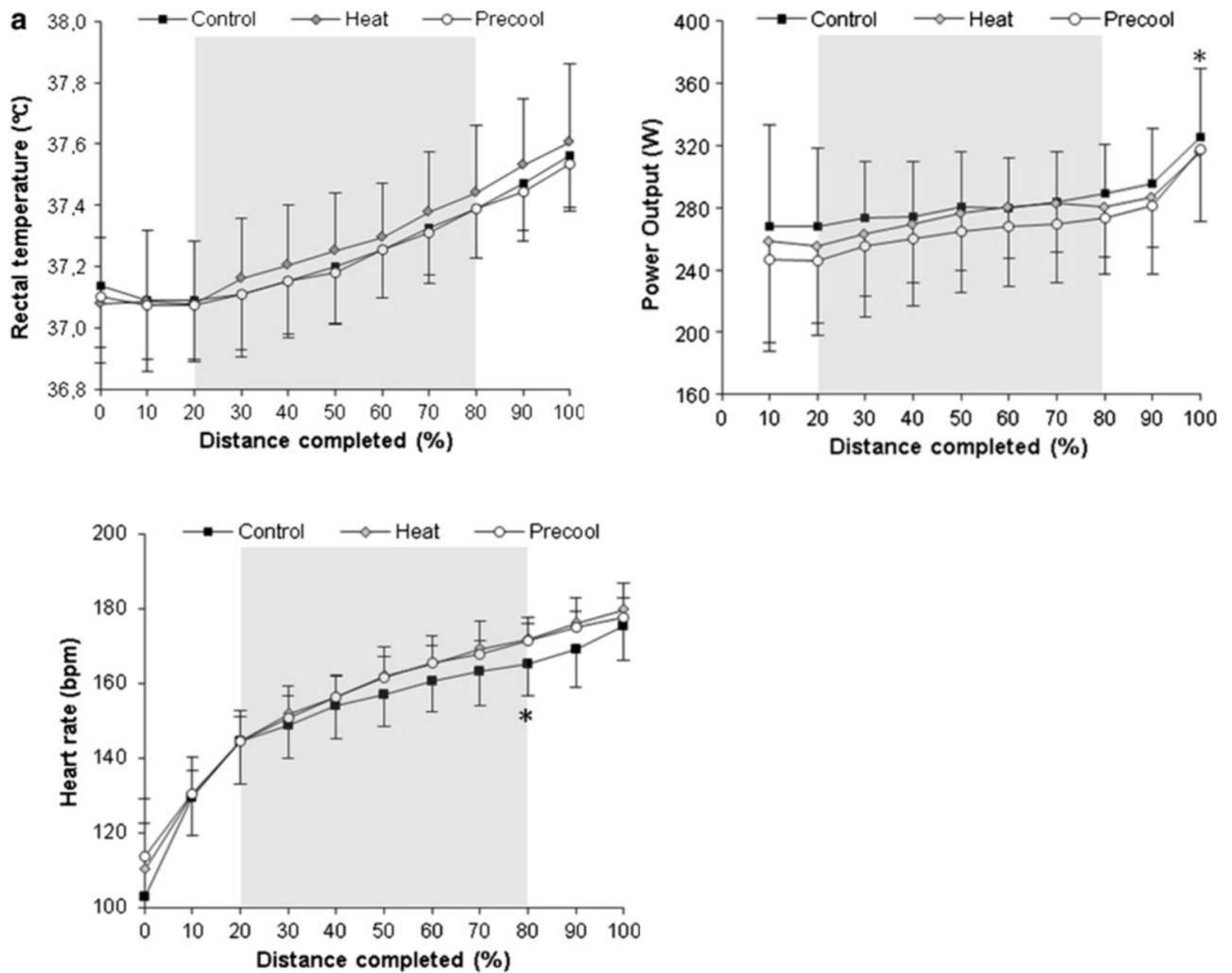


Figure 1.7 : Evolution de la température rectale, de la FC et de la puissance lors d'un CLM de 7,5 kms avec l'application d'un radiateur infrarouge (conditions « heat » et « precool ») correspondant à la zone grisée, comparé à une condition contrôle sans exposition aux infrarouges. (Levels et coll. 2012). La puissance est significativement plus élevée dans la condition contrôle par rapport aux deux autres conditions, et s'accompagne d'une FC significativement plus élevée à la fin de l'exposition aux infrarouges comparativement à l'absence d'exposition.

* significativement différent par rapport aux deux autres conditions ($P < 0,05$)

Mais comme pour la performance, la variable température n'est pas la seule à influencer les paramètres physiologiques et psychologiques. Moyen et coll. (2014) s'intéressent à l'impact de l'humidité sur la capacité de thermorégulation (figure 8). Les sujets réalisent une marche de 90 minutes (à 35% de VO_{2max}) dans 4 conditions hygrométriques différentes: 40%, 55%, 70% et 85% d'HR (T: 35°C). Les auteurs mettent en évidence que la production de chaleur métabolique est plus importante et l'élimination de chaleur par évaporation insuffisante avec une HR élevée (70% et 85%), sans qu'il n'y ait de différence pour des HR faibles. Cette insuffisance d'élimination de la chaleur par évaporation conduit à l'accumulation de chaleur, dont le témoin est l'augmentation de la température rectale (T_{rec}). L'élimination de la chaleur par évaporation avec une HR élevée est insuffisante malgré une augmentation du débit sudoral (i.e., 1,07 L.h⁻¹ à 85% d'HR contre 0,79 L.h⁻¹ à 40% d'HR). Cette étude permet de corréler les résultats physiologiques avec les aspects psychologiques, puisque les auteurs montrent également que ST, CT et NDP sont significativement augmentés durant l'exercice, avec une HR élevée (70% ou 85%). Par conséquent, les réponses physiologiques (i.e. taux de stockage de chaleur, T_{cen} , T_{cut} , FC) et psychologiques (i.e. ST, CT, NDP) augmentent significativement dans des conditions d'HR élevées par rapport à des HR plus faibles.

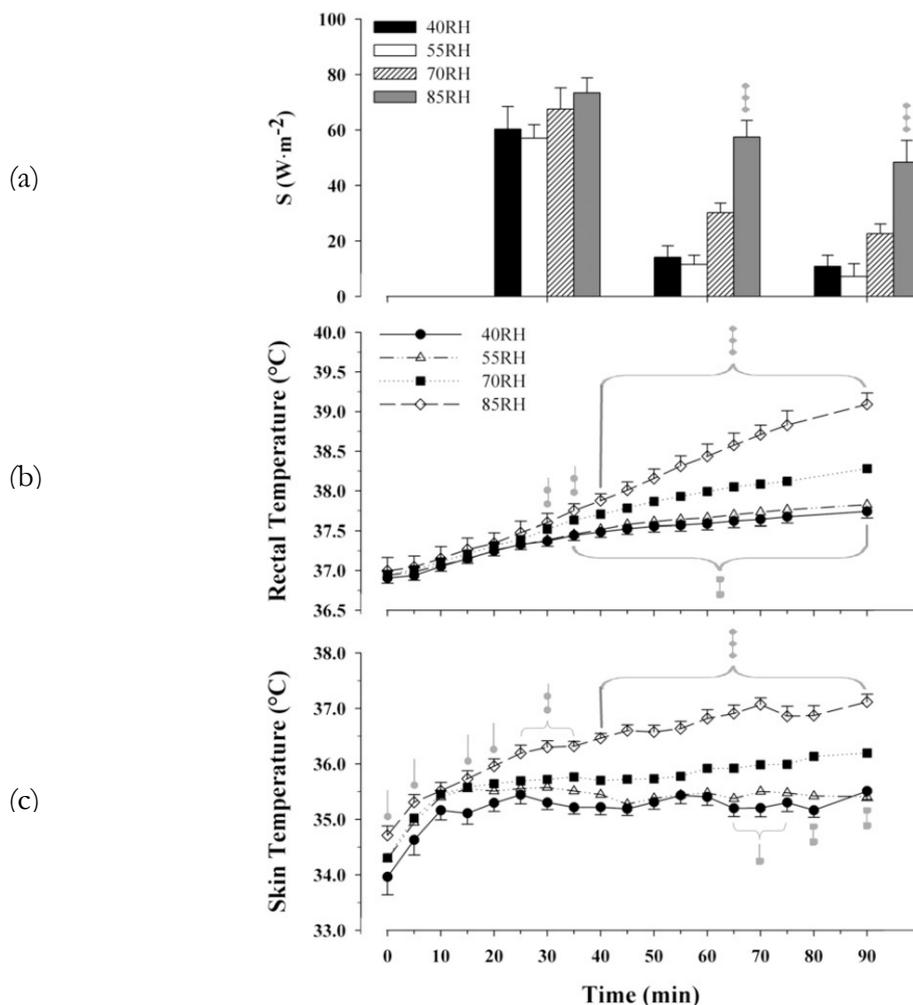


Figure 1.8 : (a) Stockage de chaleur (S) analysé par intervalle de 30 min en fonction du taux d'humidité relative lors de 90min de marche : avec 85% d'HR (S) est significativement plus élevée comparativement aux autres conditions dès la 30^{ème} minutes.

(b) Températures rectales durant les 90 min de marche : Trec est significativement plus élevée avec 85% d'HR comparativement aux 3 autres conditions et cela à partir de 40' d'activité.

(c) Températures cutanées durant les 90 min de marche : Tcut est significativement plus élevée avec 85% d'HR comparativement aux 3 autres conditions et cela à partir de 40' d'activité (Moyen et coll. 2014)

D'autres facteurs peuvent être impactés par le climat tropical, tel que la cognition. Les études portant sur ce sujet mettent en évidence que l'augmentation de la température entraîne une diminution des performances cognitives (Zhang & de Dear 2016) et qu'en climat tropical les facultés mentales sont également négativement impactées (Wijayanto et coll. 2017). Cependant les sujets acclimatés démontrent une meilleure résistance aux pertes de performance liées au stress thermique (Wijayanto et coll. 2017)

3. Les effets de l'entraînement en climat tropical

Les efforts aérobies sont détériorés en climat tropical comparé au climat froid (Peiffer & Abbiss, 2011). Cependant il est intéressant de mettre en évidence que l'entraînement en climat tropical peut permettre des adaptations pouvant in fine amener les athlètes à réaliser une meilleure performance comparativement à avant l'entraînement en environnement tropical. C'est le cas notamment pour des athlètes non acclimatés à leur retour d'un séjour en climat tropical, en natation (Hue et coll. 2007), en cyclisme (Lorenzo et coll. 2010), aviron (Garrett et coll. 2012) ou lors d'entraînements réalisés en condition chaude par expositions (Guy et coll. 2016). Garrett et coll. (2011) définissent trois périodes d'acclimations liées au nombre d'expositions en ambiance chaude : l'acclimation de courte durée (inférieure à 7 expositions), l'acclimation moyenne (8 à 14 expositions) et l'acclimation sur le long terme (> 14 expositions), avec à chaque fois des sessions d'entraînements dans un environnement chaud et/ou humide dans le but d'améliorer la performance (Chalmers et coll. 2014). L'entraînement en ambiance chaude à partir d'une acclimation moyenne permet une amélioration de la performance en condition chaude (Burk et coll. 2012). De nombreuses études identifient des adaptations physiologiques et moléculaires à

partir de cette acclimatation moyenne (Wingfield et coll. 2016; Chalmers et coll. 2014; Voltaire et coll. 2002) telles que l'augmentation du volume plasmatique (Garrett et coll. 2012; Buchheit et coll. 2011), une augmentation de la consommation maximale d'oxygène et de la lactatémie pic en climat tempéré chez des athlètes peu entraînés (Lorenzo et coll. 2010), une réduction de la fréquence cardiaque à l'exercice sous maximal (Petersen et coll. 2010; Sunderland et coll. 2008; Voltaire et coll. 2002), l'augmentation du flux sanguin cutané pour une température corporelle donnée (Fujii et coll. 2012; Yamazaki & Hamasaki 2003), une diminution de la température centrale par une vasodilatation cutanée (Fujii et coll. 2012; Yamazaki & Hamasaki 2003) et une diminution de la température centrale comme valeur seuil du déclenchement de la transpiration (Patterson et coll. 2004; Yamazaki & Hamasaki 2003) Les adaptations métaboliques correspondent elles à la diminution du métabolisme glucidique (Petersen et coll. 2010). L'acclimatation de courte durée entraîne moins d'effets bénéfiques mais Wingfield et coll. 2016) ont mis en évidence dès 5 jours d'acclimatation, une amélioration de performance sur 20 kms de CLM sur la période post-acclimatation réalisée en climat neutre. Les adaptations perceptives sont aussi impactées au bout de 7 expositions avec, par exemple, l'amélioration du confort thermique (Petersen et coll. 2010).

Cependant, chez des athlètes très entraînés ces adaptations restent moins bien documentées. Hue et coll. (2007) comparent l'entraînement chez des nageurs de haut niveau (20-30 kms par semaine) et mettent en évidence que huit jours d'entraînements en climat tropical permet d'augmenter la performance à leur retour en condition neutre sur un 400m. Dans cette étude 16 nageurs sont partagé en trois groupes 16 nageurs: 6 s'entraînent pendant 8 jours en climat tropical, 6 s'entraînent durant 8 jours en altitude et 4 font partie d'un groupe contrôle. Les performances de nage sont évaluées lors d'un 400 m libre avant la période expérimentale, à 10 jours et 30 jours

après. Les résultats montrent que seul le groupe « tropical » augmente la performance (+4,2%, 30 jours après le retour). Aucune variation significative de la performance n'est constatée pour les deux autres groupes après 10 ou 30 jours.

Karlsen et coll. (2015) mettent en évidence qu'après 2 semaines d'entraînements en condition chaude (35°C) les athlètes améliorent la performance dans cette même condition, mais que la VO_{2max} , la PMA et la performance lors d'un CLM en condition fraîche ne sont pas améliorées. Les adaptations chez des athlètes d'endurance bien entraînés permettent donc des améliorations de la performance, mais nécessitent de plus grandes investigations afin de déterminer, à terme, quelles sont les durées d'adaptations physiologiques, et à terme de mettre en place des protocoles d'entraînements pouvant induire des effets bénéfiques à la performance aérobie.

III) DIFFERENTS FACTEURS IMPACTANT LA PERFORMANCE EN CLIMAT TROPICAL

1. Thermoregulation

Le principal facteur pouvant influencer la performance en milieu chaud est la thermorégulation. Il appartient à l'organisme, lors d'une activité physique, de mettre en place des mécanismes de thermorégulation afin de maintenir au mieux l'homéostasie et limiter l'augmentation du stockage de chaleur. En climat chaud et/ou humide ces mécanismes peuvent apparaître limités et ne pas parvenir à empêcher l'augmentation rapide de la température (Chapitre I). L'hyperthermie sous-jacente à cette augmentation de la température corporelle est donc l'un des arguments les plus récurrents dans la littérature scientifique pour expliquer la limitation de la

performance en milieu chaud et tropical (González-Alonso et coll. 1999; 2000). Gonzalez-Alonso et coll. (1999) suggèrent que la durée d'effort en climat tropical est corrélée à la quantité de stockage de chaleur. Certains auteurs (González-Alonso et coll. 1999; 2000; Ely et coll. 2010; Nybo & Nielsen 2001) suggèrent qu'au-delà d'une certaine température critique (40-41°C), l'organisme ne serait plus en mesure d'augmenter la performance, indépendamment des autres facteurs, et que cette température corporelle élevée affecterait les fonctions du SNC (Nybo & Nielsen. 2001).

Kenefick et coll. (2010) émettent l'idée selon laquelle la température cutanée peut également influencer la diminution de la performance : l'élévation de la température cutanée induite par l'augmentation du flux sanguin sous-cutané, entrainerait une moindre irrigation des muscles et par conséquent engendrerait un moindre apport en O₂ et en substrats aux muscles actifs (Schlader et coll. 2011). Cela aurait également une incidence sur le volume d'éjection systolique qui est diminué lors d'un exercice en climat chaud.

2. Ajustement cardio-vasculaire

Comme défini par Périard et coll. (2016) « le principal challenge cardiovasculaire durant un exercice en condition chaude est de fournir un débit cardiaque suffisant pour perfuser le muscle squelettique afin de subvenir aux besoins métaboliques, tout en perfusant simultanément la peau afin de contribuer à la perte de chaleur ». Nous avons présenté précédemment que l'augmentation de la radiation cutanée peut induire une augmentation de la température cutanée et de la FC (Levels et coll. 2012) et que l'augmentation de la température centrale peut avoir une incidence sur le volume d'éjection systolique (VES). Effectivement, lorsque la température

cutanée augmente, l'un des phénomènes de thermorégulation mis en place par l'organisme est d'augmenter le volume sanguin sous-cutané afin d'augmenter les échanges avec l'extérieur. Dès lors, le volume sanguin central est diminué, ce qui induit un moindre apport sanguin aux muscles et au cerveau, impactant donc l'apport en O₂ à ces derniers et entraînant une diminution de la pression artérielle moyenne (Périard et coll. 2013). Par conséquent, la pression de remplissage du ventricule est réduite et doit donc être compensée par une augmentation de la FC (Périard et coll. 2011, 2012, 2013, 2016; Chevront et coll. 2010; González-Alonso & Calbet 2003).

Le débit cardiaque (Qc) correspond au produit de la fréquence cardiaque par le volume d'éjection systolique (VES), soit :

$$Qc = FC * VES$$

Un exercice en condition chaude induit donc une diminution du débit cardiaque, provoquée par la baisse du retour veineux, ce qui induit une baisse du VES, qui a pour conséquence d'induire une augmentation de la FC pour maintenir un Qc stable (Périard et coll. 2013).

Périard et coll. (2016) relèvent que des études récentes montrent que les températures élevées du tissu/sang induisent une augmentation du flux sanguin du muscle squelettique au repos et à l'exercice (Chiesa et coll. 2015; González-Alonso et coll. 2015). L'une des explications développées par Gonzales-Alonso (2015) (repris par Périard et coll. 2016) est « qu'il peut exister une interaction des stimuli métaboliques et thermiques induisant la libération de globules rouges, vasodilatateurs ». Périard et coll. (2016) suggèrent donc que « pour les individus non acclimatés, des températures élevées du corps et des tissus induiraient un plus grand besoin de

flux sanguin par les muscles squelettiques et qu'une acclimatation thermique peut diminuer ces besoins ».

3. Anticipation

Le facteur de l'anticipation est développée afin d'expliquer la (les) raison(s) de la diminution de la performance sur les épreuves de longue durée. Une équipe Sud Africaine (St Clair Gibson et coll. 2004) argue que les athlètes ne sont pas limités dans leurs performances par l'augmentation de la température centrale mais que le cerveau maintient une gestion globale de l'effort afin d'éviter une « catastrophe » en ajustant l'effort approprié en fonction de la durée de l'exercice restante (Tucker et coll. 2004, 2006, 2012; St Clair Gibson et coll. 2004). St Clair Gibson et Noakes (2004) développent donc l'idée qu'un « gouverneur central » permettant de modifier les stratégies mises en place en prenant en compte plusieurs paramètres tel que le NDP, la fatigue, la température centrale, la FC ou encore la durée de l'effort.

Tucker et coll. (2004) expérimentent ce concept lors d'une étude portant sur la réalisation d'une épreuve de 20 kms à vélo effectuée dans deux environnements : chaud (T: 35°C) et froid (T: 15°C). Etant donné que l'hypothèse principale de l'altération de la performance en climat chaud est la théorie de l'atteinte d'une température centrale critique (Nybo & Nielsen. 2001), l'équipe de Tucker intègre l'enregistrement EMG afin de mesurer le nombre d'unités motrices recruté (vaste latéral) à 1, 5, 10, 15 et 20 kms. Les auteurs supposent, en se basant sur la théorie de l'existence d'un gouverneur central, qu'en condition chaude, une diminution de l'activité EMG et de la puissance avant l'atteinte d'une température rectale potentiellement nuisible indiqueraient que le recrutement neuro-musculaire et la production de puissance sont régulés

avant l'échec thermorégulateur. Les résultats permettent de confirmer cette hypothèse puisqu'en condition chaude le travail musculaire (puissance et recrutement neuro-musculaires) est diminué durant l'exercice avant l'atteinte d'une température significativement élevée (Tableau 1), préservant ainsi l'homéostasie thermique dans les deux conditions. Les résultats montrent que la puissance diminue significativement en ambiance chaude à partir de 30% du temps total de l'épreuve sans que la température rectale soit significativement différente entre les deux environnements. De plus, à la fin de l'exercice aucune des conditions n'a atteint une température dite critique. Ces résultats sont corroborés par l'EMG qui diminue significativement à 10 et 20 kms en condition chaude par rapport à la condition froide alors que la température corporelle est la même dans les deux conditions à 10 kms. Selon les auteurs ces résultats démontrent donc que le recrutement des unités motrices diminue avant l'atteinte d'une température critique ce qui renforce le principe du régulateur central. De plus ces résultats ne montrent pas de différence entre les conditions pour la FC et le NDP durant toute l'épreuve.

Tableau 1.1 : Durée d'effort (minutes) et puissance moyenne (Watt) sur un CLM de 20 kms en conditions chaude et froide (Tucker et coll. 2004). La puissance est significativement plus élevée, et le temps significativement plus court en condition froide comparativement à la condition chaude.

	HOT	COOL
Time (min)	29.6±1.9	28.8±1.8*
Average power (W)	255±47	272±45 [†]

* $P < 0.001$; [†] $P < 0.01$ vs. HOT

Plus récemment Tucker et coll. (2006) confirment ces premiers résultats lors d'une épreuve en cyclisme dans trois conditions : chaude (T: 35°C), neutre (T: 25°C) et froide (T: 15°C). Les cyclistes doivent gérer leur puissance afin de maintenir un NDP égal à 16. Si la puissance diminue linéairement en fonction du temps dans les trois conditions, la diminution est plus importante en condition chaude (figure 9) comparée aux deux autres ($P < 0,001$). Ces résultats ne sont pas accompagnés de différences, entre les trois conditions, du stockage de chaleur et de l'activité EMG. Les auteurs concluent donc que la diminution de la performance en environnement chaud est induite par le gouverneur central qui anticipe une augmentation trop importante de la température afin de préserver l'équilibre thermique.

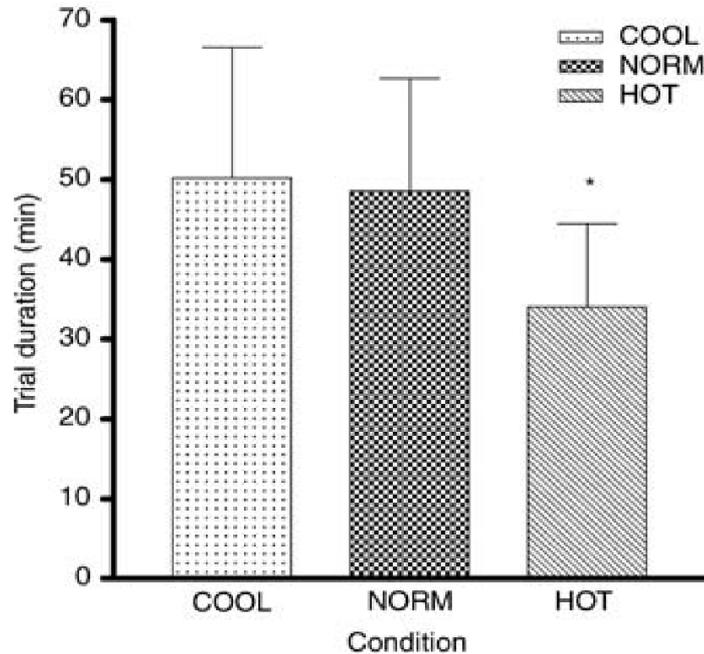


Figure 1. Total duration during trials in HOT (35°C), NORM (25°C) and COOL (15°C) conditions

*Significantly different from NORM and COOL ($P < 0.001$).

Figure 1.9 : Durée d'exercice (minutes) en fonction des conditions froides (15°C), neutre (25°C) et chaude (35°C). En condition chaude la durée d'effort est significativement moins bon comparativement aux deux autres conditions.

* différence significative avec neutre et froide ($P < 0,001$) (Tucker et coll. 2006)

Dernièrement cette théorie d'anticipation a été remise en question lors d'une étude de Friesen et coll. (2017). Dans leur étude les auteurs (Friesen et coll. 2017) comparent 3 conditions environnementales (froide, T : 15°C HR : 20% ; Normale, T : 25°C HR : 20% et chaude, T : 35°C HR : 20%) et mettent en évidence que le taux de stockage de chaleur est moins important dans la

condition chaude jusqu'à 30 min de l'exercice (ou les sujets devaient maintenir RPE 16 jusqu'à une diminution de 70% de la puissance initiale) et qu'il n'y a aucune différence dans les valeurs du stockage de chaleur entre les trois conditions à la fin de l'épreuve. Le postulat de Tucker et coll. (2006) définissant que « l'intensité de l'exercice est régulée par une rétroaction afférente précoce associée au taux initial de stockage de la chaleur corporelle est donc réfuté. Cette rétroaction sert à arbitrer les ajustements anticipatoires de l'intensité de l'exercice pour le reste de l'exercice, de sorte que les augmentations dangereuses de la température centrale et de la fatigue prématurée peuvent être contournées ».

4. Psychologie

Outre les aspects physiologiques, d'autres facteurs sont avancés afin d'expliquer la diminution de la performance en climat tropical. Plusieurs études ont mis en évidence qu'une amélioration des facteurs psychologiques tel que le NDP, le confort thermique ou la sensation thermique, entraînent une augmentation de la performance (Schlader et coll. 2011; Mündel & Jones 2010). Il est également établi qu'un exercice en condition chaude à intensité fixe augmente le NDP par rapport à un même exercice réalisé en condition neutre (Cheuvront et coll. 2010; Tucker et coll. 2006; Nybo & Nielsen. 2001) ce qui contribue à alimenter l'argument selon lequel les facteurs psychologiques peuvent jouer un rôle dans la régulation de l'intensité à l'exercice.

Le confort thermique est directement lié à la température cutanée (Hodder & Parsons 2007). Les auteurs montrent que la température cutanée augmente d'environ 1°C avec une exposition de radiation solaire équivalente à 200W.m² (Hodder & Parsons. 2007), confirmé par Brotherhood. (2008) et que cette augmentation de la T_{cut} est corrélée avec une augmentation du CT.

L'augmentation de la température cutanée serait induite par l'augmentation du flux sanguin vers la peau modifiant ainsi le confort thermique et influencerait la diminution de l'intensité de l'exercice.

L'augmentation de la sensation thermique est également évoquée afin d'expliquer la diminution de la performance en ambiance chaude (Peiffer et coll. 2010; Cheung 2010).

Plus récemment Pageaux (2014) développe un modèle dit psychobiologique de la performance en endurance. Ce dernier s'appuie sur cinq facteurs cognitifs et/ou motivationnels pouvant influencer la performance : Perception de l'effort, motivation, connaissance de la distance ou encore les expériences passées... Ces facteurs déterminent le degré d'engagement du sujet durant un exercice ou sa capacité à tolérer des niveaux extrêmes de perception de l'efforts. En climat tropical, l'élévation de la température corporelle peut donc amener une distorsion de la difficulté subjective perçue ayant pour conséquence la réalisation d'un exercice à une intensité moins élevée.

5. Déshydratation

D'après Shapiro et coll. (1998), la déshydratation en climat tropical est due à la limitation de la capacité évaporatoire, conséquence du taux élevé d'humidité environnementale. L'équilibre hydrique est, d'un point de vue musculaire, très important puisqu'il est rapporté qu'une variation trop importante des concentrations en ions et électrolytes peut induire des dysfonctionnements musculaires, des spasmes musculaires, allant jusqu'à l'interruption de l'activité contractile du coeur (Stofan et coll. 2005; Parsons 2006). Il est également développé qu'en climat chaud et/ou humide, une déshydratation peut entraîner une altération du système cardiovasculaire et de la

thermorégulation, conséquence de la diminution du volume sanguin total (Gonzalez-Alonso et coll. 2000). Il existe une corrélation entre la déshydratation et la performance: ainsi il est suggéré qu'une déshydratation de 3% en climat chaud et humide induit une baisse de la performance aérobie (Cheuvront & Haymes 2001; Sawka et coll. 2001). Sawka et coll. (2015) relèvent dans leur revue qu'une hypohydratation détériore la performance en climat tropical (dans 8 des 9 articles inclus) tandis que dans les conditions moins chaudes (condition froide et tempéré) l'influence de cet état hypohydraté sur la performance est moindre (n'atteignant aucune incidence sur la performance en condition froide dans les papiers inclus à la revue). Cette déshydratation peut entraîner une réduction du flux sanguin vers les muscles (González-Alonso et coll. 1999, 2000) et altérer le métabolisme du muscle squelettique (Febbraio 2000 cité par Cheuvront et coll. 2015). Mais plus récemment une étude met à mal ces considérations puisque les auteurs (Wall et coll. 2015) mettent en évidence que lorsque les sujets ne sont pas informés de leur état hypohydraté (hydratation aveugle ajusté par perfusion pré exercice) en comparant 3 états : 0% ; -2% et -3% de déshydratation, alors la performance et les variables physiologiques et perceptuelles ne sont pas altérées entre les conditions. Cependant dans cette étude la FC n'est pas élevée, ce qui ne correspond pas aux autres études sur l'hypohydratation. Sawka et coll. (2015) supposent donc que dans l'étude de Wall et coll. (2015) « les perfusions salines ont probablement restaurées le volume plasmatique et la précharge cardiaque pour annuler l'impact cardiovasculaire défavorable de l'hypohydratation, c'est à dire l'hypovolémie absolue ».

Cependant il a également été mis en évidence qu'il est possible d'être performant en état de déshydratation sévère puisque les athlètes réalisant les meilleures performances sont ceux qui s'hydratent le moins (Berkulo et coll. 2016; Baillot & Hue 2015).

6. Chronobiologie

Sur les efforts de courte durée il a été suggéré l'existence de l'impact de la température environnementale et/ou du moment de la journée (Racinais et coll. 2004). Cependant ce facteur n'est que trop peu étudié en exercice aérobie. Hobson et coll. (2009) montrent en ambiance tropicale (35°C et 60% HR) que pour un exercice aérobie sous maximal (65% de VO_{2pic}) la durée d'exercice jusqu'à l'épuisement est significativement plus longue le matin que le soir ($P < 0,01$). La température centrale et cutanée sont significativement plus basses au début de l'exercice du matin par rapport au soir ($P < 0,05$) sans différence entre les conditions à la fin de l'exercice. Les auteurs suggèrent donc que la performance aérobie est plus élevée le matin en raison de la charge thermique initiale moins importante, induisant une augmentation de la capacité de stockage de la chaleur.

7. Autres hypothèses

Récemment Vargas & Marino (2016) se sont intéressés aux marqueurs des interleukines 6 (IL-6). Les auteurs développent l'idée que lors du stress thermique induit par l'effort, le flux sanguin est préférentiellement distribué loin de la zone intestinale pour fournir les muscles et le cerveau en oxygène. Par conséquent, la barrière gastro-intestinale devient de plus en plus perméable, ce qui entraîne la libération de lipopolysaccharides (LPS) dans la circulation. La fuite de LPS stimule une réponse inflammatoire de phase aiguë, y compris la libération d'interleukine IL-6 en réponse à un environnement de plus en plus endotoxique. Si la translocation du LPS est trop importante, comme lors d'un choc thermique, un dysfonctionnement neurologique ou la mort peuvent

s'ensuivre. Les IL-6 agissent initialement de manière pro-inflammatoire pendant l'endotoxémie, mais peuvent atténuer la réponse par la signalisation de l'axe hypothalamique hypophysaire surrénalien (HPA). De même, les IL-6 sont supposées être des capteurs thermorégulateurs dans l'intestin, ce qui met en évidence leur rôle dans la communication périphérie-cerveau. Récemment, l'IL-6 a été impliquée dans la signalisation du SNC en influençant les perceptions de fatigue et de performance pendant l'exercice. Par conséquent, en raison de la cascade d'événements qui se produisent pendant la contrainte thermique liée à l'effort, il est possible que la libération de LPS et la réponse exacerbée de l'IL-6 contribuent à la modulation du SNC. Les auteurs discutent donc du rôle potentiel de l'IL-6 pendant le stress thermique induit par l'effort pour moduler la performance en faveur de la préservation du corps entier.

IV) LES DIFFERENTES METHODES LUTTANT CONTRE LA DIMINUTION DE LA PERFORMANCE EN CLIMAT TROPICAL

Si plusieurs hypothèses sont discutées afin de déterminer quels sont les facteurs qui prévalent sur la diminution de la performance, il n'en reste pas moins vrai que les procédés utilisés afin de limiter cette diminution portent quasi-exclusivement sur le refroidissement. Le refroidissement, qu'il soit externe (e.g. immersion, port d'une veste froide) ou interne (e.g. ingestion de boisson froide), permet de limiter l'augmentation de la température corporelle. Si les deux méthodes semblent efficaces, la méthode externe est plus difficile à mettre en place en compétition : du matériel difficilement transportable (immersion), aux règlements interdisant les gilets de refroidissement. Mais les deux méthodes ont leurs avantages et inconvénients puisque ce sont

les méthodes externes qui permettent de diminuer le plus efficacement l'hyperthermie (e.g. cryothérapie, immersion). En compétition il est donc plus aisé d'utiliser un refroidissement interne. Cependant, entre deux compétitions rapprochées (même journée jusqu'à 24h d'écart) en récupération, le refroidissement externe est plus efficace. Certaines méthodes préconisent le cumul de plusieurs techniques de pré-cooling et/ou de per-cooling. Devant la grande disparité des méthodes certaines limites sont cependant à prendre en considération telles que l'utilisation répétée de l'immersion en eau froide pouvant induire une limitation de l'hypertrophie musculaire, ou encore un pré-cooling trop court dans le temps avec l'ingestion d'eau froide pouvant être inefficace.

1. Externe

I: IMMERSION

Les effets de l'immersion en eau froide ont donné lieu à de nombreuses études permettant un consensus sur sa capacité à réduire l'hyperthermie. Il reste néanmoins de nombreux points où les études divergent, notamment sur le protocole à utiliser (durée, température) la technique (continue ou contrastée), ainsi que ses effets sur les différents marqueurs inflammatoire et hypertrophique.

a) Immersions et hyperthermie

L'immersion est l'un des modèles les plus efficace afin de lutter contre l'hyperthermie. Ainsi dans leur revue McDermott et coll. (2009) comparent différentes techniques de refroidissement

afin de traiter l'hyperthermie : l'immersion en eau froide (corps entier ou membres inférieurs), la ventilation, la douche froide, l'application de glace et l'application de serviettes humides sur la peau. Les études sont classées en 3 catégories en fonction de leurs vitesses de refroidissement : catégorie « idéale » pour un refroidissement égal ou supérieur à $0,16^{\circ}\text{C}/\text{min}$, catégorie « acceptable » pour une vitesse comprise entre $0,16$ et $0,08^{\circ}\text{C}/\text{min}$ et catégorie « inacceptable » pour les études qui refroidissent moins que $0,07^{\circ}\text{C}/\text{min}$. Les auteurs mettent en évidence que la technique la plus performante est le refroidissement par bain froid en corps entier. En catégorie dite « idéale » la quasi-totalité des études sont des refroidissements par immersion (exceptée une étude portant sur une pulvérisation par spray, Barner et coll. (1984). Wegmann et coll. (2012) mettent en évidence dans une méta-analyse le fait que l'efficacité d'une immersion en bain froid est accrue en ambiance chaude (Figure 10) et que les effets sont plus importants lors d'efforts en endurance. Les données de cette méta-analyse montrent également que l'efficacité est plus grande sur des sujets avec une $\text{VO}_{2\text{max}}$ élevée ($> 65\text{mL.kg.min}$), sans pour autant développer sur l'intensité de l'exercice.

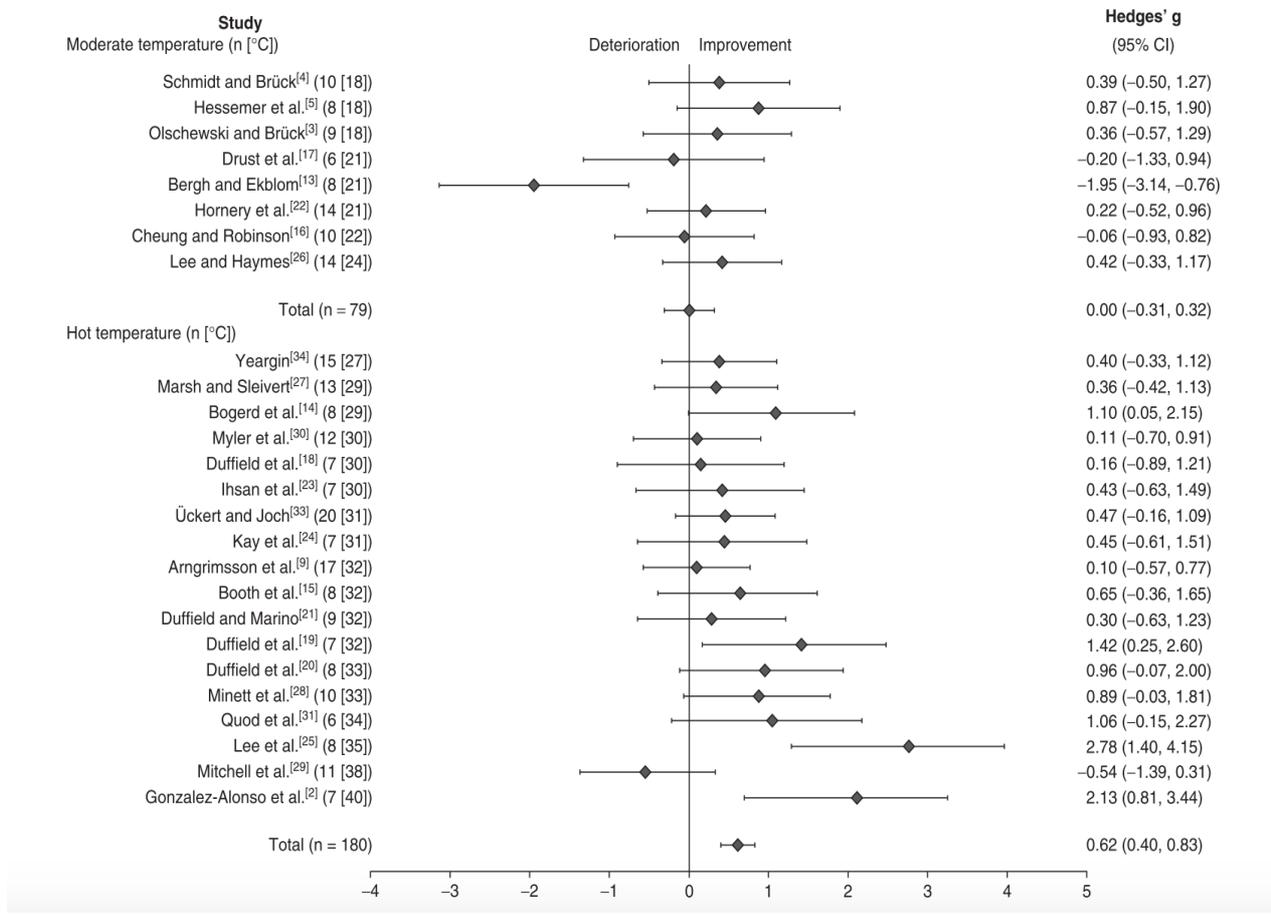


Figure 1.10 : Effet de l'immersion en eau froide en fonction des conditions environnementales (Wegmann et coll. 2012). L'immersion est d'autant plus efficace que la condition environnementale est à une température élevée

Les effets de l'immersion en eau froide sur l'hyperthermie font consensus, cependant une des plus grandes disparités dans les études porte sur la température de l'eau. S'il a été mis en évidence qu'au plus la température de l'eau est basse, au plus le traitement de l'hyperthermie est rapide (Proulx et coll. 2003) grâce à un gradient significativement plus important entre la

température de la peau et celle de l'eau : dans leur étude l'utilisation d'une eau à 2°C permet ainsi d'augmenter la vitesse de dissipation de la chaleur de l'organisme dans un milieu liquide (figure 11) comparé à des températures plus élevées (de 8°C; 14°C; 20°C) ; il est pourtant couramment utilisé des eaux un peu moins froides que 2°C, aux alentours de 10-12°C, sur une durée plus longue (10-15min) ce qui permet, in fine, d'obtenir une température corporelle identique à une immersion à 2°C mais avec une durée d'immersion plus longue (Gagnon et coll. 2010; Proulx et coll. 2003). Si les explications scientifiques se font rares pour expliquer ce choix dans les articles, ces températures et durées sont surtout choisies pour le confort des athlètes qui s'immergent et restent plus facilement dans une eau à 10°C (ou proche de cette température) que dans une eau glacée.

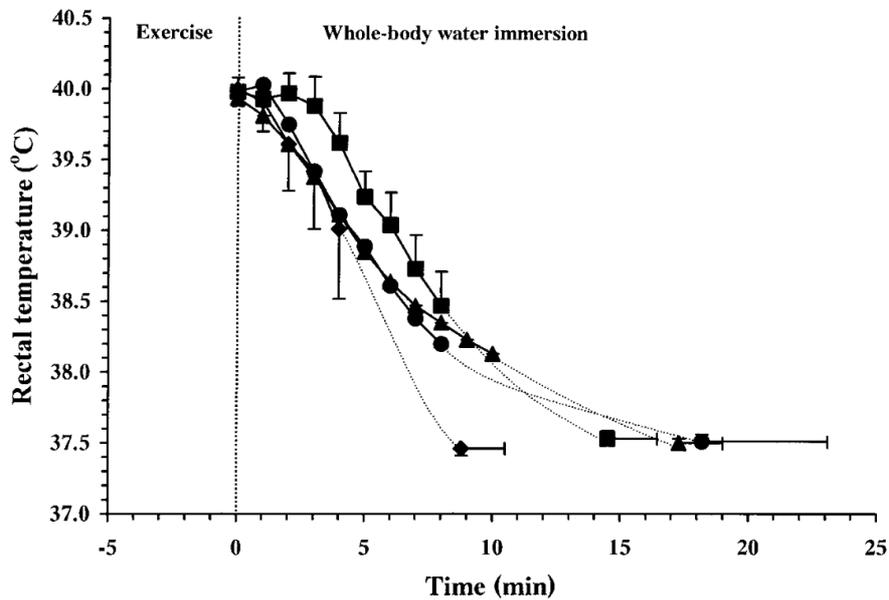


Figure 1.11 : Vitesse de diminution de la température rectale en fonction de la température d'immersion (2°C; 8°C; 14°C; 20°C) pour atteindre 37,5°C (Proulx et coll. 2003).

Cependant d'autres études ne mettent pas en évidence de différence sur la vitesse de refroidissement entre l'eau froide et l'eau glacée. Clements et coll. (2002) n'observent pas, après avoir fait courir un trail (approximativement 19 kms et 86 min d'effort), de différence de vitesse de diminution de la température rectale entre une eau froide (T: 14°C) et glacée (T: 5°C) durant l'immersion et ce jusqu'à 15 min post-immersion. Ces deux méthodes sont néanmoins plus efficaces de 38% après 12 min d'immersion ($P < 0,05$) comparée à une absence d'immersion. Ce résultat ne s'inscrit donc pas en faveur de l'utilisation d'eau glacée. Et si l'immersion est perçue comme l'un des procédés le plus efficace pour diminuer l'hyperthermie, la question du risque de l'utilisation de cette méthode (eau froide) sur des individus en hyperthermie est soulevée. Gagnon et coll. (2010) mettent en évidence que la température centrale continue de diminuer une fois l'immersion terminée. Par conséquent les auteurs suggèrent l'utilisation d'une immersion jusqu'à l'atteinte d'une température de 38,5°C, évitant ainsi les effets négatifs d'un trop grand refroidissement subséquent à l'immersion (l'atteinte d'une température trop basse), pouvant être délétère pour les athlètes.

b) Différentes méthodes d'immersions

Il existe d'autres méthodes d'immersions: les immersions contrastées. Ces dernières consistent à alterner un temps relativement court dans l'eau froide ($T: \leq 15^{\circ}\text{C}$) suivi d'un temps dans une eau chaude ($T: >35^{\circ}\text{C}$), et répéter ce cycle à plusieurs reprises (Crampton et coll. 2013; Bieuzen et coll. 2013). Certains auteurs ne font pas d'immersion dans l'eau chaude mais laissent les sujets exposés à l'air extérieur (Vaile et coll. 2007) ou encore alternent entre douches froides et douches chaudes (Hamlin 2007). Si l'effet principalement attendu est l'augmentation de la

circulation périphérique (Cochrane 2004), c'est surtout l'effet du « pumping action » décrit par Fiscus et coll. (2005) ou Bieuzen et coll. (2013), qui est investigué. Cela consiste à réduire l'œdème musculaire par l'alternance de la vasoconstriction et de la vasodilatation induit par le changement des températures d'immersion. Fiscus et coll. (2005) mettent en avant la fluctuation du flux sanguin artériel sur 24 hommes en bonne santé lors d'un ratio 1:4 (1min à 13°C : 4 min à 40°C) au niveau du mollet. Cependant leur étude n'investit pas le champ de la récupération sportive, ne permettant donc pas de conclure sur les effets de récupération.

Les protocoles restent une fois de plus très disparates : d'une immersion immédiatement après l'effort (Kuligowski et coll. 1998) jusqu'à 20 min post exercice (Juliff et coll. 2014), des durées totales variant de 6 min (Hamlin 2007) à 30 min (Crampton et coll. 2013), des immersions des extrémités (Vaile et coll. 2007; Kuligowski et coll. 1998) à des immersions corps entier (Vaile et coll. 2008). Il en est de même avec les températures dont certains auteurs considèrent comme froid jusqu'à 15°C (Juliff et coll. 2014) tandis que pour le chaud on retrouve des températures allant jusqu'à 38°C (Versey et coll. 2012).

Les discussions des principales études utilisant ces techniques portent à dire qu'il est plus intéressant d'immerger le corps entier afin de ne pas diminuer les réponses physiologiques et de garder les avantages potentiels de la pression hydrostatique (Juliff et coll. 2014). Les effets bénéfiques sur la récupération par le « pumping action » restent à être déterminés car si certaines études démontrent un avantage de l'immersion contrastée (Vaile et coll. 2008, 2007; Kuligowski et coll. 1998), on trouve également des études ne démontrant pas d'effet (Juliff et coll. 2014; Ingram et coll. 2009; Hamlin 2007). Le seul consensus est certainement le fait que l'immersion contrastée doit être investiguée sur des périodes plus longues d'immersion et d'exercice permettant ainsi d'étudier ses effets sur des lésions musculaires plus importantes

(Juliff et coll. 2014; Versey et coll. 2012).

c) Immersion et effets sur la performance

Il a été démontré que l'immersion dans l'eau froide réduit les marqueurs du stress oxydatif (alors que leur concentration croît significativement en période de stress) après l'exercice (Sutkowy et coll. 2015) et diminue l'œdème musculaire (Yanagisawa et coll. 2007). De nombreuses études ont essayé de mettre en évidence le fait que l'immersion en eau froide puisse faciliter la récupération après un exercice. Les principaux résultats montrent que les effets sur la récupération étaient soit inchangés, soit améliorés, et le principal mécanisme proposé est le fait que l'immersion permet de réduire l'inflammation (Versey et coll. 2013; White & Wells 2013). Mais un effet placebo pourrait également être présent (Broatch et coll. 2014). La majorité de ces études se concentre sur des exercices de type "résistance" ou sur de la course à pied. Nous ne savons que peu de choses sur l'efficacité de l'immersion en tant que stratégie de rétablissement des performances d'endurance intenses en cyclisme, répétées au cours d'une même journée.

Les quelques études effectuées sur des épreuves en cyclisme ont porté sur des intensités courtes (1 à 4 kms) en environnement chaud (T: 35°C) avec des immersions de 5 min à 14°C (Peiffer et coll. 2010a, 2010b). Lors de deux épreuves de 1 km soit entrecoupées d'une immersion de 5 min ou d'une condition contrôle sans immersion (Peiffer et coll. 2010a), les auteurs n'ont pas observé d'amélioration de la performance (moyenne et pic de puissance) dans la 2ème épreuve quelque-soit la récupération utilisée (immersion ou contrôle) : dans les deux conditions la puissance pic et moyenne a diminué (respectivement de -86W et -24W) pour les deux conditions). En revanche il a été mis en évidence que l'immersion permet d'obtenir une

température musculaire à la fin du second effort significativement inférieure à la condition neutre ($P < 0,05$), ce qui laisse entrevoir une perspective sur des épreuves plus longues. Et c'est le cas dans une seconde étude où Peiffer et coll. (2010b) mettent en évidence qu'après l'immersion les athlètes ont réduit leur température rectale lors de l'exercice ($P < 0,05$) et ont obtenu une meilleure puissance par rapport à la condition contrôle ($P < 0,05$) tout en maintenant leur performance entre le CLM 1 et le CLM 2 en condition immersion, sans que cela soit le cas pour la condition contrôle. La puissance lors du CLM 2 était significativement plus élevée en condition immersion ($328 \text{ W} \pm 56 \text{ W}$) comparativement à la condition contrôle ($288 \pm 59 \text{ W}$), permettant ainsi un temps d'accomplissement de la distance plus court ($-6,1 \text{ min} \pm 0,3 \text{ min}$). Les auteurs mettent donc en évidence qu'une récupération par immersion entre deux efforts est plus efficace qu'une récupération passive et permet de réaliser la même performance sur 4 kms lors du CLM 1 et 2.

Plus récemment Christensen & Bangsbo (2016) ont investigué également les effets de l'immersion entre deux épreuves de poursuite sur piste (4 kms). Les auteurs réalisent l'étude en deux temps : tout d'abord ils relèvent les temps lors de l'enchaînement de deux poursuites dans la même journée lors du championnat du monde élite (séries qualificatives et finale) et regardent l'évolution des performances des athlètes entre ces deux phases. Il est mis en évidence que la performance chez les élites est réduite de 1% lors de la finale par rapport aux temps des séries ($P < 0,001$). Dans un second temps les investigateurs ont gardé le design d'une journée de compétition et ont fait passer à 12 sujets 2 épreuves de 4 kms séparées de 3 h. Après 3 min de récupération active faisant suite à la 1ère épreuve, chaque cycliste a réalisé soit une immersion de 15 min dans une eau à 15°C ou une récupération passive sans immersion. Les auteurs ne trouvent pas de différence de performance entre les deux conditions lors de la seconde épreuve.

Versey et coll. (2013) ont reporté dans une revue portant sur l'immersion en eau froide, qu'un protocole identique à celui de Christensen et Bangsbo (2016) permet d'améliorer la récupération sur de la course à pied et lors d'exercices de résistance. Christensen et Bangsbo (2016) suggèrent que les dommages musculaires induit par la course à pied (contractions excentriques) sont supérieurs que ceux induits par une épreuve cycliste (contractions concentriques) ce qui peut expliquer la différence des résultats.

D'autres méthodes d'immersion, comme techniques de récupération, sont également étudiées : Vaile et coll. (2007) comparent l'immersion contrastée à l'immersion continue sur la récupération entre deux épreuves. Les athlètes réalisent un exercice de 15 min à 75% de PMA_{pic} suivi d'un CLM de 15 min à intensité maximale puis sont immergés durant 15 min dans une eau à 10°C, 15°C ou 20°C durant 5 cycles de 1:2 (1min en immersion puis 2 min en dehors du bain avec T° environnementale: 29,2°C et HR: 58%), ainsi qu'une immersion à 20°C durant 15 min en continu et à une dernière condition correspondant à une récupération active (40% VO_{2pic}). Les résultats montrent que plus l'eau est froide plus la température corporelle diminue rapidement durant l'immersion (figure 12a) ($P < 0,05$ entre chaque température) mais pour une même température ($T: 20^{\circ}C$) la méthode en continue est significativement plus efficace dans le traitement de l'hyperthermie ($P < 0,05$). En revanche sur la performance qui suit (CLM) aucune des récupérations par immersion ne ressort comme plus efficace (figure 12b). Dans une autre étude Vaile et coll. (2008) déterminent que les immersions répétées sur plusieurs jours en eaux froides (continue et contrasté) améliorent les performances sur 9 min d'exercice par rapport à une récupération passive et une immersion en eau chaude.

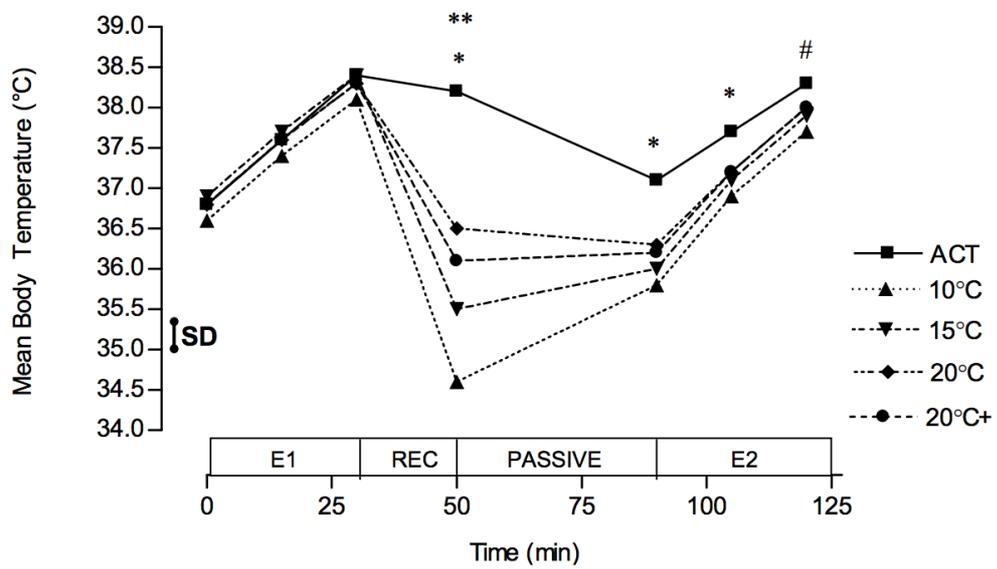


Figure 1.12a : Evolution de la température corporelle au cours du protocole en fonction des différentes immersions. Vaille (2008). L'absence d'immersion (ACT, pour récupération active) ne permet pas une diminution de la température corporelle comparativement aux conditions d'immersions

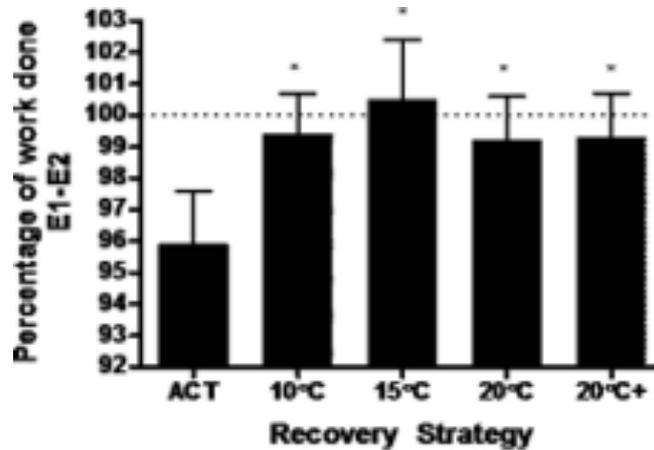


Figure 1.12b : Niveau de performance établi en % par rapport à l'exercice d'avant immersion pour chacune des immersions.

* performance significativement meilleure comparée à la condition récupération active (ACT).

Vaile (2008)

Enfin, il a été démontré que l'immersion entre deux épreuves est plus efficace lorsqu'elle est réalisée immédiatement après l'effort. Brophy-Williams et coll. (2011) testent trois protocoles suite à un exercice intermittent sur tapis roulant: (1) eau froide (15 min à 15°C) immédiatement après l'effort, (2) eau froide (15 min à 15°C) 3 h après l'effort et (3) 15 min de repos passif à 23°C. Le lendemain de l'exercice intermittent suivi d'un des protocoles de récupération, les athlètes ayant effectué l'immersion immédiatement après les exercices (1) ont une performance significativement meilleure que les deux autres conditions ($P < 0,05$) sans d'effet significatif sur la Fc et la lactatémie lors du test de récupération dit « yoyo intermittent », semblable au test de la navette en aller-retour sur 20 mètres.

d) Immersion et effets sur l'organisme

Les études sur l'immersion se sont dans un premier temps focalisées sur le traitement de l'hyperthermie et ses effets sur la performance. L'étape suivante, plus récente, est l'étude des effets en profondeur induits par l'immersion.

Dans une revue bibliographique Hauswirth et coll. (2010) rappellent que les effets de l'immersion sur les marqueurs biologiques tels que la créatine kinase (CK) ou le lactate déshydrogénase (LDH) sont très peu étudiés. Si peu d'études ont mis en évidence un effet bénéfique de l'immersion sur la CK (Vaile et coll. 2008b; Gill et coll. 2006; Howatson & Van Someren 2003; Eston & Peters 1999; cités par Hauswirth et coll. 2010) la plupart des études ne mettent pas en avant ces effets (French et coll. 2008; Goodall & Howatson 2008; J Vaile et coll. 2008 cités par Hauswirth et coll. 2010). Plus récemment, Takeda et coll. (2014) s'intéressent également à différents marqueurs suite à une simulation d'un match de rugby. Les résultats n'indiquent pas non plus d'amélioration sur CPK, LDH, l'aspartate aminotransférase (AST) et créatinine suite à l'immersion en eau froide (10 min T: 15°C), comparativement à une récupération passive. Cependant, malgré l'absence d'amélioration des marqueurs biologiques, le lendemain les joueurs ayant eu l'immersion obtiennent de meilleures performances ($P < 0,05$) sur un test de course de 50 m, accompagné d'un temps de réaction plus court et une fréquence accrue des pas latéraux sur un test de 20 secondes. Les auteurs concluent qu'une immersion en eau froide permet de recouvrer l'aptitude physique plus rapidement et d'atténuer la perception de fatigue, et cela même en l'absence d'effet sur les indicateurs de dommages musculaires. Christensen et Bangsbo (2016) se posent la question de l'effet placebo de l'immersion au vu de leurs résultats où la performance globale n'est pas affectée mais les athlètes partent plus vite sur

les 30 premières secondes du second effort en condition immersion.

Toujours dans leur article, Hausswirth et coll. (2010) mettent en avant que l'immersion ne permet pas d'indiquer des effets sur les cytokines pro et/ou anti-inflammatoire (Vaile et coll. 2008; Rowsell et coll. 2009; Halson et coll. 2008; Ingram et coll. 2009 cités par Hausswirth et coll. 2010). Plus récemment (Peake et coll. 2016) confirment ces résultats liés aux réponses inflammatoires et au stress cellulaire lors d'un protocole portant sur l'immersion en eau froide (10min T: 10°C). Dans leur étude, l'immersion en eau froide ne permet pas d'améliorer la réduction de l'inflammation ni du stress cellulaire suite à un exercice en résistance comparé à une récupération active. Seuls Montgomery et coll. (2008) observent une très faible diminution des IL-6 et interleukines 10 (IL-10) après l'immersion en eau froide.

Des études récentes mettent en avant les limites de l'immersion sur la récupération lorsqu'elle est utilisée fréquemment et sur le long terme. (Roberts et coll. 2015) ont comparé sur 21 athlètes les effets de la récupération par immersion (10 min T: 10°C) par rapport à une récupération active durant 3 mois à raison de 2 séances hebdomadaires. L'étude met en avant que les athlètes usant de l'immersion obtiennent un gain de masse musculaire inférieur au groupe contrôle ($P < 0,05$). Les auteurs relatent le fait que la surface de section des fibres de type II augmente significativement (+17%) dans la condition contrôle par rapport au niveau initial des athlètes, mais que cette augmentation n'est pas présente pour les athlètes utilisant les immersions. Dans la seconde partie de l'étude les auteurs ont procédé à des biopsies musculaires des membres inférieurs sur 9 sujets avant l'exercice puis 2, 24 et 48 h après l'exercice. Ces biopsies ont fait suite à une récupération active ou en immersion. Les résultats montrent que l'immersion retarde significativement ($P < 0,05$) le pic de cellules satellites présentes au niveau musculaire (48 h

avec immersion contre 24 h-48 h pour la condition contrôle), et limite leur nombre ($P < 0,05$). Les résultats sont similaires sur la phosphorylation des kinases p70S6 qui augmentent plus ($P < 0,05$) en condition contrôle. Ces résultats sont confirmés dans une étude plus récente (Figueiredo et coll. 2016) qui conclut que l'immersion, par son inhibition de la création des cellules satellites, bloque la fabrication des ARNs nécessaires à la constitution des ribosomes responsables de la resynthèse protéique.

Ces données suggèrent donc que l'immersion atténue les changements aigus dans le nombre de cellules satellites qui régulent l'hypertrophie musculaire, ce qui peut se traduire par de plus faibles gains d'entraînement à long terme dans la force musculaire et l'hypertrophie, sans pour autant diminuer l'inflammation induit par l'exercice. L'utilisation de l'immersion comme stratégie de rétablissement post-exercice régulière doit donc être reconsidérée. Mais cela ne permet pas de remettre en question les effets de l'immersion sur l'hyperthermie et sur ses effets bénéfiques lorsqu'elle est utilisée de façon ponctuelle entre deux exercices. Il est donc recommandable d'utiliser l'immersion en eau froide lors de la récupération en compétition afin de permettre une meilleure performance le lendemain (ou dans la même journée). Cette technique de récupération ne doit toutefois pas être mise en place quotidiennement afin de ne pas limiter les adaptations recherchées par l'entraînement et notamment l'hypertrophie musculaire.

De plus cette technique reste difficile à mettre en place en raison du matériel difficilement transportable. Même si dernièrement une équipe de recherche Américaine (très sérieuse de surcroit) cherche une alternative aux baignoires en utilisant une bâche remplie d'une eau à $2,1^{\circ}\text{C}$ (Luhning et coll. 2016). Et sans surprise une eau froide dans une bâche permet d'obtenir de meilleurs effets ($P < 0,05$) qu'une absence d'immersion dans le traitement de l'hyperthermie

induit par l'exercice.

II: CRYOTHERAPIE

Ces dernières années ont vu l'émergence d'une technique de refroidissement externe utilisant des températures négatives très importantes sur une courte durée : la cryothérapie. Si les études principales ont mis en avant des résultats positifs de cette méthode dans le domaine médical (Bouzigon et coll. 2016), il n'en reste pas moins vrai que le monde sportif s'est mis à utiliser cette méthode également. En cyclisme il est apparu ces dernières années des caissons à cryothérapie mobile pouvant tenir dans une caravane et ainsi suivre les athlètes sur les grands tours (ASTANA lors de la Vuelta, ou encore l'équipe française FDJ lors du Tour de France).

D'un point de vue médical, les effets bénéfiques de la cryothérapie se retrouvent lors d'études portant sur les arthrites rhumatoïdes (Gizińska et coll. 2015; Jastrząbek et coll. 2013 cités par Bouzigon et coll. 2016), la fibromyalgie (Bettoni et coll. 2013 cités par Bouzigon et coll. 2016) ou encore la spondylarthrite ankylosante (Stanek et coll. 2015 cités par Bouzigon et coll. 2016).

Appliquée à la récupération sportive, la cryothérapie corps entier permet de diminuer les réponses inflammatoires (Ferreira-Junior et coll. 2014; Mila-Kierzenkowska et coll. 2013; Ziemann et coll. 2013 cités par Bouzigon et coll. 2016) et d'accélérer la vitesse de récupération des dommages musculaires (Ferreira-Junior et coll. 2014; Hausswirth et coll. 2011). Cette amélioration, par notamment la diminution plus rapide des cytokines, semble voir son efficacité accrue lorsque les séances durent entre 2 et 3 min à une température de -100°C (Bouzigon et

coll. 2016). De plus, la cryothérapie permet d'améliorer la qualité du sommeil (Schaal et coll. 2015; Bouzigon et coll. 2016), de diminuer le stress oxydatif quand elle est utilisée avant l'exercice (Mila-Kierzenkowska et coll. 2013), ou avant et après l'entraînement (Lubkowska et coll. 2015; Sutkowy et coll. 2014).

Récemment Mawhinney et coll. (2017) comparent les effets entre l'immersion et la cryothérapie. Dix athlètes ont réalisé un exercice à 70% de VO_2 max jusqu'à ce que la température rectale atteigne 38°C. Les participants ont ensuite (de manière randomisée) immergé les membres inférieurs pendant 10 min dans une eau à 8°C, ou ont utilisé un protocole de cryothérapie (2 min à -110 ° C). Les résultats principaux présentent des réductions plus importantes du débit sanguin et de la température des tissus ($P < 0,05$) après l'immersion par rapport à la cryothérapie. Ces nouveaux résultats ont donc des implications pratiques et cliniques pour l'utilisation du refroidissement dans la récupération.

Cependant, il est important de prendre toutes ces études avec précaution car très récemment Point et coll. (2017) ont démontré que la cryothérapie (-30°C) peut augmenter la raideur musculaire (+ 35%) durant les minutes qui suivent son utilisation. Les auteurs mettent en garde sur le fait que la moindre capacité du muscle à s'étirer peut augmenter le risque de blessure si les athlètes réalisent un exercice rapproché. Après 40 min la raideur est encore conséquente (+25%), cependant la durée de cet effet n'est pas encore bien documentée car au-delà de 40 minutes les auteurs n'ont plus réalisé de mesures. De plus la température de refroidissement utilisée dans cette étude est moins importante que ce qui est généralement utilisé dans les cabines de cryothérapie (aux alentours de -110°C), il n'est donc pas inenvisageable que l'effet peut être encore plus important (ou plus long) sur la raideur musculaire post-cryothérapie à -110°C.

III: AUTRES TECHNIQUES

D'autres techniques de refroidissement externe permettent d'améliorer la performance en ambiance chaude. C'est le cas notamment de l'utilisation de vestes de refroidissement (Uckert & Joch 2007; Hasegawa et coll. 2006; Arngrímsson et coll. 2003), ou l'exposition à l'air froid (Mitchell et coll. 2003; Lee & Haymes 1995), tandis que de l'utilisation de spray froid (Barner et coll. 1985) est efficace contre le traitement de l'hyperthermie sans que cela ne soit testé sur la performance aérobie.

Homestead et coll. (2016) ont comparé les effets du refroidissement sur les réponses physiologiques et psychologiques suite à un exercice de 60 min au seuil (T : 23°C ; HR : 32%) chez des sujets résidant en altitude (1625 m) au moins 3 semaines avant le début de l'étude ainsi que toute la durée du protocole. Les 12 sujets ont été évalués sous 3 conditions : porter une veste et des manches de refroidissement (COOL), une chemise synthétique incorporée avec une technologie permettant de faciliter la perte de chaleur par évaporation (EVAP) et une chemise synthétique standard (CON). Les auteurs concluent que le refroidissement à l'aide d'un gilet et des manches (COOL) ou le port d'une chemise spéciale (EVAP) atténuent la vitesse d'augmentation de la température gastro-intestinale ($P < 0,05$) et le NDP ($P < 0,05$) par rapport à une chemise synthétique standard. Lors d'un effort : Le refroidissement COOL a également réduit le taux de sueur par rapport au port de la chemise synthétique standard. Lorsque le port d'une veste est comparé avec le refroidissement d'une partie du corps les résultats vont également dans le sens que l'utilisation de la veste est bénéfique : Cuttell et coll. (2016) comparent l'utilisation d'une veste froide à un collier réfrigéré et à une condition contrôle. Dans cette étude les auteurs mettent en évidence que les sujets pédalent plus longtemps ($P < 0,05$)

avec le port de la veste lors d'un exercice à 60% de la PMA (T: 35°C; HR: 50%) comparé aux deux autres conditions.

Utilisée en pré-cooling, il a été mis en évidence que le port d'un gilet lors de l'échauffement permet d'améliorer la performance sur 5 km de course à pied (Arngrímsson et coll. 2003). Il est également discuté du fait que d'autres techniques peuvent être efficaces telles que le pré-refroidissement des cuisses durant l'échauffement (30 min) qui entraîne une réduction de la température similaire au port d'une veste froide sur le stress thermique (Randall et coll. 2015). Dans cette étude les auteurs notent une amélioration plus importante de la performance sur un CLM de 5 kms en refroidissant la cuisse comparée à la veste ($P < 0,05$). Plus récemment encore, Schmit et coll. (2015) testent après 8 jours d'entraînement et d'acclimatation en climat tropical les effets du pré-cooling avec une veste froide comparé à l'absence de pré-cooling chez des sujets entraînés lors d'un contre la montre de 20 kms (T : 35°C ; HR : 50%). Mais les résultats ne permettent pas de mettre en évidence une amélioration significative de la performance avec ce procédé.

2 . I n t e r n e

La partie précédente développe l'idée que le refroidissement externe permet d'être utilisé avant et après des efforts aérobie en ambiance chaude. En revanche aucune de ces méthodes ne peut être utilisée durant une épreuve officielle. Dès lors, le refroidissement interne, par l'ingestion de boissons et utilisable avant les épreuves, mais également pendant, devient une méthode pertinente. L'hyperthermie étant l'un facteur pouvant limiter la performance (Gonzalez-Alonso et coll. 1999), le principe de l'ingestion d'une boisson froide est (1) de réduire la température

centrale initiale afin d'augmenter la capacité de stockage de chaleur, (2) de limiter la vitesse d'augmentation de la température durant l'effort et (3) d'empêcher une déshydratation pouvant également induire une hyperthermie et une diminution de la performance.

I: PER-COOLING

Il a été démontré qu'en climat tropical plus les athlètes sont rapides sur des épreuves d'endurance, et moins ils ingèrent de volumes d'eau (Baillot et coll. 2014). Cette étude montre également que sur un trail de 27 kms, les athlètes les plus rapides sont capables de tolérer une plus grande augmentation de la température centrale (Baillot et coll. 2014). L'auteur rapporte également que Noakes (2007) ont mis en évidence que des athlètes peuvent perdre jusqu'à 2 kg de masse corporelle avant que les effets attendus de la perte d'eau soient détectables dans l'urine. De plus il est démontré par Berkulo et coll. (2016) qu'un état de légère déshydratation n'affecte pas la performance sur 40 kms de CLM en cyclisme. Le principe de per-cooling en climat tropical avec l'utilisation d'une boisson froide (eau froide ou glace pilée) peut permettre d'augmenter la performance (Trong et coll. 2015; Riera et coll. 2014; Ihsan et coll. 2010; Lee et coll. 2008).

L'ingestion d'eau froide ou de glace pilée dans un environnement chaud (sec ou humide) permet d'améliorer la performance par rapport à de l'eau à température neutre (Stevens et coll. 2017; Riera et coll. 2014; Byrne et coll. 2011; Burdon et coll. 2010; Lee et coll. 2008; Mündel et coll. 2007). Riera et coll. (2014) ont mis en évidence, que plus la boisson ingérée durant l'effort est froide, plus cela entraîne une amélioration de la performance. Dans leur étude les cyclistes ont réalisé un CLM de 20 kms sur home trainer dans des conditions tropicales (T: 30,7°C ; HR:

78%) avec 190 ml de boisson ingérée durant l'effort. Les auteurs ont testé une eau neutre (T: 23°C), une eau froide (T: 3°C) ainsi que de la glace pilée (T: -1°C). Ces trois températures ont été utilisées avec ou sans menthol. Les résultats montrent que la performance est affectée par le menthol (résultats développés dans la partie V) mais également par la température de la boisson avec une différence significative ($P < 0,002$) entre l'eau neutre (2253 s \pm 240 s) et la glace pilée (2100 s \pm 280 s).

Récemment en milieu écologique, Trong et coll. (2015) confirment les résultats des études réalisées en laboratoire, mettant ainsi en évidence que la performance est améliorée avec des températures de boissons basses. Les auteurs testent trois températures (eau neutre T: 28,7°C ; eau froide T: 3,1°C et glace pilée T: 0,17°C avec pour chaque condition du menthol) sur une épreuve comprenant cinq blocs de 4 kms de vélo et 1,5 kms de course à pied enchaînée. Les athlètes ont bu 190 ml d'une des trois boissons lors de l'échauffement et à chaque fin de bloc. Les auteurs mettent en évidence que la performance globale est affectée par la température de la boisson ($P < 0,03$) : la performance avec la glace pilée est significativement meilleure (figure 13) comparée à l'eau froide ($P < 0,002$) ou l'eau neutre ($P < 0,04$). Lorsque la performance a été étudiée par bloc, les auteurs mettent en évidence que l'effet d'une boisson froide est particulièrement efficace lors d'un exercice prolongé : la glace pilée permet une meilleure performance à partir du 4ème bloc ($P < 0,05$) comparé aux deux autres conditions.

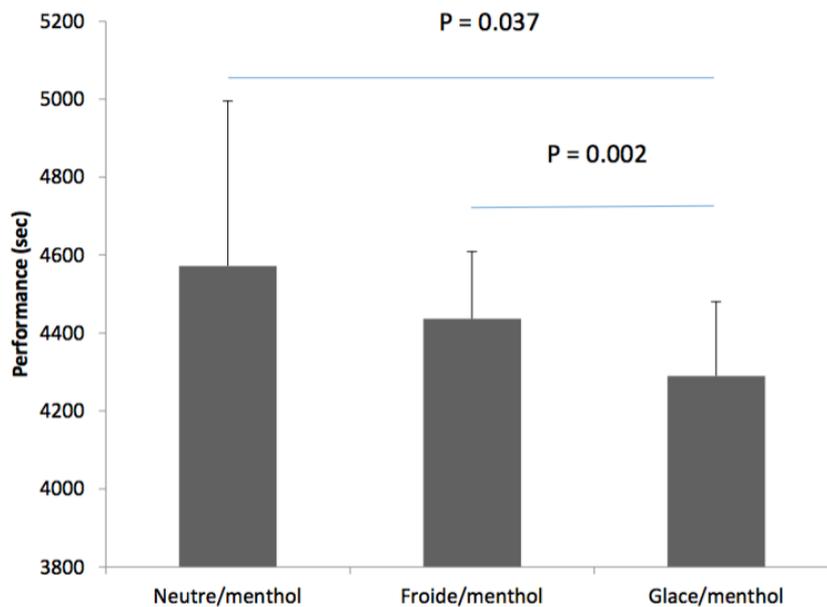


Figure 1.13 : Performance (en secondes) sur un 20 kms en laboratoire, lors de l'absorption d'eau neutre/menthol, d'eau froide/menthol et de glace pilée/menthol. Les valeurs moyennes et SD sont présentées (Trong et coll. 2015). Une eau glace pilée/menthol permet une durée significativement plus courte comparativement aux deux autres conditions

L'ingestion d'une boisson froide entraîne une limitation de l'augmentation de la température centrale par rapport aux conditions neutres (Siegel & Laursen 2012; Byrne et coll. 2011; Lee et coll. 2008). Ces effets sont mis en évidence lorsque les études emploient une grande différence de températures entre la condition contrôle et la température froide, et que les protocoles se déroulent dans un environnement chaud (Burdon et coll. 2010). L'ingestion d'une boisson froide durant l'effort semble ne pas impacter la FC, TC et TS (Schulze et coll. 2015; Riera et coll. 2014; Siegel & Laursen 2012). Néanmoins, il a été développé plus haut que l'ingestion d'une

boisson froide est généralement liée à une augmentation de la performance : une augmentation de la performance associée à l'absence de répercussion sur la FC ainsi que sur ST et CT peut être considérée comme un résultat positif.

L'utilisation d'une boisson froide durant une épreuve est donc une méthode efficace lorsque celle-ci est utilisée de manière prolongée, avec une température la plus basse possible et voit ses effets optimisés lorsqu'elle est utilisée en conditions chaude et/ou humide.

II: PRE-COOLING

L'idée de l'utilisation d'une boisson froide avant l'effort (pré-cooling) est simple: refroidir au préalable l'organisme afin de lui permettre un delta d'augmentation de la température plus important, permettant ainsi un plus grand stockage de chaleur accompagnée d'une possible augmentation de la performance. Comme pour le pré-cooling, au plus la boisson utilisée est froide, au plus son efficacité est accrue (Naito et coll. 2017; Siegel & Laursen 2012; Siegel et coll. 2011).

Très récemment Naito et coll. (2017) s'intéressent également au moment le plus opportun pour mettre en place le pré-cooling en climat chaud (T:35°C HR:30%) et observent qu'à température et quantité de boisson identique, il est plus efficace de faire un pré-cooling qui finit 20 min avant l'épreuve plutôt que de terminer au moment de débiter l'effort. Les auteurs proposent deux boissons (glace pilée T: 0,5°C ou eau froide T: 4°C utilisé comme contrôle) avec la même quantité de boisson ingérée (1,25 g.kg⁻¹ à six reprises). Les 2 ingestions de la glace pilée se font

soit (C1) de 45 min à 20 min avant l'effort soit (C2) de 30 min à 5 min avant l'effort tandis que la condition contrôle (C3) est ingérée uniquement de 30 min à 5 min avant l'effort. Dans un 1er temps l'étude confirme qu'indépendamment du moment, l'ingestion de la glace pilée permet une meilleure performance par rapport à l'ingestion de l'eau froide ($P < 0,05$). Mais le résultat principal de cette étude est l'augmentation de 16% ($P < 0,05$) de la durée d'effort (à 65% de VO_{2max}) avec 20 min de repos entre la fin de l'ingestion de la glace pilée (C1) comparé à (C2) : l'ingestion d'une même quantité de glace pilée mais à un moment différent affecte significativement ($P < 0,05$) la diminution de la température centrale puisque le fait de terminer 20 min avant l'épreuve entraîne une plus grande diminution de la température centrale comparée à une prise identique mais plus rapprochée du début de l'effort ($-0,55^{\circ}\text{C} \pm 0,07^{\circ}\text{C}$ contre $-0,36^{\circ}\text{C} \pm 0,16^{\circ}\text{C}$).

La durée du pré-cooling est également étudiée: Yeo et coll. (2012) ont montré un effet ergogénique sur les performances en climat tropical avec un pré-cooling de 30 minutes (8g.kg⁻¹ de glace pilée). Les auteurs ont montré que le pré-refroidissement induit une diminution plus importante de la température gastro-intestinale et de la sensation thermique lors des 5 dernières minutes de la phase de refroidissement (25 min après le début du pré-cooling) par rapport à l'utilisation d'une boisson à température ambiante ($T: 30,9^{\circ}\text{C}$). Dans leur étude, les coureurs ont bu de l'eau à température ambiante ad libitum pendant l'exercice, ce qui ne permet pas d'étudier l'effet cumulatif du pré-refroidissement par ingestion d'eau froide.

Cependant lorsque les techniques sont cumulés (pré + per cooling) le pré-cooling ne permet pas d'obtenir d'effet cumulatif sur la performance par rapport à l'ingestion de glace pilée seule en per-cooling (Riera et coll. 2016; Schulze et coll. 2015).

3. Cumul des techniques

Les techniques de pré- ou per-cooling permettant d'affecter positivement la température et la performance se développent, mais des protocoles utilisant le cumul des méthodes afin de déterminer si un effet cumulatif peut exister sont également explorés. Cependant les déclinaisons sont multiples : du cumul entre le pré-cooling et le per-cooling interne (Riera et coll. 2016) au cumul de deux techniques différentes de pré-cooling (Quod et coll. 2008) en passant d'un pré-cooling externe cumulé à un per-cooling interne (Ross et coll. 2011). Si il est complexe de s'y repérer il reste néanmoins évident que les chercheurs ont commencé à s'intéresser de prêt à ce sujet dans l'optique des Jeux Olympiques de Pékin, en climat tropical, et autres grandes échéances passées ou à venir en climat chaud et/ ou humide (JO 2016, coupe du monde de football et championnat du monde de cyclisme au Qatar...). Cependant l'effet principal recherché est d'augmenter les effets d'un pré- ou d'un per-cooling seul et donc d'améliorer encore plus la performance.

I : CUMUL DE DEUX TECHNIQUES INTERNES

Riera et coll. (2015) mettent en évidence qu'un pré-cooling de 30 min utilisant de l'eau froide mentholée cumulé à l'ingestion de glace pilée mentholée à l'effort, ne permet pas une meilleure performance que la seule utilisation de glace pilée à l'effort. Lorsque les auteurs s'intéressent à l'ingestion d'une boisson froide combiné au refroidissement externe, Shulze et coll. (2015) montrent également que l'ingestion en pré-cooling de glace pilée ($15\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ T: -1°C) cumulé avec une serviette froide sur les jambes et le torse avant l'effort, combiné avec une ingestion ad libitum de glace pilée durant l'exercice, ne permettent pas d'obtenir une meilleure performance

par rapport à l'ingestion ad libitum durant l'exercice seul. Ces études mettent donc en évidence que le cumul du pré-cooling interne de 30 min et de l'utilisation de glace pilée à l'effort n'est pas cumulatif, et que l'absorption de glace pilée au cours de l'exercice est suffisante pour améliorer la performance. Cependant, aucune étude n'utilise un pré-cooling plus long ou plus en amont de la performance ce qui pourrait avoir des résultats bénéfiques, comme suggéré par Naito et coll. (2017).

II : AUTRES STRATEGIES DE CUMUL

Quod et coll. (2008) expérimentent plusieurs méthodes de pré-cooling en condition chaude (T: 34,3°C; HR: 41%) : (C1) l'immersion en eau froide (30 min) suivie par le port d'une veste froide (40 min) comparé (C2) au port d'une veste seule durant 40 min ou (C3) une condition contrôle. Les auteurs montrent que le cumul des deux techniques de pré-cooling (C1) permet une diminution significative de la température rectale ($P < 0,01$) et une amélioration significative de la performance ($P < 0,01$) comparé aux deux autres conditions (sans différence entre C2 et C3). L'immersion suivie du port d'une veste froide durant la période précédent un effort en condition chaude permet donc de diminuer significativement la température corporelle ce qui induit une capacité de stockage de chaleur plus importante durant l'exercice, entraînant une amélioration de la performance.

En condition tropicale (T: 32-35°C HR: 50-60%), Ross et coll. (2010) investiguent deux méthodes de pré-cooling durant 30 min, à l'ingestion d'eau froide (T: 4°C) ad libitum durant un exercice. La première méthode (1) étant l'utilisation d'une immersion corps entier (10 min T: 10°C) suivi du port d'une veste froide, tandis que la seconde (2) est l'ingestion de glace pilée

(14g.kg⁻¹) cumulée à l'application de serviette glacée. Si les deux méthodes (1) et (2) démontrent une diminution significativement plus importante de la température rectale avant l'effort par rapport à la condition contrôle ($P < 0,05$), il en ressort également que la technique (1) avec immersion permet une diminution significativement plus importante de la température rectale comparée à la méthode (2) boisson + serviette ($P < 0,05$). De plus, il ressort de cette étude qu'il n'y a pas de différence significative entre les deux conditions sur la performance. Néanmoins, par rapport à la condition contrôle la performance lors d'un CLM de 46,4 kms est améliorée de 3% ($P < 0,05$) avec la condition (2) l'ingestion de glace pilée + serviette froide. Les auteurs précisent que malgré ces observations, les explications à avancer sur ce résultat paraissent « peu claires » car aucune variable n'explique réellement que malgré une température plus basse en condition (1) la performance n'est améliorée par rapport à la condition contrôle qu'avec la condition (2). Seule la sensation thermique au début du CLM permet de dire que les sujets « se sentent mieux » en condition (2) glace pilée + serviette froide.

Les études montrent donc que le cumul du pré-cooling et per-cooling est une méthode efficace dans certain cas afin d'augmenter la performance aérobie en climat chaud et/ou humide, notamment avec l'utilisation de refroidissement externe en pré-cooling (Bongers et coll. 2014; Ross et coll. 2011; Quod et coll. 2008). Cependant il reste encore à investiguer plus en détail le cumul de deux méthodes internes car si les résultats actuels ne sont pas en faveur du cumul des ingestions de boisson froide (Riera et coll. 2015; Shulze et coll. 2015), ces deux études utilisent un protocole identique (30 min de pré-cooling) ce qui laisse de nombreuses perspectives avant de confirmer ou d'infirmer l'inefficacité de cette méthode.

4. Acclimatation ou adaptation à la chaleur

L'acclimatation et l'adaptation à la chaleur permettent de limiter l'impact du climat tropical sur la performance. L'acclimatation correspond à l'exposition naturelle dans un environnement tandis que l'adaptation à la chaleur se définit comme étant des périodes d'expositions répétées en conditions chaudes dans un environnement non naturel (laboratoire, chambre climatique), avec des adaptations physiologiques similaires pour les deux méthodes.

Quatorze jours d'exposition au climat tropical entraînent des adaptations physiologiques suffisantes pour une acclimatation complète chez des athlètes bien entraînés, mais la performance reste malgré tout altérée, mettant en évidence, d'après les auteurs, la supériorité du climat sur les facultés d'adaptations (Voltaire et coll. 2002). En climat tropical, Voltaire et coll. (2002) observent que la température, prise le matin au réveil, est significativement plus élevée en climat tropical (durant 14 jours) par rapport à une condition neutre (pré-acclimatation). Cependant à 14 jours la température est significativement moins importante qu'au second (effet temps) ce qui rend compte d'une adaptation. Le taux de sudation et la perte de masse corporelle sont significativement plus importants lors des 3 mesures réalisées en climat tropical comparé au climat neutre ($P < 0,05$), avec pour la sudation, aux 8^{ème} et 14^{ème} jours des valeurs qui sont significativement plus impactées qu'au second jour ($P < 0,05$) : les adaptations sudomotrices ne sont pas encore en place au second jour mais le sont au 8^{ème}. Une moindre sudation est également présente au 14^{ème} jour comparé au 8^{ème}. Ces adaptations expliquent le taux de sudation significativement plus élevé par rapport au second jour, liée à l'hypervolémie. L'hypervolémie permet aux athlètes d'avoir une moindre augmentation de température (par rapport à T8) pour

une même intensité d'effort. Cette hypervolémie permet aux athlètes de moins suer. La FC (repos et moyenne durant l'effort) est significativement plus élevée au second jour ($P < 0,05$) mais n'est pas impacté au 8^{ème}. Cependant au 14^{ème} jour la FC est significativement plus basse que les autres mesures pour une même intensité d'effort demandée ($P < 0,05$), ce qui indique une certaine acclimatation par le biais d'une augmentation du volume plasmique. Enfin, la performance est significativement moins bonne lors des 3 épreuves en climat tropical comparée au test en climat neutre. Hue et coll. (2004) complètent cette étude en observant une réduction significative de l'hématocrite ($P < 0,05$) suite à une augmentation du volume plasmatique. D'après les auteurs, l'arrivée en climat tropical permettrait une augmentation du volume plasmatique de 7,5%. A ce jour, une seule étude (Racinais et coll. 2015) montrent qu'après deux semaines d'acclimatation les cyclistes sont capables de réaliser en ambiance chaude un effort identique à l'ambiance froide, alors que sans acclimatation la performance est négativement impactée entraînant une diminution de la puissance durant les contre la montre (43,4 km). Il paraît donc difficile, voire impossible (Voltaire et coll. 2002), pour des athlètes de performer en climat tropical aussi bien qu'en climat non tropical et cela même chez des athlètes acclimatés, puisqu'actuellement seule une étude dans la littérature (Racinais et coll. 2014) semble donner la contradiction à cette idée.

Des alternatives ont donc été mises en place afin d'accélérer le phénomène d'acclimatation. Racinais et coll. (2015) rédigent un article faisant état des consensus sur l'entraînement et la compétition en climat chaud. La 1^{ère} partie de l'article laisse une large place à l'effet de l'acclimatation. Les auteurs recommandent aux athlètes voulant performer en climat chaud de répéter des entraînements dans ces conditions afin d'obtenir des adaptations pouvant réduire le stress physiologique et augmenter la capacité d'exercice dans la chaleur. Les auteurs

recommandent donc des séances d'au moins 60 min/jour avec une augmentation de la température du corps et de la peau, ainsi que de stimuler la vitesse de déclenchement de sudation. Les premières adaptations sont obtenues au cours des premiers jours, mais les principales adaptations physiologiques ne sont pas complètes jusqu'à ~1 semaine. Idéalement, la période d'acclimatation thermique devrait être de 2 semaines afin de maximiser tous les avantages. Hue (2011) dans une revue de littérature portant sur la performance aérobie en climat tropical, préconise à des athlètes de haut niveau non acclimatés d'arriver 10 jours avant l'événement et de s'hydrater en suivant les recommandations car les effets de la déshydratation cumulés à l'hyperthermie sont encore plus délétères que l'hyperthermie seule.

Si les sportifs ne peuvent pas s'acclimater dans le même environnement que la compétition, les auteurs suggèrent d'utiliser une pièce chaude (Lorenzo et coll. 2010).

Mais d'autres méthodes sont utilisées permettant aussi d'obtenir des adaptations sans être en climat tropical : l'entraînement en ambiance thermique chaude. Cette technique, bien que permettant moins de temps d'exposition permet également de limiter l'impact du climat en permettant les adaptations physiologiques de l'acclimatation (Chapitre II.3)

Récemment, Casadio et coll. (2016) ont réalisé un état de la littérature sur des techniques émergentes : l'utilisation de bain chaud et de sauna. Malgré des effets potentiellement bénéfiques, les auteurs reconnaissent que la grande disparité entre les méthodes proposées et les adaptations nécessaires en fonction des sports ne permettent pas de donner une recette miracle.

Les auteurs préconisent donc une approche individuelle afin d'optimiser au mieux l'acclimatation aux événements se déroulant en condition chaude.

V) LE MENTHOL

Le menthol peut être obtenu par extraction d'huile essentielle de menthe, particulièrement de la menthe poivrée, ou par synthèse. S'il est principalement connu pour permettre une sensation de froid (Eccles 1994; Green 1985), de nombreuses propriétés telles que ses effets analgésiques (Pan et coll. 2012) font du menthol un composé organique étudié dans le champ de la performance sportive. Son application cutanée (Botonis et coll. 2016; Barwood et coll. 2015,2012; Gillis et coll. 2010; Kounalakis et coll. 2010) ou son utilisation dans des boissons (Riera et coll. 2016, 2014, Trong et coll. 2015) en sont les principales utilisations mais on le retrouve également utilisé en application cutanée lors d'immersions (Botonis et coll. 2016) ou encore en rinçage de la bouche (Mündel & Jones 2010). Le menthol peut, grâce à sa sensation de froid, influencer le régulateur central en donnant le signal que la température ressentie est inférieure à la température réelle. Ses capacités d'action sur l'organisme permettent d'améliorer la performance aérobie en climat tropical et mettent en évidence que les facteurs pouvant limiter la performance peuvent être interdépendants.

1. Effet du menthol sur la performance

I : EFFET DE L'INGESTION DU MENTHOL

L'utilisation du menthol interne a principalement été étudiée lors du per-cooling. Il a été mis en évidence par Riera et coll. (2014) que le menthol permet d'augmenter les effets de l'ingestion de boisson froide. Effectivement si ces auteurs ont montré que l'ingestion de glace pilée améliore la

performance comparée à l'ingestion d'une eau neutre, les auteurs ont également mis en évidence que le menthol permet d'accentuer ces effets (figure 14). Ces résultats obtenus en laboratoire ont été confirmés sur le terrain (Trong et coll. 2015), permettant ainsi de prendre en compte l'influence de l'environnement extérieur tel que la chaleur rayonnante ou le vent. Le menthol peut donc influencer positivement les performances d'endurance par une diminution du stress thermique (Saunders et coll. 2005) mais aussi influencer sur le stimulus « froid » au niveau de la bouche, ce qui entraîne une augmentation de la sensation de froid.

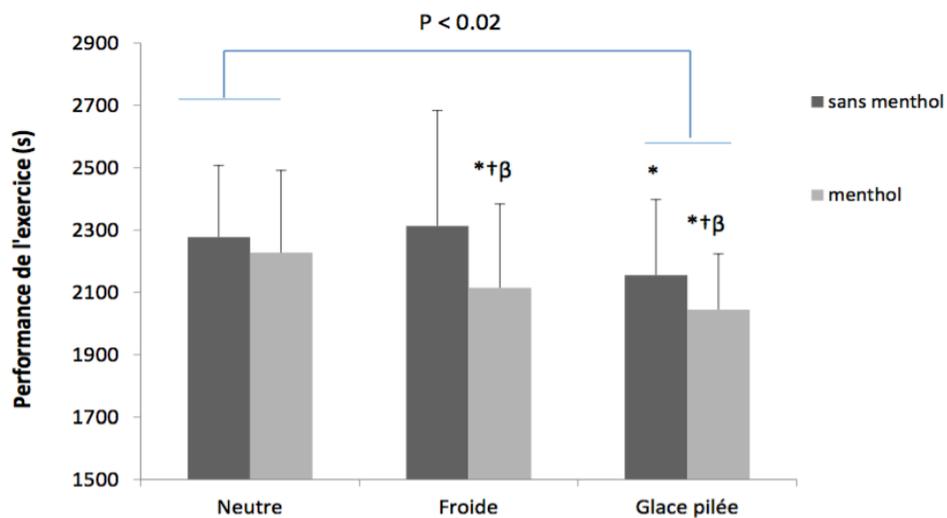


Figure 1.14 : Performance (secondes) de 20 kms à vélo lors de l'ingestion d'eau neutre, froide, et de glace pilée avec ou sans menthol (Riera et coll. 2014). A température égale, une boisson mentholée permet une meilleure performance comparativement à la même eau sans menthol.

* Différence significative par rapport à l'eau neutre sans menthol ($P < 0,01$)

† Différence significative par rapport à l'eau neutre/menthol ($P < 0,01$)

β Différence significative par rapport à l'eau froide/menthol ($P < 0,01$)

Une autre stratégie consiste à simplement rincer (ou gargariser) la bouche avec une solution de menthol liquide avant de cracher la solution. Dans la première étude de ce type, un rinçage mentholé (25 mL à une concentration de 0,01% effectué toutes les 10 min) a significativement amélioré (9%) le temps d'effort à vélo jusqu'à l'épuisement (Mündel & Jones 2010). Les chercheurs ont également observé une augmentation significative du volume d'air expiré, mettant en évidence une plus grande fréquence respiratoire, ainsi que d'une diminution du NDP. Des résultats similaires ont également été observés en course à pied en condition chaude, où le rinçage mentholé (25 ml à une concentration de 0,01% effectué tous les 1 km) a significativement amélioré de 3% la performance sur 5 kms (Stevens et coll. 2016a) et de 3,5% sur 3 km lorsque le menthol est combiné avec un jet d'eau sur le visage durant l'épreuve (Stevens et coll. 2017b). Au cours de ces études, une augmentation significative du volume d'air expiré a également été observé parallèlement aux sensations thermiques nettement plus froides (Stevens et coll. 2016a,b). En particulier, l'utilisation d'un rinçage de la bouche avec du menthol au cours de l'exercice, qu'elle soit combinée ou non avec de l'eau du visage, est significativement plus bénéfique pour l'exécution d'exercice en condition chaude, comparée à l'utilisation de stratégies de pré-refroidissement bien établies (Stevens et coll. 2016a,b). En tant que tel, le rinçage mentholé effectué de façon intermittente au cours de l'exercice semble être une intervention efficace pour améliorer la performance en climat chaud, mais son utilisation en milieu écologique reste néanmoins difficile à mettre en place.

D'autres études portant sur l'ingestion de menthol et les performances ont été réalisées sur des exercices plus courts sans pour autant mettre en évidence d'amélioration de la performance (Meamarbashi & Rajabi 2013; Sönmez et coll. 2010). Par conséquent, ces études suggèrent que le menthol peut ne pas être une aide efficace pour une activité de courte durée, mais des

recherches supplémentaires sont nécessaires pour confirmer ces résultats.

II : EFFETS CUTANES DU MENTHOL

Stevens et coll. (2016c) présentent une revue sur l'effet de l'application externe de menthol sur la capacité physique et la performance (tableau 3). La moitié des études relevées ont utilisé la pulvérisation d'une solution de menthol sur les vêtements, avant (Barwood et coll. 2012, 2014) ou pendant un exercice d'endurance en CLM (Barwood et coll. 2015). La pulvérisation d'une solution de menthol sur les vêtements d'exercice à une concentration de 0,05% n'a entraîné aucune amélioration des performances sur 40 km en cyclisme (Barwood et coll. 2012) ou de 5 km (Barwood et coll. 2014) malgré une ST et CT respectivement sensiblement plus froid et plus confortable dans les deux cas. La pulvérisation était également inefficace lorsque la solution de menthol était plus concentrée (0,2%) et utilisée au bout de 10 km d'une épreuve cycliste de 16,1 km, malgré une perception plus faible du NDP, une ST plus froide et un CT amélioré. Une seule étude a démontré un effet bénéfique sur la performance en utilisant une application cutanée de menthol : l'application d'un gel de menthol sur le visage à une concentration de 8% et un volume de 0,5 g.100 cm² (Schlader et coll. 2011). Cette intervention a augmenté de 21% le travail total accompli dans un exercice réalisé jusqu'à épuisement ainsi qu'une amélioration significative de ST et CT.

En tant que telle, l'utilisation externe de menthol peut avoir besoin d'être appliquée directement sur le visage, ou du moins directement sur la peau à une concentration élevée afin d'avoir un effet ergogène.

D'autres études ont appliqué un gel mentholé directement sur la peau afin d'évaluer les effets sur la force musculaire (Stevens & Best 2017; Topp et coll. 2011a,b). Un gel de menthol appliqué sur l'avant-bras à une concentration de 3,5% et un volume de 0,5 g.100 cm² n'a pas permis d'améliorer la force musculaire isocinétique 20 minutes après l'application (Topp et coll 2011a). De même, un gel mentholé avec la même concentration et le même volume appliqué au biceps brachial n'améliore pas la contraction volontaire maximale ni la force des fléchisseurs du coude 20 minutes après l'application (Johar et coll. 2012). En ce qui concerne l'amplitude des mouvements articulaires, une étude a démontré que l'application d'un gel de menthol à 2% augmente l'amplitude articulaire du coude après un protocole d'exercices excentriques pour induire une douleur musculaire plus tardive (Haynes et coll. 1992). Cependant le gel n'a pas d'incidence sur la gamme de mouvement des ischio-jambiers en l'absence d'exercice excentrique précédent le test (Akehi et coll. 2013). Par conséquent, l'utilisation d'un gel mentholé semble avoir peu d'influence sur la force musculaire et l'amplitude articulaire.

Tableau 1.2 : Revue sur les effets de l'application cutanée du menthol sur la capacité d'exercice et la performance (d'après Stevens et coll. 2016)

Investigation	Ambient Conditions	Subjects	Menthol Application Method	Protocol	Outcome
Schlader et al. [16]	20°C, 48% RH	12 males, untrained	Topical application of menthol gel on the face (0.5 g·100 cm ² at 8% prior to protocol)	Cycling TTE RPE clamp protocol at 16 'hard-very hard'	↑ Total work by 39 kJ (21%) ↓ TS, ↑ TC
Topp et al. [33]	NR	9 males, 8 females, untrained	Topical application of menthol gel on the right forearm (3.5 g total: 0.5 g·100 cm ² at 3.5% 20 min prior to protocol)	30 repeated maximal flexions and extensions of the wrists at 30°·s	↔ Muscle strength ↓ Blood flow in radial artery
Johar et al. [18]	NR	12 males, 4 females, untrained	Topical application of menthol gel on the <i>Biceps Brachii</i> (2 g total: 0.5 g·100 cm ² at 3.5% 20 min prior to protocol)	MVC and EF of the elbow flexors 48 h post DOMS inducing exercise	↔ MVC or EF ↓ Perception of DOMS
Barwood et al. [31]	32°C, 50% RH	11 males, 40 km cycle time < 70 min	Menthol sprayed on the cycling jersey (106 mL at 0.05% between WU and TT)	Cycling TT of 40 km	↔ Perf time ↓ TS, ↑ TC
Barwood et al. [32]	34°C, 50% RH	6 males, untrained	Menthol sprayed on the running top (100 mL at 0.05% between pre-load and TT)	15 min fixed intensity pre-load run then 5 km TT	↔ Perf time ↓ TS, ↑ TC
Barwood et al. [22]	34°C, 33% RH	8 males, untrained	Menthol sprayed on the cycling jersey (100 mL at 0.2% after 10 km of TT)	Cycling TT of 16.1 km	↔ Perf time ↓ RPE, ↓ TS, ↑ TC

↔ = no change, DOMS = delayed onset muscle soreness, EF = evoked force, NR = not reported, MVC = maximal voluntary contraction, perf = performance, RH = relative humidity, RPE = rating of perceived exertion, TC = thermal comfort, TS = thermal sensation, TT = time-trial, TTE = time to exhaustion, WU = warm-up.

Il n'existe à notre connaissance qu'une seule étude qui s'intéresse à l'effet du menthol lors d'une récupération immergée (Botonis et coll. 2016). Les auteurs testent l'effet du menthol sur la peau lors d'une récupération immergée dans une eau à 24°C durant 60 min sur deux groupes: l'un de sept nageurs étant habitué à être immergé dans la piscine (sic) et un second de sept sportifs non nageurs. Chacun des groupes est testé dans la condition menthol et non mentholée. Le gel contient 4,6 g de menthol dissous dans 100 ml d'eau chaude. Dans un premier temps les sujets pédalent jusqu'à l'atteinte d'une température rectale égale à 38°C puis les sujets sont

immédiatement immergés. Le premier résultat de cette étude est que les athlètes atteignent plus rapidement les 38°C lorsque la lotion mentholée est appliquée ($P < 0,05$). Immergés, la réduction de la température rectale est moins importante avec le menthol qu'en l'absence de menthol (respectivement $-0,53 \pm 0,35^{\circ}\text{C}$ et $-0,73 \pm 0,31^{\circ}\text{C}$ avec $P < 0,01$). De plus tout au long de l'immersion, VO_2 , VE et FC sont significativement plus élevés en condition mentholée ($P < 0,05$). Avec la sensation thermique qui diminue au cours du temps, les sujets se sentent significativement plus froid à partir de 35 min d'immersion lorsqu'ils sont avec le menthol.

Valente et coll. (2015) comparent l'application cutanée et la prise orale du menthol. Le résultat principal de cette étude est que la vasoconstriction cutanée, la température rectale et le stockage de chaleur ont significativement plus augmenté avec l'application du gel mentholé par rapport à la prise orale et la condition de contrôle ($P < 0,05$). Les auteurs concluent que l'administration du menthol augmente la thermogénèse, mais que ces effets sont minimisés lors de l'administration orale du menthol, probablement en raison d'une dégradation plus rapide et d'une augmentation des taux sanguins de glucuronamides de menthol (N.B: cette molécule permettrait à l'organisme d'améliorer l'excrétion rénale de certaines substances).

Il en ressort donc que le menthol appliqué sur la peau n'a pas (ou peu) d'effet sur la performance et impacte négativement la thermorégulation : à l'exercice en augmentant plus rapidement la température rectale, et durant l'immersion en limitant sa réduction. De plus, à l'effort il est relevé qu'il peut permettre une augmentation des paramètres ventilatoires et cardiovasculaires tels que VO_2 , VE et FC. Cependant les effets mécanistiques liés à ces effets sont peu ou pas connus.

2. Mécanistique du menthol

Il a été observé que de très faibles doses de menthol, administrées par voie intraveineuse, poussaient les rats à rechercher des températures ambiantes plus chaudes sans que le menthol ait modifié la température du noyau (Almeida et coll. 2006). Cet exemple démontre l'action principale du menthol : sa sensation de froid (Almeida et coll. 2006; Eccles 1994). Le menthol agit chimiquement sur des neurones particulièrement sensibles à la température : les thermorécepteurs, et plus particulièrement TRPM8, TRPA1 et TRPV3 (Macpherson et coll. 2006; McKemy et coll. 2002; Yosipovitch et coll. 1996). Macpherson et coll. (2006) supposent qu'une faible dose de menthol utilisée permettrait de stimuler TRPM8, le récepteur qui habituellement est activé par des températures inférieures à 25°C. Tandis qu'une concentration plus importante permettrait de stimuler le récepteur responsable du réchauffement : TRPV3 (figure 15). En fonction de sa concentration, le menthol va donc pouvoir modifier la perception de chaleur liée à l'environnement.

Cependant, agissant sur les thermorécepteurs l'effet du menthol n'est pas indifférent aux conditions extérieures : il est bien documenté que le menthol produit chimiquement une sensation de refroidissement dans un environnement neutre (Tajino et coll. 2007,2011;;Hensel & Zotterman 1951; Green 1985) ou tropical (Riera et coll. 2016 et 2014; Trong et coll. 2015) alors que son effet est minimisé dans un environnement froid (Garrett et coll. 2009; Schäfer et coll. 1986).

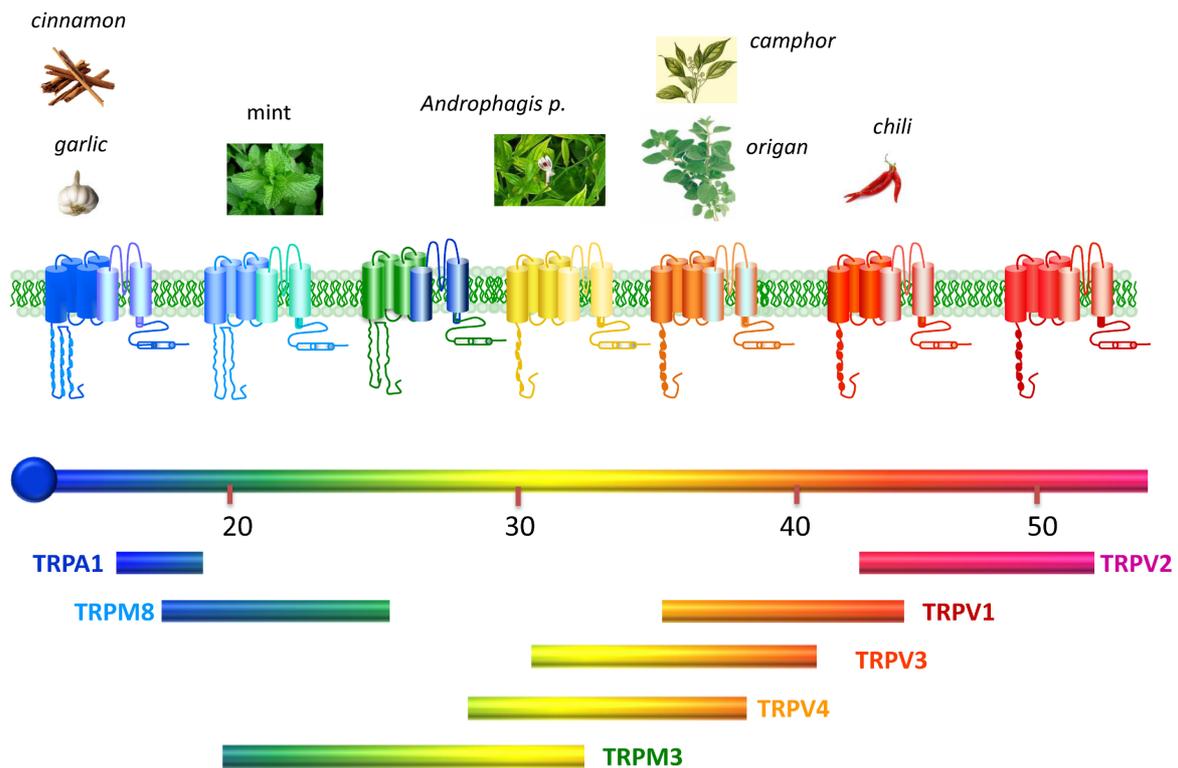


Figure 1.15 : Stimulation des TRP en fonction de la température et de l'action de certains comestibles sur ces thermorécepteurs. TRPM8, TRPM3 et TRPV4 peuvent être activé par le menthol

L'homme étant un être homéostase, il lui faut maintenir sa température relativement stable. L'organisme régule la température à partir de cellules nerveuses qui vont capter la température, puis permettre d'agir sur le centre thermorégulateur : le système nerveux central. Ce dernier va donc avoir la possibilité d'augmenter ou de diminuer la production de chaleur (Chapitre I et II). Lorsque le menthol agit sur les thermorécepteurs il est donc à envisager une réponse à ce stimuli. Si les mécanismes restent encore peu détaillés, il est suggéré que le menthol joue un rôle important dans les rétroactions négatives induites par le système nerveux central : Ruskin et coll. (2007) étudient les effets du menthol à différents dosages sur la température du rat. Les auteurs

injectent en intraveineux aux animaux une dose mentholée de 200 ou de 400 mg/kg ou bien une huile « neutre », c'est à dire sans menthol. Les résultats présentent une hyperthermie induite par le menthol dans les deux dosages 20 min après l'injection comparés à l'huile. De plus les auteurs observent que la température des rats augmente plus avec 200 mg (+0,8°C) qu'avec 400 mg (+0,4°C) toujours comparée à l'huile. Il est également à noter que l'huile a aussi permis une légère augmentation de la température corporelle due au stress de l'injection et aux différentes insertions répétées de la sonde rectale. Comparé à la température initiale d'avant les injections, le menthol (dans les deux dosages) permet donc une augmentation encore plus importante que relevée dans l'étude par rapport à l'huile. Les auteurs suggèrent donc que si certaines concentrations du menthol permettent d'affecter TRPM8, il en ressort cependant que l'hyperthermie induite par le menthol ne serait pas centralisée puisque TRPM8 n'est pas « exprimé » dans le cerveau (Fonfria et coll. 2006; Peier et coll. 2002). Les auteurs concluent donc qu'il existe une gamme de doses de menthol qui produit un effet purement sensoriel (froid) par le biais de TRPM8, tandis que des doses plus élevées peuvent influencer sur la température corporelle en affectant d'autres canaux ioniques (Macpherson et coll. 2006). Le dosage le plus utilisé, et ne donnant pas d'augmentation significative de la température centrale est inférieur ou égale à 0,05% (Riera et coll. 2016,2014; Trong et coll. 2015; Gillis et coll. 2010).

Cependant, lorsque le menthol est appliqué sur la peau, il semble plus évident que son effet induit une augmentation de la température (Botonis et coll. 2016; Kounalakis et coll. 2010; Tajino et coll. 2007): La littérature rapporte que le menthol a un effet vasoconstricteur (Botonis et coll. 2016; Kounalakis et coll. 2010; Tajino et coll. 2007). Si Tojino et coll. (2007) réalisent une étude sur le modèle animal, en mettant en évidence que l'application cutanée de menthol sur le rat permet une vasoconstriction et augmente la température rectale 30 min après l'application,

l'effet vasoconstricteur est également mis en évidence sur l'homme. A l'exercice Kounalakis et coll. (2010) rapportent les mêmes observations, en mettant également en avant, que la vasoconstriction induite par l'effet du menthol sur la peau entraîne un retardement du début de la transpiration, entraînant une augmentation de la température centrale plus rapide. Des résultats similaires sont décrits par Bottonis et coll. (2016) puisque dans leur protocole l'application cutanée du menthol permet aux athlètes d'atteindre la température de 38°C significativement plus rapidement que les athlètes sans menthol. D'après Tajino et coll. (2007), l'augmentation de la vasoconstriction en condition menthol peut probablement être attribuée à son action de stimulation des thermorécepteurs cutanés. Gillis et coll. (2010) montrent qu'une concentration de 2% de menthol dans un spray induit une augmentation significative de la température rectale, ce qui n'est pas le cas avec une concentration de 0,05%.

Si à petite dose le menthol peut donc permettre d'améliorer la sensation thermique ou le confort par son action sur les thermorécepteurs, il est cependant à noter l'importance du dosage. Un dosage trop important peut entraîner une vasoconstriction et une augmentation de la température centrale, ce qui est donc une limite non négligeable de son action, qui plus est en climat tropical. Utilisé dans le but d'augmenter la performance, il est donc important de le doser avec soin lors des différentes utilisations (cutanée ou interne). Cependant à notre connaissance aucun accident lié à l'hyperthermie induite par le menthol n'est à relever dans la diversité des études sur le sujet. S'il reste difficile de déterminer avec précision les effets du menthol sur la température centrale lorsqu'il est utilisé en ingestion ou perfusé, il reste néanmoins peu de doute sur le fait que son application cutanée locale induit une vasoconstriction pouvant entraîner une augmentation de la température.

Le menthol peut également induire des effets sur la consommation d'oxygène. Tajino et coll. (2007) rapportent que l'application du menthol sur des rats au repos induit un doublement de la valeur de VO_2 du début jusqu'à la 13ème minute de l'expérience. Plus récemment, Botonis et coll. (2016) observent une VO_2 supérieure des sujets ayant eu une application cutanée d'un gel mentholé comparé à l'absence de gel. Mais ces résultats ne sont pas confirmés par Gillis et coll. (2010) qui ne trouvent pas de différence de la VO_2 durant un exercice que ce soit dans un environnement neutre ou tropical. La grande disparité des résultats s'explique également par les différentes méthodologies employées, et notamment au fait que le menthol soit utilisé à l'effort ou au repos. Kounalakis et coll. (2010) suggèrent que les effets du menthol sur la consommation d'oxygène pourraient être masqués lorsque la demande en O_2 est élevée, ce qui va dans le sens des études précédemment citées puisque Botonis et coll. (2016) n'ont pas fait réaliser un effort maximal à leurs sujets mais uniquement un exercice pour induire une augmentation de la température jusqu'à 38°C et que Tajino et coll. (2007) ne relèvent une valeur différente de VO_2 que lors de la première partie de l'expérience.

Le menthol est connu comme pouvant être un analgésique. L'effet analgésique du menthol se fait à travers des mécanismes périphériques (Liu et coll. 2014) induits par l'activation des thermorécepteurs et par des mécanismes centraux (Pan et coll. 2012; Ruskin et coll. 2007). Liu et coll. (2014) ont réalisé une étude sur le modèle animal afin de déterminer le rôle de TRMP8 dans l'action analgésique du menthol sur les douleurs aiguës et inflammatoires. Dans un premier temps les auteurs ont confirmé l'action analgésique du menthol qui permet de diminuer efficacement la douleur provoquée par des stimuli chimiques, par la chaleur, ou par l'inflammation. Lorsque TRPM8 est génétiquement bloqué, les auteurs constatent que l'analgésie induite par le menthol dans tous ces modèles est complètement supprimée (alors que

d'autres analgésiques restent efficaces). Si cette étude confirme l'effet analgésique du menthol, elle met surtout en évidence que TRPM8 est le principal médiateur de l'analgésie du menthol lors de douleurs aiguës et inflammatoire.

Il a également été montré que chez l'homme, la demi-vie plasmatique du menthol est de 56,2 minutes en prenant une capsule contenant 100 mg de menthol (Gelal et coll. 1999). Le menthol pourrait donc agir comme stimulant du système nerveux central en inhibant la recapture de la dopamine et / ou en facilitant sa libération. Cette stimulation augmente l'activité chez les rats (Pan et coll. 2012; Umezu et coll. 2011). Le menthol est donc efficace dans le traitement de la fatigue mentale, et pourrait posséder une action similaire aux psychostimulants (Umezu 2010). Pan et coll. (2012) ont mis en évidence que le menthol peut bloquer les canaux Na^+ et Ca^{2+} lorsqu'il est injecté à l'intérieur du péritoine. Plus récemment, Cheang et coll. (2013) confirment ce résultat en indiquant que le menthol induit également un relâchement du diamètre aortique, des artères coronaires et mésentériques chez le rat. De plus, il a été mis en évidence un lien entre le menthol et l'activation de GABA_A (Lau et coll. 2014; Hall et coll. 2004). Les GABA sont considérés comme étant les neurotransmetteurs de l'anxiété pouvant diminuer l'activité nerveuse des neurones sur lesquels ils se fixent. Cela se traduit, par exemple, par le fait que les médicaments utilisés pour diminuer l'anxiété (Valium ou Librium) se fixent sur le même récepteur que GABA : GABA_A . Le récepteur GABA_A est un récepteur canal ionique, c'est-à-dire que lorsque le GABA s'y fixe, il change légèrement de forme et permet ainsi à des ions de traverser son canal central. Celui-ci laisse surtout entrer dans le neurone des ions chlorures chargés négativement (Cl^-) ce qui a pour effet de diminuer l'excitabilité du neurone. Ainsi, la liaison du GABA sur GABA_A entraîne une inhibition de la neurotransmission (Figure 16). Hall et coll. (2004) mettent en évidence que le menthol joue un rôle neuro-actif en tant que modulateur de

canaux inhibiteurs des récepteurs ionotropes (c'est à dire les récepteurs qui permettent d'ouvrir un canal ionique grâce à la liaison d'un neurotransmetteur. Ils sont généralement sélectifs), GABA_A étant l'un de ces récepteurs. Lau et coll. (2014) rapportent également que sur le modèle animal le menthol peut faire varier l'action des récepteurs GABA_A (synaptiques et post-synaptiques). Il semblerait donc que l'action du menthol sur les GABA_A pourrait permettre l'inhibition des canaux Na⁺ et Ca²⁺. Cependant, si ces effets sont encore peu détaillés, ils pourraient fournir une base pour confirmer le modèle de gouverneur central : en se fixant sur les récepteurs GABA_A, le menthol agit en provoquant la limitation du stress et donc pourrait restreindre (ou fausser) l'information du stress thermique transmise au cerveau. GABA et la dopamine ont des effets sédatifs, ce qui permet donc d'élargir le champs d'action de l'utilisation du menthol : outre son effet sur la sensation de froid, le menthol peut être considéré comme ayant un rôle modulateur de l'anxiété par son action avec GABA_A. Si le menthol a une action sur la diminution de l'anxiété entraînant une augmentation de la performance alors l'augmentation de la température du corps induit un stress interne qui impact négativement la performance, stress qui peut être limité par l'action du menthol. Ces arguments peuvent donc confirmer l'hypothèse du régulateur central de Gibson et Noakes avec les effets de menthol dans le cerveau, on peut expliquer plus clairement les mécanismes qui aident l'augmentation des performances sous des effets du menthol.

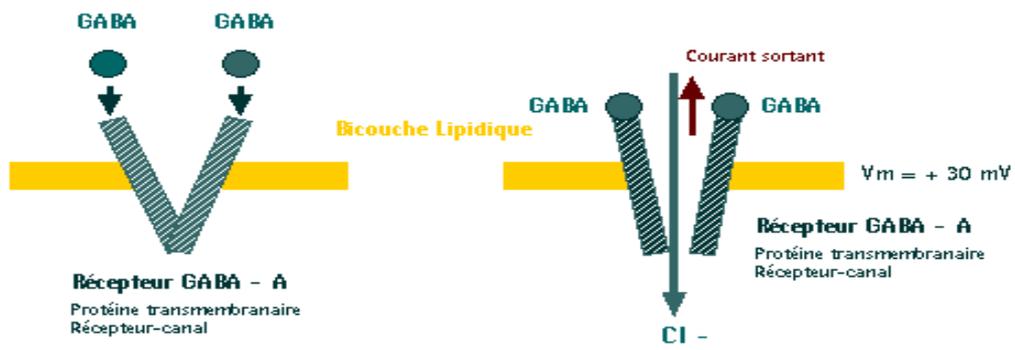


Figure 1.16 : Action de GABA sur les récepteurs GABA_A

CONTRIBUTION PERSONNELLE

I. OBJECTIFS ET HYPOTHESES

1. Généralités

Le climat tropical induit une réduction de la performance aérobie. Si plusieurs facteurs sont avancés afin d'expliquer cet impact, telles que l'anticipation (St Clair Gibson et coll. 2004) ou l'hyperthermie (Gonzalez-Alonso et coll. 1999), d'autres problématiques de recherches sous-jacentes se posent : c'est le cas notamment de l'axe sur la limitation de cet impact.

Durant une épreuve aérobie en climat tropical, l'une des techniques de refroidissement efficace est le refroidissement interne. Il a été mis en évidence que l'ingestion d'une boisson froide permet de limiter la diminution de la performance (Riera et coll. 2014). Les auteurs relèvent qu'au plus la boisson est froide, au plus l'effet est important. Cette technique supporte l'idée que l'ingestion d'une boisson froide entraîne une diminution de la T_{cen} permettant ainsi de limiter la baisse de performances (Yeo et coll. 2012; Siegel et coll. 2011; Ihsan et coll. 2010). Cette technique interne semble efficace durant les épreuves aérobies (i.e., en per-cooling ; Riera et coll 2016, 2014; Trong et coll. 2015), mais également utilisée sous forme de pré-cooling (Naito et coll. 2017; Siegel & Laursen 2012; Siegel et coll. 2011). Se pose alors la question du cumul pré-cooling/per-cooling. Si le cumul de techniques de refroidissement externe-interne semblent être plus efficace pour limiter les effets de la contrainte environnementale (Ross et coll. 2011; Quod et coll. 2008), actuellement aucun effet cumulatif n'a été mis en évidence avec l'utilisation de deux techniques de refroidissement interne (Riera et

coll. 2016; Shulze et coll. 2015).

Outre l'ingestion de boissons froides à l'épreuve, d'autres techniques sont utilisées, notamment lorsque les athlètes sont amenés à réaliser plusieurs performances rapprochées. Pour cela l'une des méthodes efficaces est l'immersion en eau froide, permettant de diminuer efficacement l'hyperthermie induite par l'effort (McDermott et coll. 2009). L'utilisation des immersions en eaux froides améliore la récupération suite à une seule épreuve (Roberts et coll. 2015, 2014; Versey et coll. 2013) et entraîne une diminution plus importante de la température rectale par rapport à une absence d'immersion (Clements et coll. 2002). Bien que l'immersion ait un effet positif sur la récupération (Versey et coll. 2013), ses effets entre deux efforts successifs sont peu étudiés. Récemment, Christensen et Bangsbo (2016) ont montré que l'immersion ne conduit pas à une meilleure performance ultérieure lors d'un tournoi de poursuite sur piste, bien que cette technique soit plus efficace qu'une récupération active (Joanna Vaile et coll. 2008). Cependant certaines études montrent qu'une récupération en immersion baisse considérablement la température rectale et permet le maintien de l'intensité lors d'un exercice de forte intensité (Peiffer et coll. 2010; Vaile et coll. 2008) par une réduction de la contrainte thermique.

A ces techniques de refroidissement peut s'ajouter un effet cumulatif lorsque le menthol est ingéré : à température identique l'ingestion d'une boisson mentholée permet une meilleure performance qu'une boisson sans menthol (Riera et coll. 2014). Cependant si l'effet de ce per-cooling est confirmé sur le terrain (Trong et coll. 2015), aucune étude n'a apporté d'effet cumulatif avec un pré-cooling interne, principalement

étudié sur 30 min avec du menthol utilisé en pré et per-cooling (Riera et coll. 2016). Dans des conditions neutres, Eccles et coll. (1990) ont montré que le menthol stimule les récepteurs au froid et, appliqué sur la peau et les muqueuses, exerce une sensation de refroidissement. Son utilisation dans un climat chaud (humide ou non) pourrait donc contribuer à une moindre diminution de la performance, comme cela est suggéré par Mündel & Jones (2010) en agissant sur les processus d'anticipation. En application cutanée les résultats semblent démontrer un effet délétère sur la thermorégulation par l'effet vasoconstricteur (Botonis et coll. 2016) avec une absence d'amélioration de la performance aérobie. Cette absence d'effet sur la performance est également notée lors de l'utilisation d'une solution de menthol sur les vêtements (Barwood et coll. 2014; 2012). Cependant le menthol permet une sensation thermique plus faible et un meilleur confort thermique (Barwood et coll. 2014, 2012). A ce jour, aucune étude n'a jamais utilisé le menthol en immersion dans l'environnement tropical.

2. Objectifs et hypothèses de travail

L'objet principal de ce travail de recherche est d'étudier comment limiter, par le refroidissement corporel, la vitesse de décroissance de la performance lors d'un effort en climat tropical concernant des efforts de 20 minutes (seuil anaérobie) à 1 heure (aérobie).

Pour ce faire, nous avons axé nos recherches sur trois points principaux :

Tout d'abord nous avons travaillé sur l'efficacité de protocoles de refroidissement. Ces techniques seront développées à plusieurs moments de la performance : avant, pendant et entre deux épreuves successives (étude 1, 2 et 3).

Le second point de ce travail est de déterminer si les combinaisons de refroidissements peuvent se cumuler, et notamment lors de stratégies prenant en compte le pré-cooling et le per-cooling (étude 2) ou lors d'utilisations interne et - ou externe (étude 3).

Enfin, le dernier axe de cette thèse est de développer les protocoles de cooling avec l'utilisation du menthol afin de déterminer si son utilisation peut permettre une optimisation des protocoles de cooling (étude 1, 2 et 3).

Cette thèse est donc orientée sur la performance en cyclisme, avec pour objet l'optimisation de méthodes de cooling pouvant être directement applicables sur le terrain lorsque les contraintes liées à l'environnement sont présentes.

Pour répondre à ces objectifs les hypothèses suivantes sont posées :

(1) Le refroidissement des cyclistes, qu'il soit interne ou externe, permettrait de limiter l'impact de la contrainte thermique sur la performance aérobie par la limitation de l'augmentation du taux de stockage de chaleur

(2) Le cumul de méthodes de cooling aurait un effet ergogène comparé à une seule méthode grâce à une réduction plus importante de la contrainte thermique.

(3) L'utilisation du menthol aurait un effet ergogène : son action sur les thermorécepteurs ainsi que par son effet analgésique permettrait d'améliorer la performance.

(4) L'efficacité du refroidissement est dépendante de la durée et de(s) la technique(s) de cooling utilisée(s).

Dans la 1ère étude de ce travail nous nous intéressons à l'optimisation d'une technique de récupération entre deux épreuves rapprochées. Cette étude, portant sur une récupération par immersion va permettre d'investiguer les effets du menthol ajouté dans l'eau afin de déterminer si à une température d'immersion identique, l'action du menthol sur les thermorécepteurs TRPM8 peut modifier la perception thermique et ainsi impacter la seconde performance, post immersion. Nous supposons qu'entre deux épreuves maximales de 20 min, l'activation des thermorécepteurs par le menthol permettrait des ressentis thermiques (confort - sensations) définis comme « plus favorables » qui pourraient permettre une meilleure performance par rapport à une même température d'immersion sans menthol.

La seconde étude investigate la méthode et la durée optimale d'un pré-cooling interne, cumulé à un per-cooling interne. L'effet cumulatif en pré-cooling sur 1h du menthol et de la glace pilée, combiné à un per-cooling interne permettrait un effet ergogène comparé à un pré-cooling plus court (30 minutes) ne permettant pas au menthol et/ou à la glace pilée d'induire des adaptations suffisantes à l'augmentation de la performance

et à une condition témoin, sans pré-cooling mais avec un per-cooling identique aux deux autres conditions.

Enfin, la dernière étude s'intéresse à l'effet cumulatif d'une méthode interne (boisson froide mentholée) avec une méthode externe (gilet froid / gilet froid mentholé) en pré-cooling durant les 30 min d'échauffement. Une épreuve de 20 min en CLM sur vélodrome suit cet échauffement. Nous supposons que l'effet cumulatif du menthol et du gilet, ajoutés à l'ingestion d'une boisson froide mentholée, permettra :

- (1) D'améliorer la sensation thermique par l'effet du menthol et de son action sur les thermorécepteurs TRPM8,
- (2) D'améliorer la conduction par le port du gilet (corps - vêtement) permettant une diminution significative de la température avant le départ de l'épreuve par rapport à la condition sans gilet froid;
- (3) Une amélioration de la performance comparée à la seule ingestion de boisson froide.

3 . L i s t e d e s p u b l i c a t i o n s

Les recherches liées à cette thèse ont permis l'écriture de 3 papiers (publications non effectives à ce jour). Un papier est publié (APNM), un second est soumis tandis que le 3^{ème} est en cours de finition.

Etude 1: Immersion with menthol improves recovery between two cycling exercises in

hot and humid environment. Rinaldi K, Tran Trong T, Riera F, Appel K, Hue O.
Appl Physiol Nutr Metab. 2018 Mar 13.

doi: 10.1139/apnm-2017-0525 // PMID: 29533726

Etude 2: Rinaldi K, Trong TT, Uhrhan M, Hue O. «Precooling with cold water/menthol enhances cycling performance in tropical climate» Soumis dans European Journal of Applied Physiology (D-18-00949)

Etude 3: Rinaldi K, Collado A, Hermand E, Hue O. « Time trial performance is not improved by the combination of cumulation of two cooling methods compared to an internal pre-cooling only ». **En cours de rédaction.**

4. Méthodologie générale

SUJETS

Durant ce travail de recherche tous les sujets inclus dans les études sont des cyclistes entraînés et acclimatés, vivant et s'entraînant en Guadeloupe depuis plus de deux ans (Saat et coll. 2005), et licenciés dans des équipes locales de la fédération française de cyclisme ou de triathlon. Les coureurs participent régulièrement à des épreuves de niveau élite comme les championnats de la Caraïbes, les championnats Panaméricain, le Tour de Guadeloupe (2.2) ou des Ironmans. En amont de chaque étude, les sujets ont rempli un questionnaire médical et ont préalablement donné leur consentement éclairé en étant informé du déroulement de l'étude. Les trois études sont conformes à la déclaration d'Helsinki.

Les tests de PMA sont réalisées au sein du CREPS des Antilles et au CHU, sous contrôle d'un médecin, avec un protocole incrémental de 50W toutes les 2' à partir de 100W.

Tableau 2.1 : Données générales des sujets (moyennes et écart-types)

	Nombre	Âge (ans \pm SD)	Masse corporelle (kgs \pm SD)	Entraînement hebdomadaire (heures \pm SD)	PMA (Watts \pm SD)
Etude 1	8	24 \pm 4	65,3 \pm 5.2	15 \pm 2	321 \pm 41
Etude 2	7	23 \pm 5	70,3 \pm 5.7	15 \pm 2	391 \pm 30
Etude 3	7	29 \pm 8	67,1 \pm 8	17 \pm 2	375 \pm 65

PROTOCOLE

Lors des trois études, les sessions d'expérimentations sont séparées de 48 h à 1 semaine. Chaque étude respecte un ordre de passage randomisé pour chacune des conditions expérimentales. Les athlètes ont pour consignes de ne pas s'entraîner 24h avant les sessions et d'effectuer une sortie légère de 60 min 48 h avant. Les sessions se déroulent au même moment de la journée pour contrôler les variations circadiennes :

Etude 1: entre 11h et 14h

Etude 2: entre 14h et 15h

Etude 3: entre 11h et 15h

Une seule baignoire est utilisée pour l'étude 1. Afin de ne pas contaminer les sessions « neutre » par le menthol, un délai de 24 h devait être réalisé entre les conditions, tout en préservant la randomisation, dans le but de vider et de nettoyer du menthol la baignoire.

Pour les trois études, le jour des sessions expérimentales les cyclistes devaient consommer un petit déjeuner standard et ingérer 500 ml d'eau à température ambiante.

Pour chaque étude les sujets ont réalisé les épreuves sur leurs vélos personnels et ont utilisé les mêmes matériels et équipements à chacune des sessions.

Chacune des études était précédées par une épreuve d'habituation et les sessions expérimentales sont randomisées.

Les quantités et températures d'ingestions d'eau froide et de glace pilées s'appuient

sur les études réalisées dans la thématique du climat tropical et performance en cyclisme (Riera et coll. 2014, 2016 ; Trong et coll. 2015).

CONDITIONS ENVIRONNEMENTALES

Etude 1

Les sessions expérimentales se sont déroulées en extérieur dans un environnement tropical, enregistrées à l'aide d'un capteur WBGT (HD 32.2, Delta Ohm, Caselle di Selvazzano, Italy). La valeur moyenne du WBGT de cette étude est de $29,1^{\circ}\text{C} \pm 1,5^{\circ}\text{C}$ et $62\% \pm 4\%$ d'humidité relative.

Etude 2

Cette étude s'est déroulée en laboratoire, dans une pièce close où il était possible de maintenir la température et l'humidité très stable: T: $30,1^{\circ}\text{C} \pm 0,5^{\circ}\text{C}$ et HR: $79\% \pm 0,3\%$. Les sujets, quelles que soit la condition, ont passé l'heure précédent l'effort dans cet environnement.

Etude 3

Le déroulement de l'étude 3 a eu lieu au vélodrome, dans un environnement écologique. La valeur moyenne du WBGT de cette 3^{ème} étude est de $28,6^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ et $67\% \pm 5\%$ d'HR.

Pour résumer, les conditions environnementales étaient de :

Tableau 2.2 : Conditions environnementales des études 1, 2 et 3.

	Lieu	Température (°C)	Humidité (%)	WBGT (°C)
Etude 1	Extérieur	32,2 ± 1,6	62 ± 4	29,1 ± 1.5
Etude 2	Laboratoire	30,1 ± 0.5	79 ± 0.3	28,2 ± 0,5
Etude 3	Extérieur	31 ± 0,9	67 ± 5	28,6 ± 2

PROTOCOLES EXPERIMENTAUX

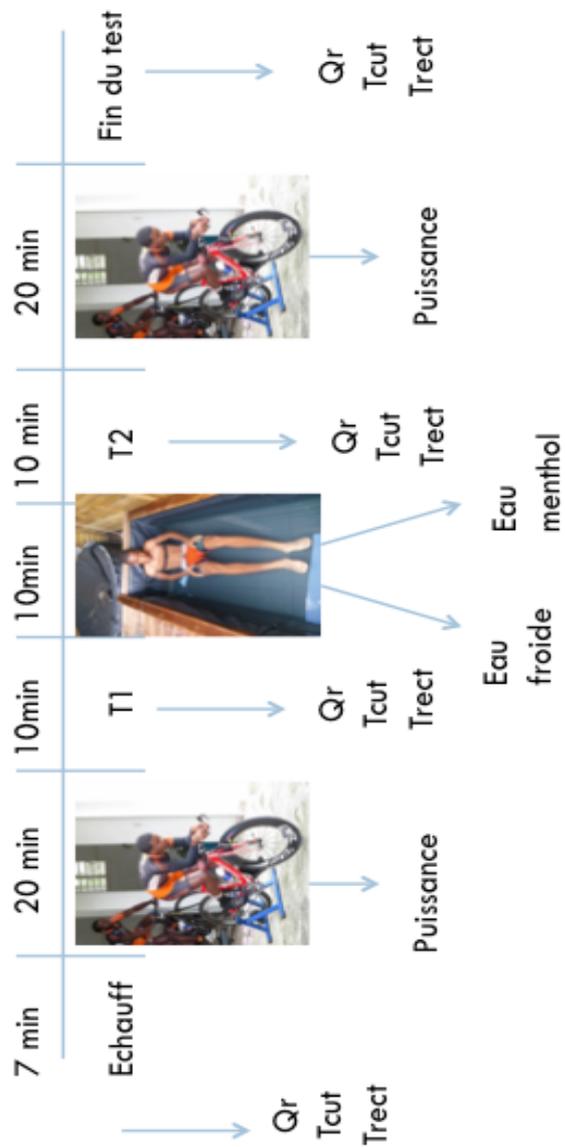
Etude 1

Dans cette 1ère étude les athlètes réalisent deux épreuves de 20 minutes sur home trainer avec pour consigne de réaliser la meilleure performance possible. Les deux épreuves sont entrecoupées par 30 min de récupération pendant laquelle les athlètes sont immergés allongés jusqu'aux épaules dans une eau froide ($10^{\circ}\text{C} \pm 0,2^{\circ}\text{C}$) durant 10 min avec ou sans menthol (entre la 10^{ème} et 20^{ème} minutes de récupération). Les sujets ont répondu à des questionnaires de confort (CT), de sensation thermique (ST) et du niveau de difficulté perçu (NDP). Les températures cutanées (Tcut) et rectales (Trec) ainsi que la performance (Watts) étaient également relevées après chaque épreuve.

Les athlètes arrivent 30 min avant le début de l'épreuve et sont équipés (sondes rectales, tenues cyclistes) puis les vélos sont installés sur des homes trainer Tacx (Satori T1856, Tacx BV, Wassenaarn, the Netherlands). Une fois les consignes données les cyclistes réalisent un échauffement libre de 7 min. Suite à cet échauffement le 1er CLM de 20 min (CLM 1) est lancé. Les cyclistes n'ont pas accès aux données afin de ne pas leur permettre de gérer leurs efforts. Seules les indications orales de temps, à 5 min puis à 1min de la fin de l'épreuve sont données, cela pour permettre d'analyser la stratégie d'efforts.

Suite au CLM 1, les questionnaires (Qr) de NDP, ST et CT sont posés durant une transition de 10 min (T1), permettant également de mesurer la température cutanée et de relever la Trec. Ensuite les athlètes s'immergent dans la baignoire d'eau froide à 10°C durant 10 min, avec ou sans menthol en fonction de la condition. A la sortie de l'immersion, une seconde transition (T2) de 10 min, afin de relever Tcut et Trec.

Un second CLM (CLM 2) de 20 min avec la même consigne est enfin réalisé, à la suite duquel un dernier relevé de températures (Trec et Tcut) et des Qr est réalisé et avec les mêmes consignes que le CLM 1.



Shéma 2.1 : Protocole étude 1

Etude 2

Lors de cette seconde étude, en laboratoire, les cyclistes réalisent un contre la montre d'une heure en climat tropical. Avant l'exercice les cyclistes sont amenés à réaliser un pré-cooling au repos dans trois conditions où ils boivent en fonction des sessions :

- (1) une boisson neutre à 23°C durant 1h (neutre);
- (2) de la glace pilée mentholée (-1°C) durant 30 min (pré-30)
- (3) de la glace pilée mentholée (-1°C) durant 1h (pré-60).

Durant les pré-cooling d'une heure, les cyclistes ingèrent 8 g.kg⁻¹ d'eau à température ambiante ou de glace pilée (pré-60) toute les 15 min (T0, T15, T30, T45 et T60) tandis que pour pré-30 les cyclistes ingèrent 8 g.kg⁻¹ de glace pilée à T30, T45 et T60.

Pour chacune des conditions les cyclistes ingèrent durant à l'effort de l'eau froide mentholée (3°C). La consigne du CLM est de réaliser la meilleure performance possible. Durant l'effort les cyclistes sont hydratés toute les 15 min (à T0, T15, T30 et T45) à raison de 8 g.kg⁻¹.

Que ce soit en pré-cooling ou à l'effort, nous mesurons toutes les 5 min la température rectale et les sujets répondent à des questionnaires de confort (CT) et de sensation de chaleur (ST) et la fréquence cardiaque est prise en continue. A l'effort la distance est également relevée toute les 5 min ainsi que le NDP afin d'analyser si une stratégie de gestion d'effort est mise en place par les sujets.

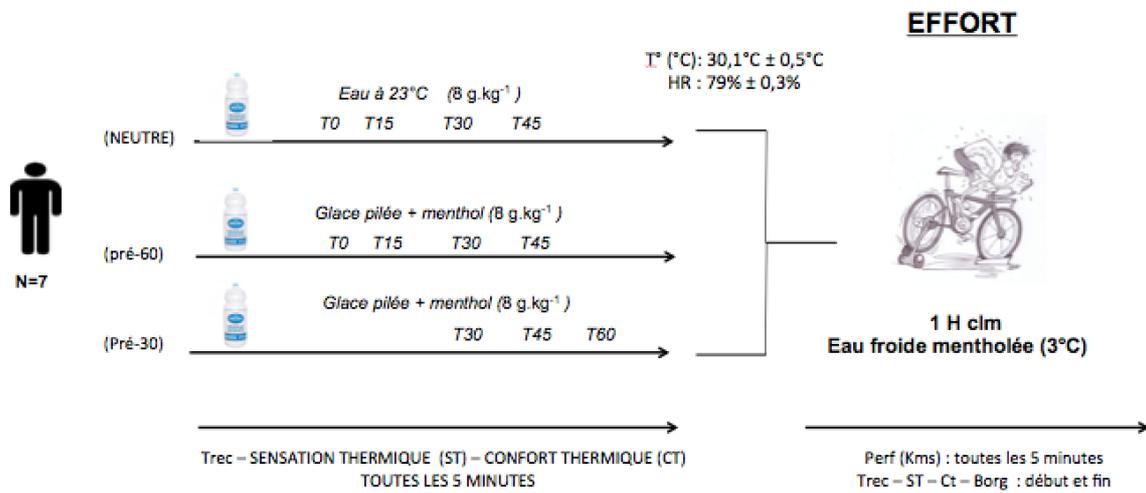


Schéma 2.2 : Protocole étude 2

Design étude 3

Les sujets ont réalisé une performance de contre la montre individuel de 20 min sur le vélodrome. Chaque CLM est précédé d'un échauffement standardisé de 30 min dans l'une des conditions ci-après randomisées :

Ingestion d'eau froide mentholée + port d'un gilet froid (VEF)

Ingestion d'eau froide mentholée + port d'un gilet froid mentholé (VMF)

Ingestion d'eau froide mentholée sans port de gilet (SV)

L'échauffement consiste à une augmentation progressive de l'intensité, pour se rapprocher des protocoles utilisés par les athlètes sur les épreuves de CLM en compétition. Les intensités sont définies selon l'échelle ESIE de Grappe et coll. (1999) : Estimation Subjective de l'intensité de l'exercice (cf annexe pour tableau d'intensité).

10 min i2

10 min i3

3 min i4

2 min i5

5 min i2

Une transition standardisée de 5 min est réalisée entre fin échauffement et début CLM afin de permettre aux athlètes de vêtir la tenue complète, sortir le vélo du home-trainer et se rendre sur la ligne de départ. Les sujets réalisent l'intégralité de la session sur un vélo traditionnel avec la standardisation du matériel (pas de prolongateur, casque classique, vêtements de course lors du CLM). Lors du CLM les athlètes n'ont pas d'information pouvant leur permettre de gérer l'allure et ne sont informés que des 5

dernières minutes ainsi que de la dernière.

Durant le pré-cooling, les cyclistes ingèrent 8 g.kg⁻¹ d'eau froide (3°C) à T0, T15 et T30. Le gilet était maintenu refroidi toute la durée de l'échauffement par son changement toutes les 10 min (T0, T10 et T20) et bien ajusté au corps afin d'optimiser la conduction à l'aide de ceintures.

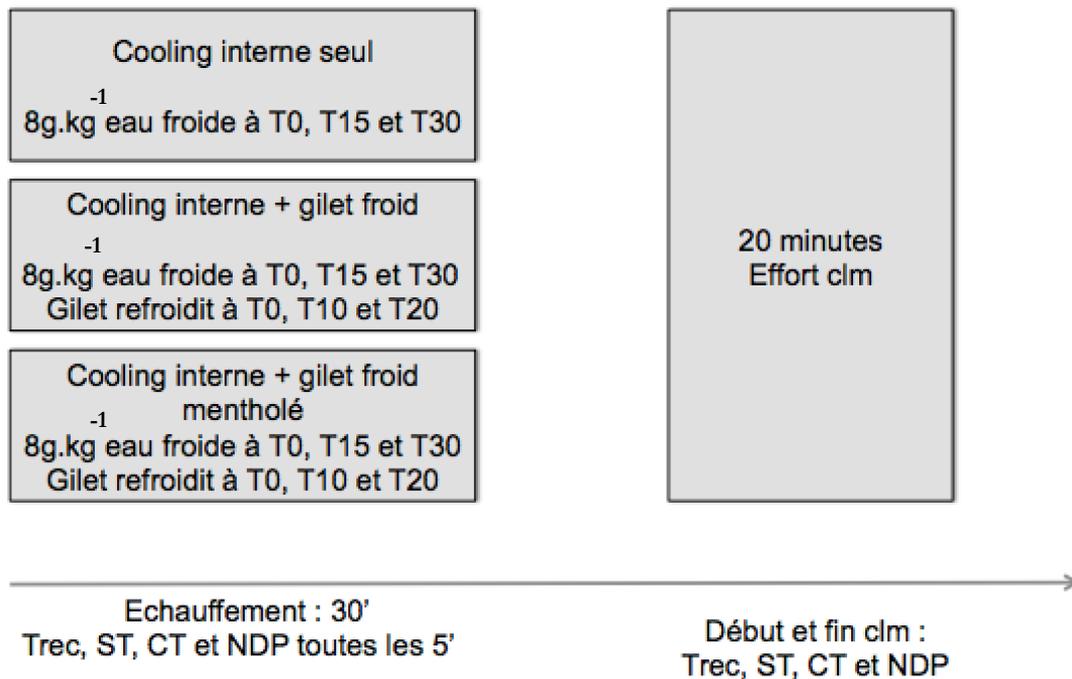


Schéma 2.3 : Protocole étude 3

LES MESURES

Mesures psychologiques

Les sujets ont été interrogés à différents temps sur leur sensation (ST) et leur confort thermique (CT) à partir de l'échelle de Hodder et Parsons (2007), après chaque effort (étude 1) ou toutes les 5 min (étude 2 et 3). Le NDP a été réalisé à partir de l'échelle de Stamford (1974) spécifique aux ergomètres dans l'étude 1, avec « pas difficile » pour la note de 2 et « très très dur » pour la note de 10. L'échelle de Borg (1982) modifiée, de 6 à 20 a été utilisée pour l'étude 2 et 3.

Températures

La température rectale a été mesurée à l'aide d'une sonde rectale reliée à un thermomètre numérique (YSI409 AC, Yellow Springs Instruments, Yellow Springs, OH, USA) insérée à 10 cm dans le sphincter anal (étude 1 et 2). La température cutanée a été mesurée à l'aide d'une sonde cutanée reliée à un thermomètre numérique (YSI427, Yellow Springs Instruments, Yellow Springs OH, USA) dans l'étude 2.

Les mesures de températures de l'eau (immersions et boissons) ont été réalisées à l'aide d'un thermomètre numérique (YSI 409B, Yellow Springs Instruments, OH, USA).

Fréquence Cardiaque

La fréquence cardiaque a été mesurée à partir de Suunto Ambit (Suunto Memory Belt, Suunto, Vantaa, Finland) en continu toute les 5 secondes, sur chacune des études. Pour des raisons de transmission du signal la FC durant les immersions n'a pu être relevée.

Performances

Etude 1

Dans cette étude la performance a été évaluée en puissance (Watts) à l'aide d'un home-trainer TACX (Tacx satori T1856, Tacx BV, Wassenaarn, the Netherlands) pouvant enregistrer en continu la puissance.

Etude 2

La performance sur l'exercice d'une heure a été relevée toute les 5 min en fonction de la distance parcourue par les athlètes, puis interprétée en performance par blocs et sur la moyenne de l'épreuve.

Etude 3:

La performance de cette étude est mesurée en fonction de la distance totale sur 20 min ainsi que par bloc de 2 min. Le vélodrome mesure 333 m et est gradué tous les 05 mètres, ce qui permet d'avoir un relevé de performance très précis.

Menthol

Les sujets étaient immergés dans une eau à 10°C durant 10 min avec 1% de menthol dilué dans la baignoire (étude 1) tandis que la concentration utilisée lors de l'utilisation des boissons mentholées (étude 2 et 3) est de 0,025% (% vol: $86 \pm 1\%$; dosage: 0,5 g.L⁻¹ produit par Robertet, Grasse, France) par mélange de 0,03 ml d'une solution d'arôme naturel de menthol à 0,01% diluée dans 100 ml d'eau pure, s'appuyant sur les études de Riera et coll. 2014, 2016 et Trong et coll. 2015 mettant en évidence un effet bénéfique de cette concentration du menthol utilisé en climat tropical lors d'efforts compris entre

20min et 1h30.

ANALYSES STATISTIQUES

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

Pour analyser les données nous avons utilisé une analyse de variance (ANOVA) à deux ou trois voies à mesures répétées afin de déterminer l'interaction du climat avec les paramètres mesurés. Lorsqu'un effet significatif a été confirmé, des tests de comparaisons par paires de Tuckey ont été réalisés. Pour toutes les analyses, la signification a été fixée à $P < 0,05$. Les données sont présentées sous forme de moyenne \pm écart à la moyenne.

5. Résultats

ETUDE 1

Performance

La performance globale n'est pas statistiquement affectée par les conditions : les cyclistes ont réalisé en condition menthol ($240 \text{ W} \pm 43 \text{ W}$) la même performance qu'en condition sans menthol ($258 \text{ W} \pm 52 \text{ W}$). Lorsque nous avons testé l'effet moment

(avant immersion vs. après indépendamment de la condition), nous ne notons pas non plus de différence entre le 1er et le second CLM (TT1: 240 W \pm 57 W vs TT2 : 258 W \pm 37 W). Cependant la performance globale est affectée par le temps ($P < 0,05$): la puissance évolue différemment indépendamment de la condition. De plus, la puissance est significativement affectée par l'effet croisé condition x moment ($P < 0,038$): la performance évolue différemment après l'immersion en fonction de la condition : la puissance n'est pas significativement affectée par l'immersion entre le CLM1 et 2 en condition sans menthol. En revanche, en condition menthol, la performance augmente significativement entre les deux CLM $P < 0,05$ (+15,6%).

Températures

La température rectale n'est pas affectée par l'effet moment, mais augmente significativement avec le temps ($P < 0,001$). Nous notons également un effet croisé significatif time x moment ($P < 0,05$). L'augmentation de Trec à l'effort est plus prononcée lors du CLM1 que lors du CLM2 (respectivement $+1,81^{\circ}\text{C} \pm 0,7^{\circ}\text{C}$ et $0,13^{\circ}\text{C} \pm 0,8^{\circ}\text{C}$).

Cependant, Trec a été significativement affectée par la condition ($P < 0,024$): dans la condition menthol, Trec est significativement plus élevée ($38,8^{\circ}\text{C} \pm 0,4^{\circ}\text{C}$) que dans la condition non menthol ($38,1^{\circ}\text{C} \pm 0,5^{\circ}\text{C}$). En outre, l'effet condition x moment est significativement affecté par l'immersion ($P < 0,05$) (figure 5): en condition menthol, Trec diminue de seulement $0,6^{\circ}\text{C}$ et de près de deux fois plus ($-1,17^{\circ}\text{C}$) sans le menthol.

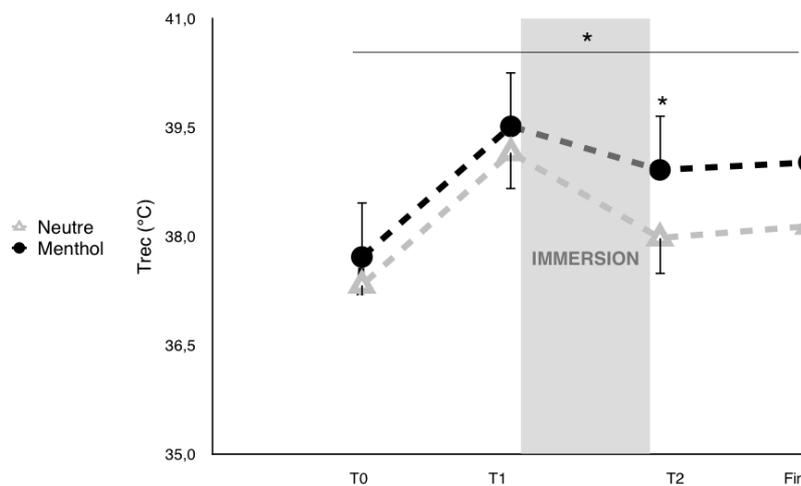


Figure 2.1 : Evolution de la température rectale au cours à T0, T1, T2 et à la fin de l'épreuve. T_{rec} est significativement affectée avec le temps ($P < 0,05$). La température rectale est significativement plus élevée en condition menthol après l'immersion comparativement à la condition sans menthol.

* Différence significative ($P < 0,05$)

La température cutanée moyenne n'est pas affectée par la condition. Cependant, T_{cut} est significativement impactée par l'effet moment ($P < 0,001$): après immersion, indépendamment de la condition, T_{cut} est significativement plus basse qu'avant l'immersion (respectivement $31,8^{\circ}\text{C} \pm 3,7^{\circ}\text{C}$ contre $35,7^{\circ}\text{C} \pm 1,3^{\circ}\text{C}$). T_{cut} est également affecté par le temps ($P < 0,001$) avec une augmentation significative durant les CLM et une diminution suite à l'immersion. Lorsqu'il est exprimé en fonction du temps x moment, T_{cut} est significativement affectée par l'immersion ($P < 0,001$): l'augmentation de T_{cut} étant significativement plus importante dans le CLM 2 comparé au CLM1.

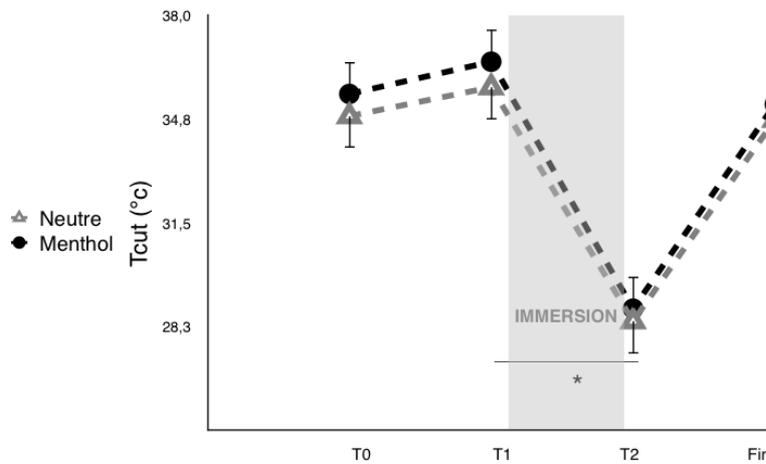


Figure 2.2 : Evolution de la température cutanée à T0, T1, T2 et à la fin de l'épreuve.

L'immersion permet de diminuer significativement Tcut pour les deux conditions, comparativement à avant l'immersion.

* Différence significative ($P < 0,05$)

Sensations

Cette étude n'a pas mis en évidence de différence pour le confort thermique entre les deux conditions.

En condition menthol, le NDP est significativement plus haut lors du CLM 1 ($6,57 \pm 0,9$) comparé au CLM 2 ($5,14 \pm 1,25$) tandis qu'il n'y a pas de différence entre les deux CLM en condition sans menthol.

De plus, nous mettons en évidence un effet temps de la sensation thermique : la sensation thermique moyenne diminue significativement ($P < 0,004$) entre les épreuves, indépendamment de la condition. ST a également un effet condition x temps significatif ($P < 0,004$): ST diminue après le CLM 2 dans les deux conditions par

rapport à la fin de CLM 1 mais cette diminution est significativement ($P < 0,004$) plus prononcée en condition menthol ($5,9 \pm 1$ à $3,6 \pm 0,5$) que la condition non menthol ($5,6 \pm 0,9$ à $4,4 \pm 1,2$).

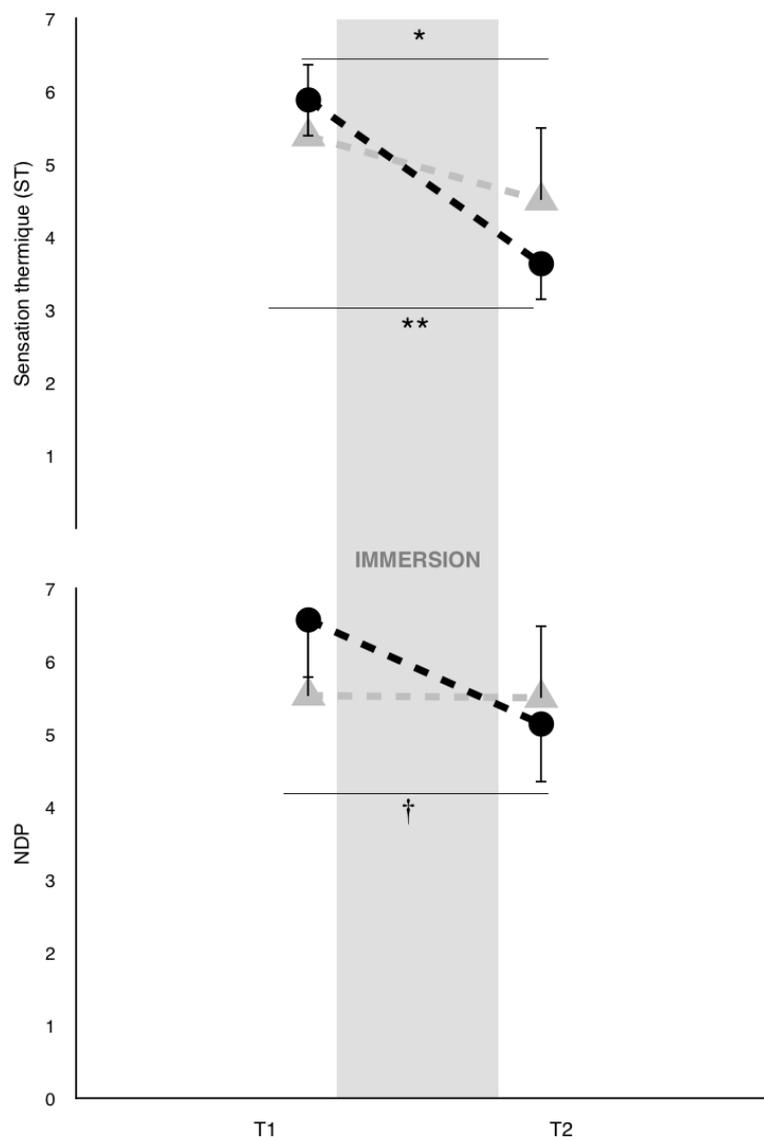


Figure 2.3: Evolution du niveau de difficulté perçue et de la sensation thermique entre T1 et T2. ST et NDP sont significativement plus bas après l'immersion comparativement à avant.

† Différence significative ($P < 0,05$) du NDP entre T1 et T2 en condition menthol

* Différence significative ($P < 0,05$) entre T1 et T2 en condition sans menthol

** Différence significative ($P < 0,05$) entre T1 et T2 en condition menthol

DISCUSSION ETUDE 1

McDermott et coll. (2009) mettent en évidence que l'immersion en eau froide est la méthode la plus efficace pour lutter contre l'hyperthermie et que Trec décroît d'autant plus rapidement que l'eau utilisée est plus froide (Proulx et coll. 2003). Nous mettons en évidence à travers ce travail (étude 1) que l'immersion (avec ou sans menthol) influence aussi cette décroissance de la température rectale. Cependant à température d'eau et durée d'immersion égale, une immersion avec du menthol permet une moindre diminution de la température rectale qu'une immersion sans menthol. En condition sans menthol, la diminution de la température est accompagnée par la même performance lors du CLM 1 et du CLM 2 tandis qu'en condition mentholée la performance est améliorée lors du CLM 2 par rapport au CLM 1.

Durant le CLM 2 l'augmentation de Trec était significativement moins prononcée que pendant le CLM 1 pour les deux conditions. Pourtant après l'immersion Trec n'est pas revenue à son niveau basal (température avant le CLM 1), ce qui peut s'expliquer soit par une température d'immersion pas suffisamment froide soit par une durée d'immersion trop courte (voir Proulx et coll. 2003).

Trec (pic) était plus basse après le deuxième CLM que le premier (pour les deux conditions) certainement due aux effets de l'immersion : ces résultats suggèrent que l'immersion en eau froide (10°C pendant 10 min) induit des réponses physiologiques, telles que la diminution des températures musculaire et rectale, limitant ainsi l'augmentation de Trec durant le second exercice. Il a été démontré qu'une immersion

en eau froide (5min à 14°C) entraîne une diminution de la température musculaire qui persiste jusqu'à la fin d'un second CLM (1kms) (Peiffer et coll. 2010a). On pourrait alors supposer que l'augmentation de la production de chaleur était limitée pendant le second CLM par le refroidissement musculaire induit par l'immersion, ralentissant ainsi l'augmentation de Trec, comme préconisé par Peiffer et coll. (2010b). Cette diminution de la température dans la condition sans menthol peut donc expliquer le maintien de la performance entre le CLM 1 et 2, en limitation l'augmentation du stockage de chaleur, corroborant ainsi les résultats de l'étude de Peiffer et coll (2010b).

La température rectale moyenne était cependant significativement plus élevée dans la condition mentholée par rapport à la condition sans menthol, du fait de la moindre diminution de Trec en condition menthol lors de l'immersion (respectivement -0,6°C et -1,17°C). Cette moindre réduction peut s'expliquer par l'effet vasoconstrictif (Kashima et Hayashi 2013) du menthol induisant une limitation des échanges thermiques par la peau et l'augmentation de la sensation de froid peut induire une baisse des processus thermorégulateurs induit par le SNC.

Outre la diminution de la température musculaire, l'immersion dans l'eau froide pourrait réduire les marqueurs du stress oxydatif après l'exercice (Sutkowoy et coll. 2015, Montgomery et coll. 2008), diminuer l'œdème musculaire (Yanagisawa et coll. 2007) et permettre de réduire l'inflammation (Versey et coll. 2013; White & Wells 2013). Ces différentes adaptations liées à l'immersion peuvent donc expliquer nos résultats de performance lors du CLM 2. Cependant nous n'avons pas les données nécessaires nous permettant de conclure sur les adaptations profondes induites par

l'immersion.

Le maintien de la performance (ou l'amélioration de la performance) entre les deux CLM peut également s'expliquer par le moment où l'immersion a été réalisée : nos immersions ont été réalisées immédiatement après le CLM 1, comme préconisé par Brophy-Williams et coll. (2011). Ces auteurs (Brophy-Williams et coll. 2011) mettent en évidence qu'au plus l'immersion est réalisée rapidement après la fin de l'effort, au plus elle est efficace. Dans notre étude nous utilisons une eau plus froide que dans leur étude (10°C contre 15°C), ce qui peut expliquer que dans notre étude les athlètes maintiennent la performance alors que dans leurs travaux un déclin entre les deux épreuves est présent.

Comme nous venons de le développer, Trec est un paramètre important intervenant dans les mécanismes d'amélioration ou du maintien des performances aérobie en climat tropical. Cependant d'autres réponses comme la température cutanée peuvent également intervenir.

Après l'immersion la température cutanée était significativement plus basse pour les deux conditions. Ce résultat démontre que l'immersion en eau froide a diminué T_{cut} indépendamment de la condition (avec ou sans menthol). Schlader et coll. (2011) ont suggéré que T_{cut} influence le choix de la cadence en cyclisme, c'est-à-dire l'intensité de l'exercice, en diminuant la perception de l'effort réalisé à une intensité d'exercice donnée. Par conséquent, T_{cut} semble faire partie d'un mécanisme de rétroaction au SNC, qui régule l'intensité de l'exercice (Schlader et coll. 2011). Cela expliquerait en

partie la stratégie d'effort dans la condition immersion sans menthol : la diminution de T_{cut} a incité les cyclistes à choisir la même intensité dans le CLM 2 que lors du CLM 1 malgré la fatigue potentielle induite par ce premier effort (pour la condition sans menthol). Mais cet argument n'explique pas l'amélioration de la performance pour la condition mentholée, puisque la diminution de T_{cut} est semblable dans les deux conditions. Il semblerait donc que le menthol joue un rôle dans l'amélioration de la performance en condition mentholée (rôle que nous développons dessous en partie « Le menthol »).

Le maintien de la puissance (condition sans menthol) ou l'augmentation de la puissance (condition menthol) entre CLM 1 et CLM 2 peuvent aussi s'expliquer par l'environnement : le 1^{er} CLM (pour les deux conditions) est impacté par l'environnement tropical, limitant ainsi l'intensité réalisée sur 20min. Notre étude mets donc en évidence que l'immersion avec de l'eau froide permet de contrecarrer cet impact et ainsi permettre une intensité identique en condition sans menthol malgré le fait qu'un premier effort a déjà été réalisé. Cet effet est exacerbé par l'utilisation du menthol dans l'eau puisque les sujets sont en mesure d'améliorer leur puissance lors du second CLM.

ETUDE 2

Conditions environnementales

La température moyenne est similaire pour toutes les sessions (T: $30,1^{\circ}\text{C} \pm 0,5^{\circ}\text{C}$), tout comme le taux d'humidité relative (HR: $79\% \pm 0,3\%$)

Performance

La performance globale est significativement affectée par la condition ($P < 0,03$) : dans la condition pré-60 les cyclistes réalisent une meilleure performance ($39,9 \text{ kms} \pm 4,5 \text{ kms}$ soit + 11%) par rapport aux deux autres conditions ($P < 0,02$), alors qu'il n'y a pas de différence sur la performance entre pré-30 ($35,8 \text{ kms} \pm 5,5\text{kms}$) et la condition neutre ($35,5 \text{ kms} \pm 5\text{kms}$). Lorsque la performance est exprimée par bloc de 5 min, la performance pré-60 ($3,32 \text{ km} \pm 0,4 \text{ km}$) est significativement plus élevée ($P < 0,031$) que la condition pré-30 ($2,99 \text{ km} \pm 0,4 \text{ km}$) et neutre ($2,96 \text{ km} \pm 0,6 \text{ km}$) ($P < 0,001$). La différence de performance entre pré-60 et les deux autres conditions apparaît à partir du 9^{ème} bloc. Nous ne mettons pas en évidence d'effet temps lorsque la performance est exprimée par bloc.

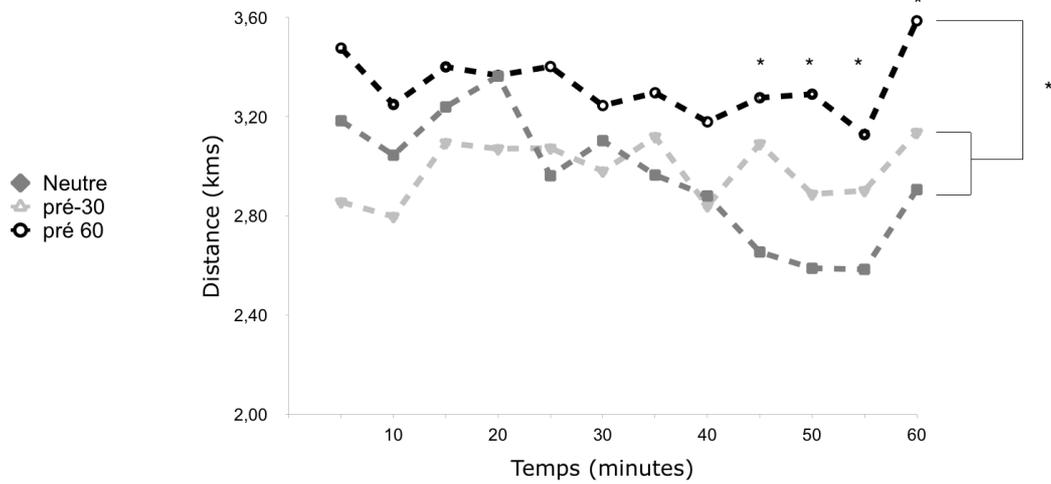


Figure 2.4 : Performance par bloc de 5 min pour les conditions neutre, pré-cooling 30min (pré-30) et pré-cooling 60min (pré-60).
Différence significative ($P < 0,03$) entre pré-60 et les deux autres conditions à partir du bloc 45^{ème} minutes

Température rectale

Au repos, Trec moyenne est significativement affectée par la condition de pré-cooling ($P = 0,035$) puisque pré-60 est significativement plus basse que pré-30 ($P < 0,034$) et qu'en condition neutre ($P < 0,046$) sans qu'il n'y est de différence entre pré-30 et la condition neutre. De plus, la température rectale diminue significativement avec le temps ($P < 0,001$), et cette diminution est significative entre chaque bloc ($P < 0,05$). Cependant nous n'observons pas d'effet croisé temps x condition.

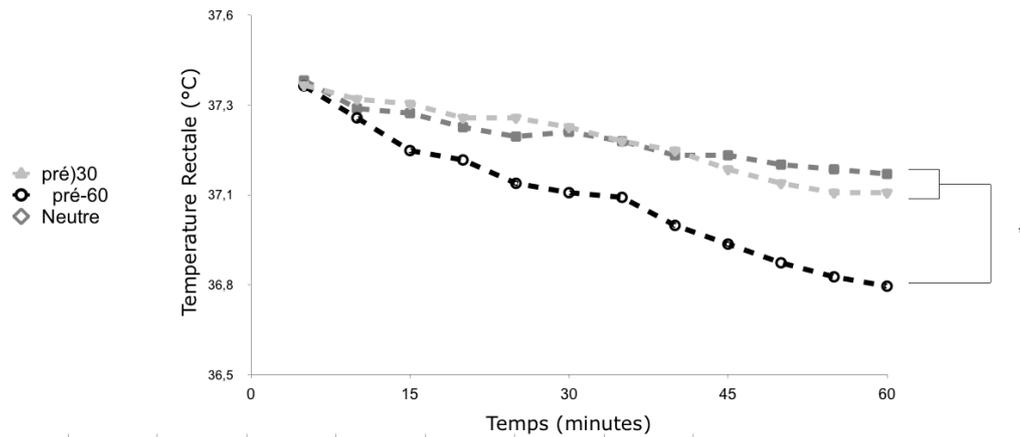


Figure 2.5 : Evolution de la température rectale au repos pour les trois conditions. Trec est significativement plus basse en condition Pré-60 comparativement à Pré-30 et neutre à la fin du pré-cooling.

* Différence significative ($P = 0,035$) entre Pré-60 et les deux autres conditions

A l'exercice Trec augmente au cours du temps ($P < 0,001$). Les post-hoc mettent en évidence que cette augmentation est significative à chaque moment ($P < 0,05$) jusqu'à 45 min d'effort, puis pour les trois derniers blocs, en condition pré-30 et neutre (50, 55 et 60 min) la température n'augmente plus. Nous ne mettons pas en évidence à l'effort d'effet conditions ni d'effet condition x temps.

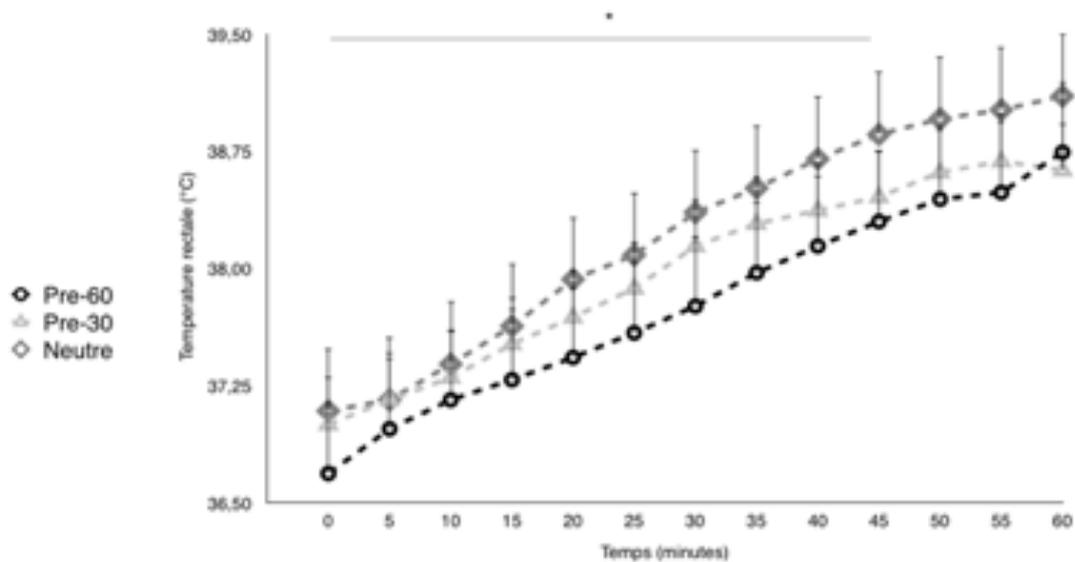


Figure 2.6: Evolution de la température rectale durant les 60 min d'exercice pour les trois conditions. Effet temps pour les 3 conditions : neutre, pré-cooling 30min (pré-30) et pré-cooling 60min (pré-60).

Différence significative ($P < 0,001$) au cours du temps jusqu'à 45 min d'efforts

Sensations, NDP

Au repos, la sensation thermique diminue significativement au cours du temps ($P < 0,05$), sans qu'il apparaisse de différence entre les conditions ni d'effet croisé. Nous ne trouvons pas d'effet pour le confort thermique: il n'est statistiquement pas affecté entre les conditions, par le temps et par l'effet croisé condition x temps.

A l'exercice, NDP, ST et CT augmentent significativement avec le temps ($P < 0,001$) sans que ces paramètres diffèrent par un effet condition ou un effet croisé.

Fréquence Cardiaque

Au repos comme à l'effort nous ne notons pas de différence dans la fréquence cardiaque entre les conditions. Seul un effet temps ($P < 0,001$) est présent à l'effort, sans que FC soit différemment affectée par la condition.

DISCUSSION ETUDE 2

En pré-cooling interne l'effet de l'ingestion de glace pilée/menthol diffère en fonction de la durée d'ingestion : la température rectale est significativement plus basse suite à 1 heure de pré-cooling comparé à 30 min et à l'absence de pré-cooling.

Avec 1 h de pré-cooling glace pilée mentholée (pré-60) la température rectale diminue de $0,3^{\circ}\text{C}$ sur 30min (entre T0 à T30) et de $0,6^{\circ}\text{C}$ sur 1h. Cette diminution sur 30 min est identique à la diminution de Trec en condition pré-30 (entre T30 à T60). Ces données de pré-cooling avec de la glace pilée correspondent à la diminution de $-0,3^{\circ}\text{C}$ de la température rectale relevée dans l'étude de Riera et coll. (2016) utilisant un pré-cooling de 30 min avec $7\text{g}/\text{kg}^{-1}$ d'eau froide à T0, T15 et T30. En climat chaud, Naito et coll. (2017) obtiennent une diminution de $0,4^{\circ}\text{C}$ suite à 30 min de pré-cooling avec de la glace pilée ($1,25\text{g}/\text{kg}$ toute les 5 min). Cependant dans notre étude cette diminution de Trec pour pré-30 n'est pas significativement différente à la condition neutre. Seule Trec suite à 1h de pré-cooling est significativement plus basse par rapport aux deux autres conditions.

Siegel & Laursen (2012) ont montré que l'absorption de glace réduit plus la

température corporelle que l'absorption de la même quantité d'eau froide, ce qui peut confirmer nos résultats entre les conditions pré-60 et neutre (avec une eau à 23°C). Cependant, dans notre étude, nous ne notons pas de différence sur la température rectale entre la condition pré-30 et la condition neutre. Notre étude s'étant déroulée en environnement chaud et humide toute la durée du pré-cooling, nous notons que l'ingestion sur 30 min de glace pilée/menthol ne permet pas d'avoir un impact suffisant sur les contraintes liées à l'environnement afin de diminuer significativement la température corporelle. Yeo et coll. (2012) ont eux constaté dans leur étude une diminution significative de la température gastro-intestinale après ingestion de 8 g.kg⁻¹ sur 30 min, par rapport à l'ingestion d'une boisson à température ambiante (30,9°C) en climat tropical. Nous n'obtenons pas ce résultat dans notre étude entre pré-30 et neutre. Cependant nous avons des réserves concernant la comparaison de la boisson ambiante utilisée dans leur étude (30,9°C) à notre état neutre (eau à 23°C). L'une des pistes de cette absence de différence entre pré-30 et neutre peut être le trop faible delta de température entre la glace pilée et l'eau neutre.

L'absence de diminution de T_{rec} en pré-30 et neutre est accompagnée par l'absence de différence de performance entre ces deux conditions, et une moins bonne performance comparée à pré-60. Ce résultat rejoint les résultats de l'étude de Riera et coll. (2016) avec l'absence d'amélioration de la performance avec un pré-cooling de 30min et ceux de (Naito et coll. 2017) qui notent qu'en condition chaude (T: 35°C HR: 30%) la durée d'exercice est meilleure lors d'un temps de maintien à 60% de la VO_{2max} après le pré-cooling. Cependant, nous notons une efficacité accrue du pré-cooling sur la diminution de T_{rec} dans la condition pré-60 uniquement, accompagnée d'une amélioration

significative de la performance par rapport à pré-30 et neutre. Cela peut s'expliquer par la plus grande quantité de chaleur absorbée (334 kJ.kg^{-1}) par le changement de la glace de l'état solide à l'état liquide (Siegel et coll. 2011 cités par Riera et coll. 2014) et qui pourrait donc influencer la température centrale. Cette diminution de Trec permet de limiter l'augmentation du taux de stockage de chaleur durant l'effort (Trong et coll. 2015 ; Riera et coll. 2014) et permet ainsi une amélioration de la performance par rapport aux deux autres conditions (pré-30 et neutre).

D'autre part nous pouvons appuyer les arguments précédents en étudiant l'évolution de Trec au cours du temps : Trec a considérablement augmenté depuis le début de l'exercice jusqu'à 45 min, sans changement de 45 minutes à la fin de l'exercice, dans les conditions pré-30 et neutre, alors que pour pré-60, Trec a continué à augmenter jusqu'à la fin de l'exercice. C'est également le cas pour la performance qui, à partir du 9^{ème} bloc, n'augmente plus en condition pré-30 et neutre. Cette augmentation plus longue de la température dans le temps de pré-60 que pré-30 et neutre, peut s'expliquer par les valeurs inférieures en pré-60 au début de l'exercice.

Cependant, il semble difficile de suggérer qu'une température critique ait été atteinte pour limiter la performance en pré-30 et neutre, comme le suggèrent Cheung (2007), González-Alonso et coll. (1999) et Nielsen et coll. (1993), car en condition neutre la température atteint $39,1^{\circ}\text{C}$ tandis qu'en condition pré-30 elle atteint $38,6^{\circ}\text{C}$ au moment de la limitation de la performance. Nous suggérerons néanmoins que l'altération de la performance à partir du 9^{ème} bloc est plutôt liée au régulateur central qui, pour éviter une hyperthermie sévère, limite l'effort et donc l'augmentation de la température

centrale (St Clair Gibson et Noakes, 2004).

Nous mettons donc en évidence que la durée d'ingestion influence la diminution de la température rectale. Nos résultats corroborent donc le fait qu'une boisson froide peut diminuer T_{re} avant l'exercice (Riera et coll. 2016; Byrne et coll. 2011) et permettre une amélioration de la performance.

Rappelons tout de même que durant l'effort, les 3 conditions ont permis aux cyclistes d'ingérer de l'eau froide mentholée. L'ingestion d'une boisson froide mentholée sur 1h a déjà démontré des effets bénéfiques sur la performance en climat tropical (Trong et coll. 2015 ; Riera et coll. 2014). Nous mettons donc en évidence que cette méthode est améliorée lorsqu'elle est cumulée avec un pré-cooling d'une heure avec de la glace pilée mentholée.

Deux autres mécanismes peuvent également expliquer la meilleure performance avec une boisson froide mentholée :

- (1) L'action de la glace pilée sur les récepteurs thermiques, présents dans le tractus gastro-intestinal (Villanova et coll. 1997 cités par Tran 2016), peut fournir une rétroaction afférente au cerveau à partir de l'intestin (Stevens et coll. 2013) incitant le SNC à réguler la performance à la hausse, comparé à l'absence de ce signal.
- (2) L'effet du menthol sur les récepteurs du froid entraîne un signal qui « dupe » le SNC entraînant un recrutement des unités motrices différent qu'avec un signal thermique plus élevé (absence de menthol), mécanisme que nous développons dessous en partie

« Le menthol ».

ETUDE 3

Performances

La performance totale n'est pas significativement différente entre les 3 conditions : VEF :12830m \pm 771m VMF : 13068m \pm 289m et SV :13103m \pm 600m. Seul un effet temps ($P < 0,001$) est présent, sans qu'il n'y ait de différences entre les conditions. Le résultat est similaire lorsque les distances sont exprimées par bloc de 2 minutes : il y a un effet temps ($P < 0,03$) sans que cela ne soit différent entre les trois conditions.

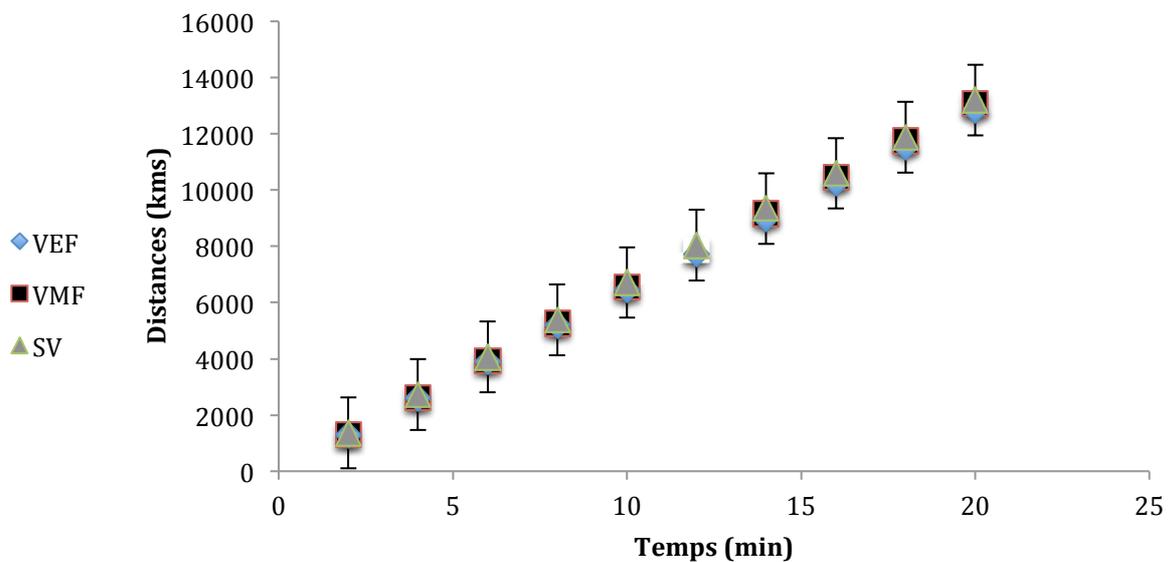


Figure 2.7 : Evolution de la performance globale au cours du temps. Effet temps ($P < 0,001$) sans différence entre les 3 conditions : neutre, pré-cooling 30min (pré-30) et pré-cooling 60min (pré-60)

Sensations, NDP

Durant l'échauffement la sensation thermique et le NDP augmentent significativement ($P < 0,05$) avec le temps, sans que cela n'affecte différemment les conditions. Aucun changement n'est à noter sur le confort thermique.

A l'effort pas de différence entre les conditions n'est noté pour le confort thermique et le NDP alors que ST présente un effet temps ($P < 0,05$) sans qu'il n'y ait de différence entre les conditions.

Fréquence cardiaque

Durant l'échauffement ainsi qu'à l'effort aucune différence significative n'est notée.

A l'effort seul les FC de la condition VMF sont plus basses ($P = 0,52$) que les deux autres conditions de la 18^{ème} minutes à la fin.

Température centrale

Durant le pré-cooling nous ne notons pas de différence significative entre les 3 conditions, un effet temps ($P < 0,05$) uniquement. L'augmentation de la température est identique dans les 3 conditions, et due à l'exercice (échauffement) sans influence du type de pré-cooling utilisée. Cependant une tendance est présente à l'échauffement ($P = 0,06$) avec une moindre augmentation de la température centrale en condition SV ($+0,6^{\circ}\text{C} \pm 0,5^{\circ}\text{C}$) par rapport aux deux autres conditions (respectivement $+1,2^{\circ}\text{C} \pm 0,3^{\circ}\text{C}$ en condition VEF et $+1,3 \pm 0,5^{\circ}\text{C}$ en condition VMF). A l'effort nous notons un effet temps également ($P < 0,05$) sans différence entre les conditions.

DISCUSSION ETUDE 3

Dans l'étude 3, il reste important de préciser que le pré-cooling est réalisé durant l'échauffement, ce qui ne permet pas de comparer les valeurs avec l'étude 2 qui elle, utilise le pré-cooling au repos. Lors de cette étude le faible effet des méthodes de cooling durant l'échauffement laisse penser que le cumul d'une méthode interne et externe ne parvient pas à atténuer l'augmentation de la production de chaleur liée à l'activité physique. Cependant, si nous ne notons pas de différence significative entre les conditions, nous notons des tendances intéressantes :

A l'échauffement il apparait une tendance lors de la fin de l'échauffement : la condition SV permet de limiter l'augmentation de la température corporelle tandis que les conditions avec la veste ne permettent pas cette diminution. Cela peut donc s'expliquer pas les effets du port de la veste sur la peau qui limite la thermorégulation. Cependant à l'effort aucune différence entre les conditions ne ressort puisque seul un effet temps est présent. Les données ne sont pas suffisamment fortes pour développer cette tendance.

II. DISCUSSION GENERALE

Rappel hypothèses et résultats principaux

L'axe général de ce travail de recherche est d'investiguer les effets de méthodes de cooling. Nous supposons que le refroidissement, qu'il soit externe ou interne permet de limiter la dégradation de la performance en climat tropical. De plus, nous supposons que les méthodes de cooling peuvent se cumuler entre elles ou avec du menthol afin d'obtenir des effets bénéfiques sur l'intensité de l'exercice que ces mêmes techniques seules.

Lors de ce travail, nous avons mis en évidence que :

- (1) Les stratégies de cooling (externe ou interne) ont un effet ergogène sur l'intensité de l'exercice allant du seuil anaérobie à des efforts aérobies.
- (2) L'ingestion du menthol permet d'obtenir des intensités d'exercices supérieures comparées à son absence lors des stratégies de cooling interne.
- (3) L'utilisation du menthol externe a un effet ergogène lorsqu'il est utilisé en immersion, tandis que son application sur des vêtements (gilet froid) ne permet pas d'améliorer les différents facteurs pouvant influencer la performance.
- (4) Un pré-cooling interne glace pilée-menthol d'une heure améliore les effets d'un pré-cooling interne seul.

(5) En pré-cooling le cumul d'une stratégie de cooling externe avec un cooling interne n'a pas d'effet sur la performance en climat tropical comparée à un pré-cooling interne seul durant l'échauffement.

Les principaux résultats de cette thèse tendent donc à démontrer que l'utilisation de stratégies de cooling permet de limiter la dégradation de la performance dans un environnement chaud et humide sur des efforts compris entre 20minutes et 1heure. Nous mettons également en évidence que l'utilisation du menthol cumulé à ces stratégies de cooling améliore l'effet ergogène sur l'intensité de l'exercice entre 20min et 1 heure. Cependant des limites existent notamment sur la durée du refroidissement ou sa technique. Nos résultats mettent en évidence que plus la durée de refroidissement interne est importante, meilleure est la performance (étude 2) et que le refroidissement externe maintient la performance entre deux épreuves (étude 1) mais n'a pas d'effet cumulatif avec le refroidissement interne (étude 3). Ces résultats sont améliorés avec l'utilisation du menthol qui, en immersion ou en ingestion, permet une augmentation de la performance en cyclisme (étude 1 et 2), sans que cet effet ne se retrouve lors de son application à des vêtements. De plus, les techniques internes (étude 2) peuvent se cumuler tandis que dans certaines conditions, le cumul de stratégies interne et externe (étude 3) ne permet pas d'améliorer la performance.

D i s c u s s i o n g é n é r a l e

L'objet principal de cette thèse est de permettre une limitation de la dégradation des performances cyclistes en climat tropical. Pour cela nous avons mis en place des protocoles de recherches sur le cooling dans le but de comprendre comment diminuer l'impact lié aux conditions chaudes et humides et ainsi limiter la dégradation de la performance. Nos études portent sur la réalisation de performances sur un temps donné pouvant révéler si les différentes méthodes de cooling utilisées peuvent, ou non, modifier l'évolution de la température centrale au cours du temps. Elles s'intéressent également aux stratégies de gestion de l'effort. Nos investigations se sont uniquement portées sur des cyclistes acclimatés et entraînés. Les résultats principaux mettent en évidence qu'il existe des protocoles de cooling efficaces et utilisables par les athlètes, mais que toutes les méthodes de cooling ne sont pas efficaces.

Dans nos études, l'effet ergogène de techniques de cooling (lorsqu'il est présent) peut permettre une amélioration de la performance comprise entre 11% (étude 2) et 15,6% (étude 1). La littérature « estime » que la diminution de la performance en climat tropical est corrélée avec l'augmentation de la température centrale, à raison de 0,3% à 0,9% de diminution de performance tous les 1°C supplémentaires (Racinais et coll. 2015). Schmit et coll. (2017) rappellent également que cet impact négatif sur la performance augmente avec la durée d'exercice selon une diminution d'environ 2% pour une durée d'exercice de 6,5 min (Altareki et coll. 2009), de 7% pour une durée d'exercice de 30 min (Tatterson et coll. 2000), et d'environ 16% pour une durée d'exercice de 70 min (Racinais et coll. 2015, cités par Schmit et coll. 2017). Ces

diminutions de la performance peuvent être limitées avec l'utilisation de méthodes de cooling. Dans une méta-analyse Wegmann et coll. (2012) confirment que l'efficacité du pré-cooling est accrue lors d'un exercice aérobic en environnement chaud.

Les deux facteurs principaux imputables à l'amélioration de la performance dans nos études sont l'utilisation du froid et du menthol. Le froid, ou cooling, a permis une diminution de la température corporelle en amont de la performance (étude 1 et 2), ainsi que des différents ressentis de chaleurs (ST) et d'effort (NDP). L'utilisation du menthol dans chacune de ces expérimentations est également responsable d'une moindre baisse de la performance. Si d'autres variables semblent également modifier la performance, ce sont avant tout celles nommées précédemment qui sont principalement affectées et pouvant permettre une meilleure performance.

Le cooling

La diminution de la température rectale est le facteur récurrent de nos études (étude 1 et 2) quand le cooling est utilisé au repos, tandis que durant un échauffement le cooling n'affecte pas la température corporelle. Ainsi, que se soit par une immersion en eau froide ou avec un pré-cooling interne, la température corporelle au repos diminue. Cependant, selon la méthode utilisée, la température ne diminue pas avec les mêmes amplitudes : En pré-cooling interne la diminution de la température rectale diminue entre 0,3°C et 0,6°C (respectivement avec 30min et 1h de pré-cooling), tandis qu'en immersion Trec est diminuée de 0,6°C en condition mentholée, contre 1,2°C en condition sans menthol pour 10min d'immersion suite à un exercice maximal de 20min. En revanche le cumul de techniques interne-externe ne permet pas de plus diminuer la température qu'une technique n'utilisant pas le cumul durant un

échauffement de 30 minutes (étude 3) : l'effet du refroidissement interne et externe n'induit pas d'augmentation moins rapide que lors d'un cooling interne seul.

Conclusion cooling : Les méthodes de cooling, qu'elles soient externes ou internes permettent une diminution de la température rectale lorsqu'elles sont utilisées au repos. Cette diminution de la température permet une amélioration ou le maintien de la performance aérobie en climat tropical. La température est donc un paramètre central pour lutter contre le déclin de la performance lié à l'environnement chaud et humide. Cependant une plus grande diminution de la température n'entraîne pas forcément une meilleure performance. Cela peut donc signifier que d'autres facteurs externe interviennent dans le maintien de la performance, tel que le menthol.

Le menthol

1) Interne

L'ingestion du menthol permet également d'influencer la performance en climat tropical : Riera et coll. (2014) ont mis en évidence qu'à même température l'ajout du menthol à une boisson à un effet ergogène sur la performance. Dans nos études (2 et 3) la concentration à ingérer était la même pour chacune des conditions, et en accord avec les études déjà publiées sur le sujet (Riera et coll. 2016, 2014 : Trong et coll. 2015). Néanmoins nous avons une variable différente : la durée d'absorption (étude 2) ou le cumul avec une technique externe (étude 3).

Dans les conditions pré-60 et neutre les cyclistes ingèrent du menthol durant 1h tandis qu'en pré-30 ils l'ingèrent durant 30 min (étude 2). Nous venons de développer que

l'une des piste principale pouvant expliquer la meilleure performance en pré-60 est la diminution de la température rectale, cependant l'ajout du menthol peut également jouer un rôle :

Il a été mis en évidence que la demi vie plasmatique du menthol est de 56,2min (Gelal et coll. 1999) et que ce dernier se retrouve dans le cerveau (Umezumi et coll. 2001). De plus, certaines études mettent en avant que le menthol a un effet analgésique à travers des mécanismes périphériques (Liu et coll. 2014) induits par l'activation des thermorécepteurs et par des mécanismes centraux (Pan et coll. 2012; Ruskin et coll. 2007). L'ingestion du menthol durant 1h peut donc permettre au menthol de traverser la membrane encéphalique et ainsi inhiber les capteur de la douleur (voir thèse de Than Tran 2015). Cette utilisation, semblable à un analgésique, peut donc être l'un des facteurs expliquant la meilleure performance en pré-60 comparé aux deux autres conditions. La performance n'était pas améliorée dans la condition neutre, il est donc à suggérer que l'optimisation de la performance vient du cumul des deux techniques menthol et cooling.

L'utilisation du menthol en pré-cooling pour les conditions pré-30 et neutre peut également expliquer l'absence de différence entre ces deux conditions : le menthol peut influencer le SNC qui à son tour limite la thermorégulation par son action sur TRPM8 et TRPA1. Cette stimulation induit le SNC à réduire le processus de thermorégulation (Macpherson et coll. 2006). Cumulé aux effets de la contrainte thermique (liée à l'environnement), l'action de la glace pilée sur 30 min et de l'eau neutre pourrait ne pas compenser les rétroactions négatives sur la thermorégulation liées au menthol. Cela pourrait expliquer la diminution plus faible de T_{rec} en pré-30 que pré-60 et l'absence

de différence sur la performance entre pré-30 et neutre. Cependant cette piste de réflexion nécessite d'avantage d'expérimentations.

De plus, le menthol peut causer une vasoconstriction, limitant les processus de thermorégulation, comme suggéré par Ruskin et coll. (2007) avec une vasoconstriction nasale suite l'application d'une solution de menthol dans la bouche. Toujours Ruskin et coll. (2007) ont injecté du menthol par voie sous-cutanée chez des rats et ont constaté que la température corporelle augmentait suite à cette injection. Nous nous demandons donc si l'action de la glace pilée n'entre pas en « conflit » avec les effets du menthol lors d'une utilisation courte (30min), avant que la prise régulière de glace pilée et la faible concentration de menthol utilisées permettent d'affecter sensiblement la diminution de Trec (pre60). Cependant, ces effets semblent être marginaux dans notre étude étant donnée la faible concentration de menthol utilisée, et ne peuvent que partiellement expliquer le lien entre thermorégulation et menthol. De plus, ce mécanisme n'affecte pas la condition pre-60 et donc ne peut être le facteur déterminant de ce résultat.

Cependant ni NDP, ni ST ne sont significativement différents entre les conditions. Les facteurs principaux liés à l'amélioration de la performance en climat tropical restent donc étroitement liés à la prédominance des signaux afférents émis par le menthol et l'action du froid.

Dans cette étude 2 ST a été significativement affectée par le temps, indépendamment de la condition. Nous supposons que l'hydratation influencerait ST dans le climat tropical indépendamment de la température de la boisson (Yeo et coll. 2012).

Cependant, ST a diminué à la fin du pré-cooling avec une ingestion de boissons froides dans les études de Yeo et coll. (2012), Ihsan et coll. (2010) et Stanley et coll. (2010). Dans leur étude, Yeo et coll. (2012) ont montré que le pré-refroidissement avec 8 g.kg⁻¹ de boisson froide pendant 30 minutes dans un environnement chaud et humide induit une diminution significative de la sensation thermique.

2) Externe

Si en utilisation interne le menthol n'entraîne pas une augmentation de la température rectale ou si, le cas échéant, l'ingestion de boissons compense cet effet, nous mettons en évidence lors de l'étude 1, que Trec est négativement impactée lors de l'utilisation du menthol durant une immersion. En effet, suite à l'immersion, la condition mentholée permet une moindre diminution de la température rectale, comparée à une immersion de même durée et température (10min à 10°C) mais sans menthol.

Nous supposons que l'action du menthol, qui agit sur l'ensemble des thermorécepteurs, influence le SNC. Ce dernier, se faisant « duper » sur la température réelle de l'eau, ne thermorégule pas autant que dans la condition sans menthol : le menthol entraîne donc une vasoconstriction ce qui rejoint les travaux de Kounalakis et coll. (2010) mettant en évidence ce mécanisme suite à l'application d'une solution mentholée sur le corps entier de leurs sujets, limitant la perte de chaleur corporelle. Dans notre étude, une concentration de menthol de 0,1% a été utilisée. L'impact sur la capacité thermorégulatrice a été altérée lorsque la concentration de menthol était supérieure à 0,2% sur la peau (Kounalakis et coll. 2010; Gillis et coll. 2010). Cependant, Gillis et coll. (2010) ont montré qu'une solution de 0,05% n'a pas eu d'impact sur Trec, ce qui confirme qu'une concentration de moins de 0,2% de menthol n'augmente pas Trec.

L'utilisation de 0,1% de menthol a néanmoins limité la diminution de Trec lors d'une utilisation du menthol en immersion dans nos expérimentations. L'une des explications possible est que la durée d'immersion (10min) et donc la durée de contact entre le menthol et la peau, permettrait de plus grandes adaptations liées au menthol telles que la vasoconstriction et un message afférent de froid vers le SNC par l'action du menthol sur les thermorécepteurs.

Cependant, la performance qui suit cette immersion est significativement meilleure en condition mentholée que non mentholée. Cette amélioration de la performance est donc accompagnée par d'autres facteurs : ST, NDP, Tcut, ce qui corrobore les résultats de la méta-analyse de Bongers et coll. (2014) ne mettant pas en évidence de corrélation entre la diminution de la température centrale et l'amélioration de la performance.

Ces améliorations de la performance peuvent également provenir des variables psychologiques :

La sensation thermique plus basse après l'immersion dans les deux conditions était probablement due à l'eau froide de l'immersion. Les températures élevées de la peau sont associées à des sensations accrues de chaleur et d'inconfort thermique (Marcora 2007), et l'immersion prolongée dans l'eau froide réduit ainsi ST dans un environnement chaud et humide. La diminution de ST dans cette étude s'explique par la réduction de Tcut, mais peut également s'expliquer par l'action du menthol sur TRMP8 et TRPA1 : Le menthol active TRPM8 et TRPA1, qui est également activé à basse température jusqu'à 17°C (McKemy et coll. 2002). L'activation de ces récepteurs stimule l'hypothalamus, qui à son tour réduit ST (Morrison & Shaun 2011). Cette

constatation est corroborée par une étude menée dans des conditions chaudes et humides qui suggère qu'une pulvérisation de 0,05% de menthol a produit des sensations corporelles plus froides sans augmentation de T_{rec} lors d'un exercice cyclable de 45 minutes à 45% de PO (pic) (Gillis et coll. 2010). Nous avons supposé que cette diminution de ST a eu un effet sur le choix d'une intensité plus élevée dans le CLM 2 par rapport au CLM 1 dans la condition immersion mentholée, en diminuant les effets de la contrainte thermique. Comme l'ont démontré récemment Peiffer & Abbiss (2011), une ST plus basse peut donc être considérée comme l'un des facteurs permettant d'améliorer la performance.

De plus, le NDP était significativement plus élevée dans le CLM 1 que le CLM 2 (étude 1) dans la condition mentholée en raison des effets du menthol sur les récepteurs TRPM8 et TRPA1 également. L'action analgésique du menthol peut distraire les cyclistes de la douleur en provoquant des sensations de refroidissement, bloquant ainsi l'activité de TRPA1 (Macpherson et coll. 2006). Ces résultats ont démontré que le menthol a pu diminuer ST, ce qui a limité l'augmentation du NDP tout en réalisant une meilleure performance. Il n'y avait aucune différence pour le NDP dans la condition sans menthol (entre avant et après immersion).

CT n'a pas été affecté par le temps, l'état ou la condition en fonction du temps dans nos études. L'environnement commun pour les trois conditions explique ce résultat. En outre, les sujets étant acclimatés, nous supposons qu'ils n'ont pas perçu l'environnement tropical comme inconfortable. Un résultat similaire pour CT a déjà été mis en évidence en climat tropical (Riera et coll. 2016).

Utilisé sur un vêtement le menthol ne permet pas dans notre étude d'influencer la température ni les sensations des sujets. L'effet ergogène du menthol est donc principalement lié à son application cutanée ou son ingestion.

Conclusion menthol :

S'il avait déjà montré ses effets ergogènes durant l'effort lors de son cumul avec une boisson froide (Riera et coll. 2014 ; Trong et coll. 2015) le menthol est également efficace lorsqu'il est ingéré avec une boisson froide durant l'heure précédente l'effort. De plus, utilisée en application cutanée il permet une amélioration de la performance malgré un impact négatif sur la température centrale. Cependant son action ergogène semble limitée lorsqu'il est utilisé sur un vêtement, tel qu'une veste de refroidissement. Le menthol joue donc un rôle dans l'amélioration des performances lorsqu'il est cumulé, mais son utilisation est soumise à précaution en fonction de sa durée d'application ou d'ingestion.

Limites :

L'objet principal de ce travail de recherche est de développer des stratégies permettant de limiter l'impact délétère du climat tropical sur la performance. Cela nous a conduit à mener des études en laboratoire ou en milieu écologique avec des athlètes entraînés et acclimatés. La faible population d'athlètes réalisant nos études est la première limite importante. Le recrutement de sujets à la fois entraînés et acclimatés, sur une île est un processus difficile. Il est évident que cela peut minimiser la force statistique de nos résultats. Cependant la volonté de travailler sur cette population d'athlètes prime, et ces

résultats s'inscrivent dans un cadre précis de recherche de la performance en climat tropical.

Certains de nos protocoles peuvent également se retrouver incomplet ne permettant pas l'interprétation des résultats avec une quantité suffisantes de paramètres. C'est le cas notamment de l'absence de questionnaires afin d'interroger les sujets sur leur motivation, leur engagement, mais également sur le regard qu'ils portent sur le menthol lorsque celui ci est utilisé. Ces paramètres (non exhaustifs) auraient pu nous aider à discuter sur le modèle psychobiologique tel que défini par Pageaux (2014) qui développe l'idée selon laquelle le degré d'engagement des sujets influence leur tolérance à l'effort d'un niveau de difficulté perçu plus élevé. Le développement de l'idée d'un modèle multidimensionnel, tel que présenté dans notre revue de littérature, est donc de plus en plus décrit dans la littérature scientifique. C'est sur ce point que l'intégration de données complémentaires aurait pu permettre une interprétation plus précise de nos résultats.

Enfin, le domaine d'application de nos études ne porte que sur des efforts compris entre vingt minutes et une heure maximum. Et si à ce jour il n'existe pas un protocole faisant l'unanimité de la communauté scientifique et sportive, nos résultats amènent de nouvelles perspectives afin d'optimiser ces performances en climat tropical avec l'utilisation du cooling mentholé.

III. CONCLUSION

Tucker et coll. (2004) ont montré que les sujets soumis à une contrainte thermique exogène et endogène abaissent leur puissance durant l'exercice, même si les températures centrales n'ont pas atteint des valeurs critiques. Leur hypothèse (Tucker et coll. 2006) fait état d'un mécanisme d'anticipation afin de limiter le stockage de chaleur lié à la production métabolique et au stress environnemental.

Notre étude 2, sur l'ingestion de glace pilée met en avant une relation entre la température centrale de départ, le menthol et la performance : plus la température initiale est basse, avec une durée d'ingestion du menthol longue (1h), plus la performance est élevée. Ce mécanisme peut trouver une explication dans l'existence d'un processus d'anticipation : tant que le SNC détecte un signal thermique comme étant favorable, que ce soit dans un premier temps par la température centrale basse, ou comme nous l'avançons, par l'effet du menthol cumulé à la baisse de la température centrale, le SNC régule l'intensité de l'exercice à la hausse. Les feedbacks liés à l'environnement sont donc :

- (1) Influencés par la température centrale basse dans un premier temps puis
- (2) « Affectés » par l'action du menthol sur le SNC.

Ces deux mécanismes permettent donc au SNC de décaler le moment de la baisse d'intensité et ainsi permettre une meilleure performance. Bien que récemment mise en doute par Friezen et coll. (2017) cette hypothèse est confortée par notre première étude,

puisque le menthol permet d'influencer plusieurs facteurs tels que le NDP et TS entraînant une meilleure performance lors de l'exercice suivant l'immersion mentholée. Cependant en application cutanée le menthol induit une modification de la thermorégulation centrale et doit donc être utilisé avec précaution.

Ce travail a donc permis de mettre en évidence pour la première fois :

- (1) Qu'un pré-cooling interne d'une heure permet une amélioration de la performance lorsqu'il est cumulé à un per-cooling d'eau froide mentholée;
- (2) Que le menthol utilisé directement sur la peau permet d'améliorer les effets d'une immersion en eau froide sur la performance réalisée post-immersion mais que son application par un vêtement n'influence pas la performance.
- (3) Que les performances sont meilleures par l'action du menthol et du refroidissement au regard de leurs actions sur le SNC qui perçoit l'environnement comme « plus favorable » et par conséquent, vont permettre une performance plus élevée que sans ces méthodes de cooling.
- (4) Que l'action du menthol dépend de sa durée d'utilisation.

P e r s p e c t i v e s

Cette thèse a certes permis de mettre en évidence les effets ergogènes de plusieurs méthodes de cooling mentholé, cependant, ces résultats font néanmoins émerger des questions. Les perspectives non exhaustives de ce travail, peuvent être une base d'expérimentations intéressantes dans l'optique d'approfondir la compréhension des différents mécanismes qui y sont développés.

Perspective 1 :

Le premier axe pouvant être approfondi est l'utilisation du menthol utilisé par une action cutanée et ses effets sur la thermorégulation : nous mettons en avant dans notre étude 1 que le menthol limite le processus thermorégulateur lors de l'immersion. Il serait donc intéressant de proposer, à conditions d'immersions (10min à 10°C) ainsi qu'à concentration du menthol identique, un exercice plus long, supérieur à 1h. Cela afin de voir si le menthol ne peut pas avoir un effet négatif sur la performance par son action sur la température centrale. Effectivement les processus thermorégulateurs sont mis en jeu pour des activités souvent plus longues que celles de nos études et l'effet limitant du climat tropical est d'autant plus important que l'activité est longue, d'où l'intérêt d'investiguer des durée d'exercice plus longue.

Perspective 2 :

Les effets du menthol persistent lors des épreuves longues (> 1h) s'il est ingéré avec une boisson froide à différents moments lors de l'épreuve (Riera et coll. 2016). Nous venons de montrer que l'utilisation d'une stratégie de pré-cooling glace pilée-menthol au repos

permet d'améliorer ces effets. Cependant Baillot et coll. (2015) mettent en avant que les athlètes les plus performants sur un trail sont également ceux qui s'hydratent le moins durant la course. C'est le cas également chez les cyclistes lors des épreuves de CLM où les athlètes s'échauffent parfois longuement avant le départ et ensuite ne s'hydratent pas ou peu durant l'épreuve. Il serait donc intéressant de se pencher sur des protocoles de pré-cooling lors de l'échauffement, afin de déterminer les effets de l'utilisation préalable à la course de l'ingestion d'une boisson froide-mentholée et sa durée d'action en climat tropical.

REFERENCES

- Adams, W.C. et coll., 1992. Effects of varied air velocity on sweating and evaporative rates during exercise. *Journal of applied physiology (Bethesda, Md. : 1985)*, 73(6), pp.2668–74.
- Almeida, M.C. et coll., 2006. Cold-seeking behavior as a thermoregulatory strategy in systemic inflammation. *The European journal of neuroscience*, 23(12), pp.3359–67.
- Altareki, N. et coll., 2009. Effects of environmental heat stress (35 degrees C) with simulated air movement on the thermoregulatory responses during a 4-km cycling time trial. *International journal of sports medicine*, 30(1), pp.9–15.
- Arngrímsson, S.A. et coll., 2004. Cooling vest worn during active warm-up improves 5-km run performance in the heat. *Journal of applied physiology (Bethesda, Md. : 1985)*, 96(5), pp.1867–74.
- Baillet, M., Le Bris, S. & Hue, O., 2014. Fluid replacement strategy during a 27-Km trail run in hot and humid conditions. *International journal of sports medicine*, 35(2), pp.147–52.
- Baillet, M. & Hue, O., 2015. Hydration and thermoregulation during a half-ironman performed in tropical climate. *Journal of Sports Science and Medicine*, 14(2), pp.263–268.
- Barner, H.B. et coll., 1984. Field evaluation of a new simplified method for cooling of heat casualties in the desert. *Military medicine*, 149(2), pp.95–7.
- Barwood, M.J. et coll., 2012. Early change in thermal perception is not a driver of anticipatory exercise pacing in the heat. *British Journal of Sports Medicine*, 46(13), p.936 LP-942.
- Barwood, M.J. et coll., 2015. Relieving thermal discomfort: Effects of sprayed L-menthol on perception, performance, and time trial cycling in the heat. *Scandinavian Journal of Medicine and Science in Sports*, 25(S1), pp.211–218.

- Barwood, M.J., Corbett, J. & White, D.K., 2014. Spraying with 0.20% L-menthol does not enhance 5 km running performance in the heat in untrained runners. *The Journal of sports medicine and physical fitness*, 54(5), pp.595–604.
- Berkulo, M.A.R. et coll., 2016. Ad-libitum drinking and performance during a 40-km cycling time trial in the heat. *European journal of sport science*, 16(2), pp.213–20.
- Bettoni, L. et coll., 2013. Effects of 15 consecutive cryotherapy sessions on the clinical output of fibromyalgic patients. *Clinical rheumatology*, 32(9), pp.1337–45.
- Bieuzen, F., Bleakley, C.M. & Costello, J.T., 2013. Contrast water therapy and exercise induced muscle damage: a systematic review and meta-analysis. *PloS one*, 8(4), p.e62356.
- Bongers, C.C.W.G. et coll., 2014. Precooling and percooling (cooling during exercise) both improve performance in the heat: a meta-analytical review. *British journal of sports medicine*, pp.377–384.
- Borg, G.A., 1982. Psychophysical bases of perceived exertion. *Medicine and science in sports and exercise*, 14(5), pp.377–81.
- Botonis, P.G. et coll., 2016. Effects of menthol application on the skin during prolonged immersion in swimmers and controls. *Scandinavian journal of medicine & science in sports*, pp.1–9.
- Bouzigon, R. et coll., 2016. Whole- and partial-body cryostimulation/cryotherapy: Current technologies and practical applications. *Journal of Thermal Biology*, 61, pp.67–81.
- Boyi Liu, Lu Fan, Shrilatha Balakrishna, Aiwei Suia, John B. Morrisb, and S.-E. & Jordt, 2014. TRPM8 is the Principal Mediator of Menthol-induced Analgesia of Acute and Inflammatory Pain. *Pain*, 154(10), pp.2169–2177.
- Broatch, J.R., Petersen, A. & Bishop, D.J., 2014. Postexercise cold water immersion benefits are not greater than the placebo effect. *Medicine and science in sports and exercise*,

46(11), pp.2139–47.

Brophy-Williams, N., Landers, G. & Wallman, K., 2011. Effect of immediate and delayed cold water immersion after a high intensity exercise session on subsequent run performance. *Journal of Sports Science and Medicine*, 10(4), pp.665–670.

Brotherhood, J.R., 2008. Heat stress and strain in exercise and sport. *Journal of Science and Medicine in Sport*, 11(1), pp.6–19.

Buchheit, M. et coll., 2011. Physiological and performance adaptations to an in-season soccer camp in the heat: associations with heart rate and heart rate variability. *Scandinavian journal of medicine & science in sports*, 21(6), pp.e477-85.

Burdon, C.A. et coll., 2010. Influence of Beverage Temperature on Exercise Performance in the Heat : A Systematic Review. , (2004), pp.166–174.

Burk, A. et coll., 2012. Effects of heat acclimation on endurance capacity and prolactin response to exercise in the heat. *European Journal of Applied Physiology*, 112(12), pp.4091–4101.

Byrne, C. et coll., 2011. Self-Paced Exercise Performance in the Heat After Pre-Exercise Cold-Fluid Ingestion. , 46(6), pp.592–599.

Casadio, J.R. et coll., 2016. From Lab to Real World : Heat Acclimation Considerations for Elite Athletes. *Sports Medicine*, (February 2017).

Chalmers, S. et coll., 2014. Short-term heat acclimation training improves physical performance: A systematic review, and exploration of physiological adaptations and application for team sports. *Sports Medicine*, 44(7), pp.971–988.

Chan, K.O.W., Wong, S.H.S. & Chen, Y.J., 2008. Effects of a hot environment on simulated cycling and running performance in triathletes. *The Journal of sports medicine and physical fitness*, 48(2), pp.149–57.

- Cheang, W.S. et coll., 2013. Menthol relaxes rat aortae, mesenteric and coronary arteries by inhibiting calcium influx. *European Journal of Pharmacology*, 702(1–3), pp.79–84.
- Cheung, S.S., 2010. Interconnections between thermal perception and exercise capacity in the heat. *Scandinavian Journal of Medicine and Science in Sports*, 20(SUPPL. 3), pp.53–59.
- Cheung, S.S., 2007. Neuropsychological determinants of exercise tolerance in the heat. *Progress in Brain Research*, 162(6), pp.45–60.
- Chevront, S.N. et coll., 2010. Mechanisms of aerobic performance impairment with heat stress and dehydration. *J Appl Physiol (1985)*, 109(6), pp.1989–1995.
- Chevront, S.N. & Haymes, E.M., 2001. Ad libitum fluid intakes and thermoregulatory responses of female distance runners in three environments. *Journal of sports sciences*, 19(11), pp.845–54.
- Chevront, S.N., Kenefick, R.W. & Zambraski, E.J., 2015. Spot Urine Concentrations Should Not be Used for Hydration Assessment: A Methodology Review. *International journal of sport nutrition and exercise metabolism*, 25(3), pp.293–7.
- Chiesa, S.T. et coll., 2015. Local temperature-sensitive mechanisms are important mediators of limb tissue hyperemia in the heat-stressed human at rest and during small muscle mass exercise. *American journal of physiology. Heart and circulatory physiology*, 309(2), pp.H369-80.
- Christensen, P.M. & Bangsbo, J., 2016. Influence of Prior Intense Exercise and Cold Water Immersion in Recovery for Performance and Physiological Response during Subsequent Exercise. *Frontiers in Physiology*, 7(June), p.269.
- Clements, J.M. et coll., 2002. Ice-water immersion and cold-water immersion provide similar cooling rates in runners with exercise-induced hyperthermia. *Journal of Athletic Training*, 37(2), pp.146–150.
- Clifford, J., Kerslake, D.M. & Waddell, J.L., 1959. The effect of wind speed on maximum

- evaporative capacity in man. *The Journal of physiology*, 147, pp.253–9.
- Cochrane, D.J., 2004. Alternating hot and cold water immersion for athlete recovery: a review. *Physical Therapy in Sport*, 5(1), pp.26–32.
- Cramer, M.N. & Jay, O., 2016. Biophysical aspects of human thermoregulation during heat stress. *Autonomic Neuroscience*, 196, pp.3–13.
- Crampton, D. et coll., 2013. Cycling time to failure is better maintained by cold than contrast or thermoneutral lower-body water immersion in normothermia. *European Journal of Applied Physiology*, 113(12), pp.3059–3067.
- Cuttell, S.A., Kiri, V. & Tyler, C., 2016. A Comparison of 2 Practical Cooling Methods on Cycling Capacity in the Heat. *Journal of athletic training*, 51(7), pp.525–32.
- Davies, M.J. et coll., 2016. Effect of environmental and feedback interventions on pacing profiles in cycling: A meta-analysis. *Frontiers in Physiology*, 7(December).
- Eccles, R., 1994. Menthol and Related Cooling Compounds. *Journal of Pharmacy and Pharmacology*, 46(8), pp.618–630.
- Ely, B.R. et coll., 2010. Aerobic performance is degraded, despite modest hyperthermia, in hot environments. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 42(1), pp.135–141.
- Ely, M.R. et coll., 2007. Impact of weather on marathon-running performance. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 39(3), pp.487–493.
- Eston, R. & Peters, D., 1999. Effects of cold water immersion on the symptoms of exercise-induced muscle damage. *Journal of sports sciences*, 17(3), pp.231–8.
- Febbraio, M.A., 2000. Does muscle function and metabolism affect exercise performance in the heat? *Exercise and sport sciences reviews*, 28(4), pp.171–6.
- Ferreira-Junior, J.B. et coll., 2014. Could whole-body cryotherapy (below -100°C) improve muscle recovery from muscle damage? *Frontiers in physiology*, 5, p.247.

- Figueiredo, V.C. et coll., 2016. Impact of resistance exercise on ribosome biogenesis is acutely regulated by post-exercise recovery strategies. *Physiological reports*, 4(2), p.e12670.
- Fiscus, K.A., Kaminski, T.W. & Powers, M.E., 2005. Changes in Lower-Leg Blood Flow During Warm-, Cold-, and Contrast-Water Therapy. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*, 86(7), pp.1404–1410.
- Fonfria, E. et coll., 2006. Tissue distribution profiles of the human TRPM cation channel family. *Journal of receptor and signal transduction research*, 26(3), pp.159–78.
- French, D.N. et coll., 2008. The effects of contrast bathing and compression therapy on muscular performance. *Medicine and science in sports and exercise*, 40(7), pp.1297–306.
- Fujii, N. et coll., 2012. Short-term exercise-heat acclimation enhances skin vasodilation but not hyperthermic hyperpnea in humans exercising in a hot environment. *European Journal of Applied Physiology*, 112(1), pp.295–307.
- Gagnon, D. et coll., 2010. Cold-Water Immersion and the Treatment of Hyperthermia: Using 38.6 °C as a Safe Rectal Temperature Cooling Limit. , 45(5), pp.439–444.
- Galloway, S.D. & Maughan, R.J., 1997. Effects of ambient temperature on the capacity to perform prolonged cycle exercise in man. *Medicine and science in sports and exercise*, 29(9), pp.1240–1249.
- Garrett, A.T. et coll., 2012. Effectiveness of short-term heat acclimation for highly trained athletes. *European journal of applied physiology*, 112(5), pp.1827–37.
- Garrett, A.T. et coll., 2009. Induction and decay of short-term heat acclimation. *European journal of applied physiology*, 107(6), pp.659–70.
- Gelal, A. et coll., 1999. Disposition kinetics and effects of menthol. *Clinical pharmacology and therapeutics*, 66(2), pp.128–35.

- Gill, N.D., Beaven, C.M. & Cook, C., 2006. Effectiveness of post-match recovery strategies in rugby players. *British journal of sports medicine*, 40(3), pp.260–3.
- Gillis, D.J., House, J.R. & Tipton, M.J., 2010. The influence of menthol on thermoregulation and perception during exercise in warm, humid conditions. *European journal of applied physiology*, 110(3), pp.609–18.
- Gisolfi, C. V & Wenger, C.B., 1984. Temperature regulation during exercise: old concepts, new ideas. *Exercise and sport sciences reviews*, 12, pp.339–72.
- Gizińska, M. et coll., 2015. Effects of Whole-Body Cryotherapy in Comparison with Other Physical Modalities Used with Kinesitherapy in Rheumatoid Arthritis. *BioMed research international*, 2015, p.409174.
- González-Alonso, J. et coll., 2015. Blood temperature and perfusion to exercising and non-exercising human limbs. *Experimental Physiology*, 100(10), pp.1118–1131.
- González-Alonso, J. & Calbet, J.A.L., 2003. Reductions in systemic and skeletal muscle blood flow and oxygen delivery limit maximal aerobic capacity in humans. *Circulation*, 107(6), pp.824–830.
- González-Alonso, J., Mora-Rodríguez, R. & Coyle, E.F., 2000. Stroke volume during exercise: interaction of environment and hydration. *American journal of physiology. Heart and circulatory physiology*, 278(2), pp.H321–H330.
- González-Alonso, J., Mora-Rodríguez, R. & Coyle, E.F., 1999. Supine exercise restores arterial blood pressure and skin blood flow despite dehydration and hyperthermia. *The American journal of physiology*, 277(2 Pt 2), pp.H576-83.
- Goodall, S. & Howatson, G., 2008. The effects of multiple cold water immersions on indices of muscle damage. *Journal of sports science & medicine*, 7(2), pp.235–41.
- Green, B.G., 1985. Menthol modulates oral sensations of warmth and cold. *Physiology & behavior*, 35(3), pp.427–34.

- Guy, J.H. et coll., 2016. Acclimation training improves endurance cycling performance in the heat without inducing endotoxemia. *Frontiers in Physiology*, 7(JUL), pp.1–9.
- Hall, A.C. et coll., 2004. Modulation of human GABA A and glycine receptor currents by menthol and related monoterpenoids. *European Journal of Pharmacology*, 506(1), pp.9–16.
- Halson, S.L. et coll., 2008. Physiological responses to cold water immersion following cycling in the heat. *International journal of sports physiology and performance*, 3(3), pp.331–46.
- Hamlin, M.J., 2007. The effect of contrast temperature water therapy on repeated sprint performance. *Journal of science and medicine in sport*, 10(6), pp.398–402.
- Hasegawa, H. et coll., 2006. Combined effects of pre-cooling and water ingestion on thermoregulation and physical capacity during exercise in a hot environment. *Journal of sports sciences*, 24(1), pp.3–9.
- Hauswirth, C. et coll., 2011. Effects of whole-body cryotherapy vs. far-infrared vs. passive modalities on recovery from exercise-induced muscle damage in highly-trained runners. *PloS one*, 6(12), p.e27749.
- Hauswirth, C. et coll., 2010. Réponses physiologiques liées à une immersion en eau froide et à une cryostimulation-cryothérapie en corps entier : effets sur la récupération après un exercice musculaire. *Science & Sports*, 25(3), pp.121–131.
- HENSEL, H. & ZOTTERMAN, Y., 1951. The effect of menthol on the thermoreceptors. *Acta physiologica Scandinavica*, 24(1), pp.27–34.
- Hobson, R.M. et coll., 2009. Exercise capacity in the heat is greater in the morning than in the evening in man. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 41(1), pp.174–180.
- Hodder, S.G. & Parsons, K., 2007. The effects of solar radiation on thermal comfort. *International Journal of Biometeorology*, 51(3), pp.233–250.

- Homestead, E. et coll., 2016. Beneficial Effects of Cooling during Constant Power Non-steady State Cycling. *International Journal of Sports Medicine*, 38(2), pp.141–149.
- Howatson, G. & Van Someren, K.A., 2003. Ice massage. Effects on exercise-induced muscle damage. *The Journal of sports medicine and physical fitness*, 43(4), pp.500–5.
- Hue, O. et coll., 2004. Effects of 8 days acclimation on biological and performance response in a tropical climate. *The Journal of sports medicine and physical fitness*, 44(1), pp.30–7.
- Hue, O., 2011. The challenge of performing aerobic exercise in tropical environments: Applied knowledge and perspectives. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 6(4), pp.443–454.
- Hue, O., Antoine-Jonville, S. & Sara, F., 2007. The Effect of 8 Days of Training in Tropical Environment on Performance in Neutral Climate in Swimmers. *International Journal of Sports Medicine*, 28(1), pp.48–52.
- Ihsan, M. et coll., 2010. Beneficial effects of ice ingestion as a precooling strategy on 40-km cycling time-trial performance. *International Journal of Sports Physiology and Performance*.
- Ingram, J. et coll., 2009. Effect of water immersion methods on post-exercise recovery from simulated team sport exercise. *Journal of science and medicine in sport*, 12(3), pp.417–21.
- Jastrzabek, R. et coll., 2013. Effects of different local cryotherapies on systemic levels of TNF- α , IL-6, and clinical parameters in active rheumatoid arthritis. *Rheumatology international*, 33(8), pp.2053–60.
- Jay, O. & Cramer, M.N., A new approach for comparing thermoregulatory responses of subjects with different body sizes. *Temperature (Austin, Tex.)*, 2(1), pp.42–3.
- Johar, P. et coll., 2012. A comparison of topical menthol to ice on pain, evoked tetanic and voluntary force during delayed onset muscle soreness. *International journal of sports*

physical therapy, 7(3), pp.314–22.

Juliff, L.E. et coll., 2014. Influence of Contrast Shower and Water Immersion on Recovery in Elite Netballers. *Journal of strength and conditioning research / National Strength & Conditioning Association*, 28(8), pp.2353–2358.

Junge, N. et coll., 2016. Prolonged self-paced exercise in the heat – Environmental factors affecting performance. *Temperature*, 4(3), pp.1–10.

Karlsen, A. et coll., 2015. Heat acclimatization does not improve $\dot{V}O_{2\max}$ or cycling performance in a cool climate in trained cyclists. *Scandinavian Journal of Medicine and Science in Sports*, 25(S1), pp.269–276.

Kenefick, R.W. et coll., 2010. Skin temperature modifies the impact of hypohydration on aerobic performance. *Journal of Applied Physiology*, 109(1), pp.79–86.

Kounalakis, S.N. et coll., 2010. The effect of menthol application to the skin on sweating rate response during exercise in swimmers and controls. *European journal of applied physiology*, 109(2), pp.183–9.

Kuligowski, L.A. et coll., 1998. Effect of whirlpool therapy on the signs and symptoms of delayed-onset muscle soreness. *Journal of athletic training*, 33(3), pp.222–8.

Lau, B.K. et coll., 2014. Menthol enhances phasic and tonic GABAA receptor-mediated currents in midbrain periaqueductal grey neurons. *British Journal of Pharmacology*, 171(11), pp.2803–2813.

Lee, D.T. & Haymes, E.M., 1995. Exercise duration and thermoregulatory responses after whole body precooling. *Journal of applied physiology (Bethesda, Md. : 1985)*, 79(6), pp.1971–6.

Lee, J.K.W., Shirreffs, S.M. & Maughan, R.J., 2008. Cold drink ingestion improves exercise endurance capacity in the heat. *Medicine and Science in Sports and Exercise*.

- Levels, K. et coll., 2012. The effect of skin temperature on performance during a 7.5-km cycling time trial. *European Journal of Applied Physiology*, 112(9), pp.3387–3395.
- Lorenzo, S. et coll., 2010. Heat acclimation improves exercise performance. *Journal of applied physiology (Bethesda, Md. : 1985)*, 109(4), pp.1140–7.
- Lubkowska, A. et coll., 2015. Body Composition, Lipid Profile, Adipokine Concentration, and Antioxidant Capacity Changes during Interventions to Treat Overweight with Exercise Programme and Whole-Body Cryostimulation. *Oxidative medicine and cellular longevity*, 2015, p.803197.
- Luhning, K.E. et coll., 2016. Cooling Effectiveness of a Modified Cold-Water Immersion Method After Exercise-Induced Hyperthermia. *Journal of athletic training*, 51(11), pp.946–951.
- Macpherson, L.J. et coll., 2006. More than cool: Promiscuous relationships of menthol and other sensory compounds. *Molecular and Cellular Neuroscience*, 32(4), pp.335–343.
- Marcora, S., 2007. Entia non sunt multiplicanda praeter necessitatem. *J Physiol*, 578(1), p.124370.
- Maughan, R.J., 2010. Distance running in hot environments: A thermal challenge to the elite runner. *Scandinavian Journal of Medicine and Science in Sports*, 20(SUPPL. 3), pp.95–102.
- Maughan, R.J., Otani, H. & Watson, P., 2012a. Influence of relative humidity on prolonged exercise capacity in a warm environment. *European Journal of Applied Physiology*, 112(6), pp.2313–2321.
- Maughan, R.J., Otani, H. & Watson, P., 2012b. Influence of relative humidity on prolonged exercise capacity in a warm environment. *European Journal of Applied Physiology*.
- Mawhinney, C. et coll., 2017. *Cold-Water Mediates Greater Reductions in Limb Blood Flow than Whole Body Cryotherapy*,

- McCann, D.J. & Adams, W.C., 1997. Wet bulb globe temperature index and performance in competitive distance runners. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 29(7), pp.955–961.
- McDermott, B.P. et coll., 2009. Acute whole-body cooling for exercise-induced hyperthermia: A systematic review. *Journal of Athletic Training*, 44(1), pp.84–93.
- McKemy, D.D., Neuhausser, W.M. & Julius, D., 2002. Identification of a cold receptor reveals a general role for TRP channels in thermosensation. *Nature*, 416(6876), pp.52–58.
- Meamarbashi, A. & Rajabi, A., 2013. The effects of peppermint on exercise performance. *Journal of the International Society of Sports Nutrition*, 10(1), p.15.
- Mila-Kierzenkowska, C. et coll., 2013. The effect of submaximal exercise preceded by single whole-body cryotherapy on the markers of oxidative stress and inflammation in blood of volleyball players. *Oxidative medicine and cellular longevity*, 2013, p.409567.
- Mitchell, J.B., McFarlin, B.K. & Dugas, J.P., 2003. The effect of pre-exercise cooling on high intensity running performance in the heat. *International journal of sports medicine*, 24(2), pp.118–24.
- Montgomery, P.G. et coll., 2008. The effect of recovery strategies on physical performance and cumulative fatigue in competitive basketball. *Journal of sports sciences*, 26(11), pp.1135–45.
- Morrison, Shaun, F., 2011. Central neural pathways for thermoregulation. *Frontiers in Bioscience*, 16(1), p.74.
- Moyen, N.E. et coll., 2014. Increasing relative humidity impacts low-intensity exercise in the heat. *Aviation Space and Environmental Medicine*, 85(2), pp.112–119.
- Mündel, T. et coll., 2007. The effects of face cooling during hyperthermic exercise in man: evidence for an integrated thermal, neuroendocrine and behavioural response.

Experimental physiology, 92(1), pp.187–95.

Mündel, T. & Jones, D.A., 2010. The effects of swilling an l(-)-menthol solution during exercise in the heat. *European Journal of Applied Physiology*, 109(1), pp.59–65.

Naito, T., Iribe, Y. & Ogaki, T., 2017. Ice ingestion with a long rest interval increases the endurance exercise capacity and reduces the core temperature in the heat. *Journal of Physiological Anthropology*, 36(1), p.9.

Nielsen, B.Y.B. et coll., 1993. Thermoregulatory adaptations. *Journal of Physiology*, 460(1), pp.467–485.

Noakes, T.D., 2007. Hydration in the marathon : using thirst to gauge safe fluid replacement. *Sports medicine (Auckland, N.Z.)*, 37(4–5), pp.463–6.

Notley, S.R. et coll., 2017. Variations in body morphology explain sex differences in thermoeffector function during compensable heat stress. *Experimental Physiology*, 102(5), pp.545–562.

Nybo, L. & Nielsen, B., 2001. Hyperthermia and central fatigue during prolonged exercise in humans. *Journal of applied physiology (Bethesda, Md. : 1985)*, 91(3), pp.1055–60.

Pageaux, B.; 2014. The psychobiological model of endurance performance : an effort-based decision-making theory to explain self-paced endurance performance. *Sports Med.* DOI 10.1001/s40279-014-0198-2

Pan, R. et coll., 2012. Central Mechanisms of Menthol-Induced Analgesia. , 343(3), pp.661–672.

Parsons, K., 2006. Heat Stress Standard ISO 7243 and its Global Application. *Industrial Health*, 44, pp.368–379.

Patterson, M.J., Stocks, J.M. & Taylor, N. a S., 2004. Humid heat acclimation does not elicit a preferential sweat redistribution toward the limbs. *American journal of physiology*.

Regulatory, integrative and comparative physiology, 286(3), pp.512–518.

Peake, J.M. et coll., 2016. The effects of cold water immersion and active recovery on inflammation and cell stress responses in human skeletal muscle after resistance exercise. *The Journal of Physiology*, 3, p.Epub ahead of print.

Peier, A.M. et coll., 2002. A TRP channel that senses cold stimuli and menthol. *Cell*, 108(5), pp.705–15.

Peiffer, J. et coll., 2010. Effect of a 5-min cold-water immersion recovery on exercise performance in the heat. *Br J Sports Med*, 44, pp.461–465.

Peiffer, J.J. et coll., 2010. Effect of cold water immersion on repeated 1-km cycling performance in the heat. *Journal of Science and Medicine in Sport*, 13(1), pp.112–116.

Peiffer, J.J. & Abbiss, C.R., 2011. Influence of environmental temperature on 40 km cycling time-trial performance. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 6(2), pp.208–220.

Périard, J.D. et coll., 2016. Cardiovascular adaptations supporting human exercise-heat acclimation. *Autonomic Neuroscience: Basic and Clinical*, 196, pp.52–62.

Périard, J.D. et coll., 2011. Cardiovascular strain impairs prolonged self-paced exercise in the heat. *Experimental Physiology*, 96(2), pp.134–44.

Périard, J.D. et coll., 2013. Influence of heat stress and exercise intensity on vastus lateralis muscle and prefrontal cortex oxygenation. *European journal of applied physiology*, 113(1), pp.211–22.

Périard, J.D., Caillaud, C. & Thompson, M.W., 2012. The role of aerobic fitness and exercise intensity on endurance performance in uncompensable heat stress conditions. *European journal of applied physiology*, 112(6), pp.1989–99.

Petersen, C.J. et coll., 2010. Partial heat acclimation in cricketers using a 4-day high intensity

- cycling protocol. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 5(4), pp.535–545.
- Point, M. et coll., 2017. Cryotherapy induces an increase in muscle stiffness. *Scandinavian journal of medicine & science in sports*.
- Proulx, C.I., Ducharme, M.B. & Kenny, G.P., 2003. Effect of water temperature on cooling efficiency during hyperthermia in humans. *Journal of applied physiology (Bethesda, Md. : 1985)*, 94(4), pp.1317–1323.
- Quod, M.J. et coll., 2008. Practical precooling: Effect on cycling time trial performance in warm conditions. *Journal of Sports Sciences*, 26(14), pp.1477–1487.
- Racinais, S. et coll., 2015. Consensus Recommendations on Training and Competing in the Heat. *Sports Medicine*, 45(7), pp.925–938.
- Racinais, S. et coll., 2004. Time-of-day effects in maximal anaerobic leg exercise in tropical environment: a first approach. *International journal of sports medicine*, 25(3), pp.186–90.
- Randall, C.A., Ross, E.Z. & Maxwell, N.S., 2015. Effect of Practical Precooling on Neuromuscular Function and 5-km Time-Trial Performance in Hot, Humid Conditions Among Well-Trained Male Runners. *Journal of strength and conditioning research*, 29(7), pp.1925–36.
- Ravanelli, N.M. et coll., 2014. Do greater rates of body heat storage precede the accelerated reduction of self-paced exercise intensity in the heat? *European journal of applied physiology*, 114(11), pp.2399–410.
- Riera, F. et coll., 2014. Physical and perceptual cooling with beverages to increase cycle performance in a tropical climate. *PloS one*, 9(8), p.e103718.
- Riera, F. et coll., 2016. Precooling does not Enhance the Effect on Performance of Midcooling with Ice-Slush/Menthol. *International journal of sports medicine*.

- Roberts, L.A. et coll., 2014. Cold water immersion enhances recovery of submaximal muscle function following resistance exercise. *American journal of physiology. Regulatory, integrative and comparative physiology*, (22), p.ajpregu.00180.2014.
- Roberts, L. a et coll., 2015. Post-exercise cold water immersion attenuates acute anabolic signalling and long-term adaptations in muscle to strength training. *The Journal of Physiology*, 18.
- Ross, M.L.R., Garvican, L.A., et coll., 2011. Novel precooling strategy enhances time trial cycling in the heat. *Medicine and Science in Sports and Exercise*.
- Ross, M.L.R., Garvican, L. a, et coll., 2011. Novel precooling strategy enhances time trial cycling in the heat. *Medicine and science in sports and exercise*, 43(1), pp.123–33.
- Rowell, G.J. et coll., 2009. Effects of cold-water immersion on physical performance between successive matches in high-performance junior male soccer players. *Journal of sports sciences*, 27(6), pp.565–73.
- Ruskin, D.N., Anand, R. & LaHoste, G.J., 2007. Menthol and nicotine oppositely modulate body temperature in the rat. *European Journal of Pharmacology*, 559(2–3), pp.161–164.
- Saunders, A.G. et coll., 2005. The effects of different air velocities on heat storage and body temperature in humans cycling in a hot, humid environment. *Acta Physiologica Scandinavica*, 183(3), pp.241–255.
- Sawka, M.N., Cheuvront, S.N. & Kenefick, R.W., 2015. Hypohydration and Human Performance: Impact of Environment and Physiological Mechanisms. *Sports Medicine*, 45(S1), pp.51–60.
- Sawka, M.N., Montain, S.J. & Latzka, W.A., 2001. Hydration effects on thermoregulation and performance in the heat. *Comparative Biochemistry and Physiology - A Molecular and Integrative Physiology*, 128(4), pp.679–690.
- Schaal, K. et coll., 2015. Whole-Body Cryostimulation Limits Overreaching in Elite

- Synchronized Swimmers. *Medicine and science in sports and exercise*, 47(7), pp.1416–25.
- Schäfer, K., Braun, H.A. & Isenberg, C., 1986. Effect of menthol on cold receptor activity. Analysis of receptor processes. *The Journal of general physiology*, 88(6), pp.757–76.
- Schlader, Z.J. et coll., 2011. Skin temperature as a thermal controller of exercise intensity. *European Journal of Applied Physiology*, 111(8), pp.1631–1639.
- Schlader, Z.J. et coll., 2011. The independent roles of temperature and thermal perception in the control of human thermoregulatory behavior. *Physiology & behavior*, 103(2), pp.217–24.
- Schmit, C. et coll., 2017. Heat-acclimatization and pre-cooling: a further boost for endurance performance? *Scandinavian journal of medicine & science in sports*, 27(1), pp.55–65.
- Schmit, C. et coll., 2015. Heat-acclimatization and pre-cooling: A further boost for endurance performance? *Scandinavian Journal of Medicine and Science in Sports*, pp.55–65.
- Schulze, E. et coll., 2015. Effect of thermal state and thermal comfort on cycling performance in the heat. *International journal of sports physiology and performance*, 10(5), pp.655–663.
- Shapiro, Y., Moran, D. & Epstein, Y., 1998. Acclimatization strategies--preparing for exercise in the heat. *International journal of sports medicine*, 19 Suppl 2, pp.S161-3.
- Siegel, R. et coll., 2011. Pre-cooling with ice slurry ingestion leads to similar run times to exhaustion in the heat as cold water immersion. , (July 2012), pp.37–41.
- Siegel, R. & Laursen, P.B., 2012. Keeping Your Cool Heat with Internal Cooling Methods. , 42(2), pp.89–98.
- Sönmez, G. et coll., 2010. Effects of oral supplementation of mint extract on muscle pain and blood lactate. *Biomedical Human Kinetics*, 2, pp.66–69.

- St Clair Gibson, A. et coll., 2004. Evidence for complex system integration and dynamic neural regulation of skeletal muscle recruitment during exercise in humans. *British Journal of Sports Medicine*, 38(6), pp.797–806.
- Stamford BA, N.B., 1974. Metabolic cost and perception of effort during bicycle ergometer work performance. *Med Sci Sports.*, 6(226), p.31.
- Stanek, A. et coll., 2015. Can Whole-Body Cryotherapy with Subsequent Kinesiotherapy Procedures in Closed Type Cryogenic Chamber Improve BASDAI, BASFI, and Some Spine Mobility Parameters and Decrease Pain Intensity in Patients with Ankylosing Spondylitis? *BioMed research international*, 2015, p.404259.
- Stanley, J., Leveritt, M. & Peake, J.M., 2010. Thermoregulatory responses to ice-slush beverage ingestion and exercise in the heat. *European Journal of Applied Physiology*.
- Stevens, C.J. et coll., 2017a. A Comparison of Mixed-Method Cooling Interventions on Preloaded Running Performance in the Heat. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 31(3), pp.620–629.
- Stevens, C.J. et coll., 2017b. A Comparison of Mixed-Method Cooling Interventions on Preloaded Running Performance in the Heat. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 31(3), pp.620–629.
- Stevens, C.J. & Best, R., 2017. Menthol: A Fresh Ergogenic Aid for Athletic Performance. *Sports medicine (Auckland, N.Z.)*, 47(6), pp.1035–1042.
- Stofan, J.R. et coll., 2005. Sweat and sodium losses in NCAA football players: A precursor to heat cramps? *International Journal of Sport Nutrition and Exercise Metabolism*, 15(6), pp.641–652.
- Sunderland, C., Morris, J.G. & Nevill, M.E., 2008. A heat acclimation protocol for team sports. *British journal of sports medicine*, 42(5), pp.327–333.
- Sutkowy, P. et coll., 2014. Physical exercise combined with whole-body cryotherapy in

- evaluating the level of lipid peroxidation products and other oxidant stress indicators in kayakers. *Oxidative medicine and cellular longevity*, 2014, p.402631.
- Sutkowy, P. et coll., 2015. Postexercise impact of ice-cold water bath on the oxidant-antioxidant balance in healthy men. *BioMed research international*, 2015, p.706141.
- Tajino, K. et coll., 2007. Application of menthol to the skin of whole trunk in mice induces autonomic and behavioral heat-gain responses. *American journal of physiology. Regulatory, integrative and comparative physiology*, 293(5), pp.R2128-35.
- Tajino, K. et coll., 2011. Cooling-sensitive TRPM8 is thermostat of skin temperature against cooling. *PloS one*, 6(3), p.e17504.
- Takeda, M. et coll., 2014. The effects of cold water immersion after rugby training on muscle power and biochemical markers. *Journal of sports science & medicine*, 13(3), pp.616–23.
- Tatterson, A.J. et coll., 2000. Effects of heat stress on physiological responses and exercise performance in elite cyclists. *Journal of Science and Medicine in Sport*, 3(2), pp.186–193.
- Topp, R., Winchester, L., et coll., 2011. Comparison of the effects of ice and 3.5% menthol gel on blood flow and muscle strength of the lower arm. *Journal of sport rehabilitation*, 20(3), pp.355–66.
- Topp, R., Winchester, L.J., et coll., 2011. Effect of topical menthol on ipsilateral and contralateral superficial blood flow following a bout of maximum voluntary muscle contraction. *International journal of sports physical therapy*, 6(2), pp.83–91.
- Trong, T.T. et coll., 2015. Ingestion of a cold temperature/menthol beverage increases outdoor exercise performance in a hot, humid environment. *PLoS ONE*, 10(4), pp.1–11.
- Tucker, K. et coll., 2012. Similar alteration of motor unit recruitment strategies during the anticipation and experience of pain. *Pain*, 153(3), pp.636–643.

- Tucker, R. et coll., 2004. Impaired exercise performance in the heat is associated with an anticipatory reduction in skeletal muscle recruitment. , pp.422–430.
- Tucker, R. et coll., 2006. The rate of heat storage mediates an anticipatory reduction in exercise intensity during cycling at a fixed rating of perceived exertion. *The Journal of Physiology*, 574(3), pp.905–915.
- Uckert, S. & Joch, W., 2007. Effects of warm-up and precooling on endurance performance in the heat. *British journal of sports medicine*, 41(6), pp.380–4.
- Umezu, T., 2010. Evidence for dopamine involvement in ambulation promoted by pulegone in mice. *Pharmacology Biochemistry and Behavior*, 94(4), pp.497–502.
- Umezu, T., Sakata, A. & Ito, H., Ambulation-promoting effect of peppermint oil and identification of its active constituents. *Pharmacology, biochemistry, and behavior*, 69(3–4), pp.383–90.
- Vaile, J. et coll., 2008a. Effect of cold water immersion on repeat cycling performance and thermoregulation in the heat. *Journal of Sports Sciences*, 26(5), pp.431–440.
- Vaile, J. et coll., 2008. Effect of hydrotherapy on recovery from fatigue. *International journal of sports medicine*, 29(7), pp.539–44.
- Vaile, J. et coll., 2008b. Effect of hydrotherapy on the signs and symptoms of delayed onset muscle soreness. *European journal of applied physiology*, 102(4), pp.447–55.
- Vaile, J.M., Gill, N.D. & Blazevich, A.J., 2007. The Effect of Contrast Water Therapy on Symptoms of Delayed Onset Muscle Soreness. *The Journal of Strength and Conditioning Research*, 21(3), p.697.
- Valente, A. et coll., 2015. The absorption and metabolism of a single L-menthol oral versus skin administration: Effects on thermogenesis and metabolic rate. *Food and Chemical Toxicology*, 86, pp.262–273.

- Vargas, N. & Marino, F., 2016. Heat stress, gastrointestinal permeability and interleukin-6 signaling — Implications for exercise performance and fatigue. *Temperature*, 3(2), pp.240–251.
- Versey, N.G., Halson, S.L. & Dawson, B.T., 2012. Effect of contrast water therapy duration on recovery of running performance. *International journal of sports physiology and performance*, 7(2), pp.130–40.
- Versey, N.G., Halson, S.L. & Dawson, B.T., 2013. Water Immersion Recovery for Athletes: Effect on Exercise Performance and Practical Recommendations. *Sports Medicine*, 43(11), pp.1101–1130.
- Vihma, T., 2010. Effects of weather on the performance of marathon runners. *International journal of biometeorology*, 54(3), pp.297–306.
- Voltaire, B. et coll., 2002. Effect of fourteen days of acclimatization on athletic performance in tropical climate. *Canadian journal of applied physiology = Revue canadienne de physiologie appliquee*, 27(6), pp.551–562.
- Wall, B.A. et coll., 2015. Current hydration guidelines are erroneous: dehydration does not impair exercise performance in the heat. *British journal of sports medicine*, 49(16), pp.1077–83.
- Wegmann, M. et coll., 2012. Pre-Cooling and Sports Performance. , 42(7), pp.545–564.
- White, G.E. & Wells, G.D., 2013. Cold-water immersion and other forms of cryotherapy: physiological changes potentially affecting recovery from high-intensity exercise. *Extreme physiology & medicine*, 2(1), p.26.
- Wijayanto, T. et coll., 2017. Cognitive performance during passive heat exposure in Japanese males and tropical Asian males from Southeast Asian living in Japan. *Journal of Physiological Anthropology*, 36(1), p.8.
- Wingfield, G.L. et coll., 2016. The effect of high versus low intensity heat acclimation on

- performance and neuromuscular responses. *Journal of Thermal Biology*, 58, pp.50–59.
- Yamazaki, F. & Hamasaki, K., 2003. Heat acclimation increases skin vasodilation and sweating but not cardiac baroreflex responses in heat-stressed humans. *Journal of applied physiology (Bethesda, Md. : 1985)*, 95(4), pp.1567–74.
- Yanagisawa, O. et coll., 2007. Effects of cooling on human skin and skeletal muscle. *European Journal of Applied Physiology*.
- Yeo, Z.W. et coll., 2012. Ice slurry on outdoor running performance in heat. *International Journal of Sports Medicine*.
- Yeo, Z.W. et coll., 2012. Ice Slurry on Outdoor Running Performance in Heat. , pp.859–866.
- Yosipovitch, G. et coll., 1996. Effect of topically applied menthol on thermal, pain and itch sensations and biophysical properties of the skin. *Archives of dermatological research*, 288(5–6), pp.245–8.
- Zhang, F. & de Dear, R., 2016. University students' cognitive performance under temperature cycles induced by direct load control events. *Indoor Air*, pp.78–93.
- Ziemann, E. et coll., Five-day whole-body cryostimulation, blood inflammatory markers, and performance in high-ranking professional tennis players. *Journal of athletic training*, 47(6), pp.664–72.

ANNEXES

Sensation thermique

Description

Valeur numérique

1

2

3

4

5

ud

6

7

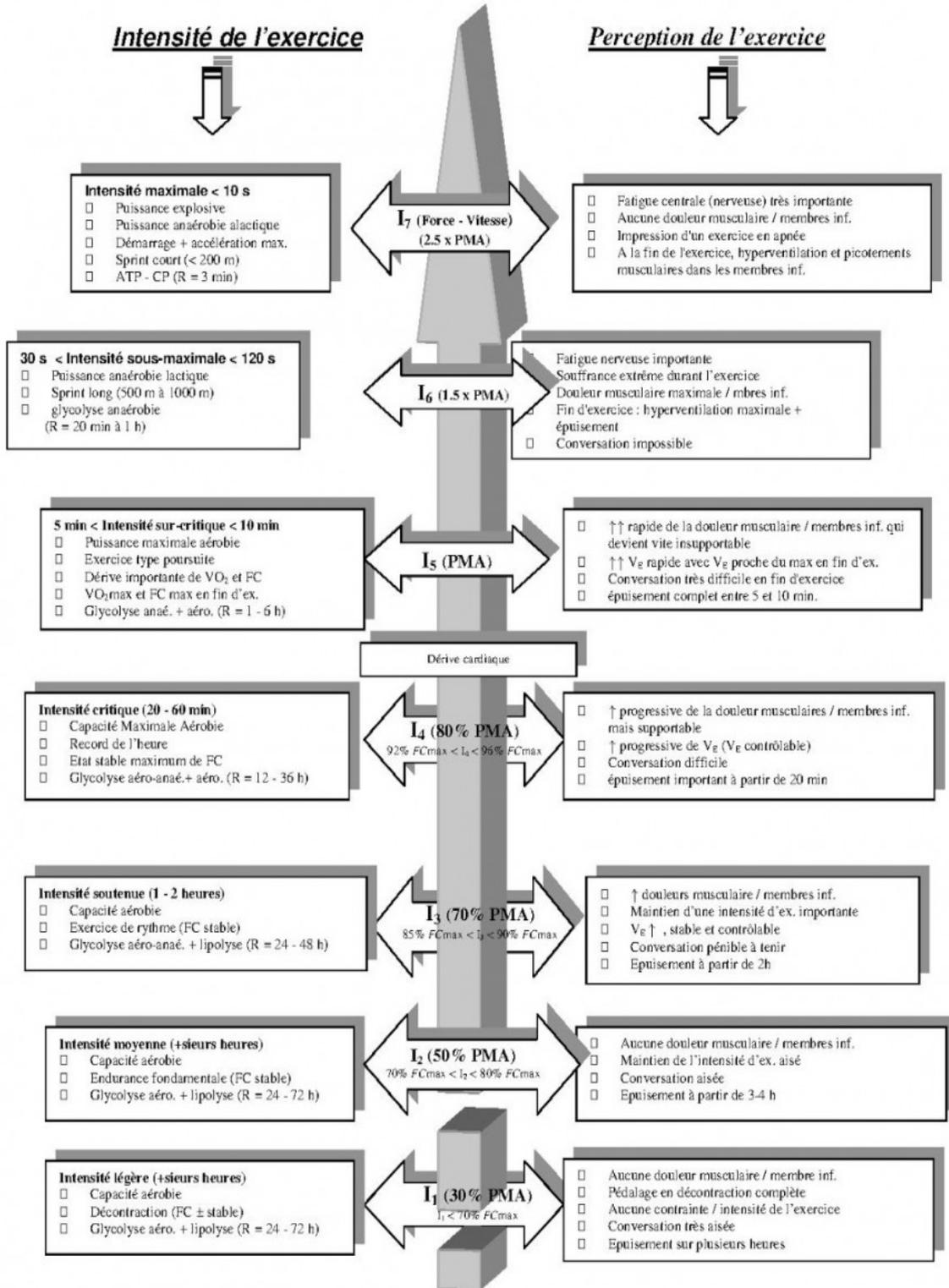
Confort thermique

Description	Valeur numérique
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

Echelle d'Estimation Subjective de l'Intensité de l'Exercice (échelle d'ESIE, Grappe et al.)



Congrès :

- Novembre 2016 : Présentation orale lors du 20ème General assembly and biennial meeting CARIBBEAN ACADEMY OF SCIENCES : « *Effect of cold menthol water immersion on recovery in tropical climat* ».
- Octobre 2017 : Présentation Poster à : ACAPS-Dijon : « *La performance sur une heure d'exercice en climat tropical est améliorée par l'effet d'un pré-cooling glace pilée-menthol associé à un cooling eau froide-menthol* ».

Collaboration hors thèse :

- Perceiving red decreases motor performance over time: A pilot study. Brice W; Rinaldi K; Riera F; Trong TT; Hue O. European review of applied psychology; 2015; volume 65 Issue 6 page 301-305 ISSN: 11629088
- Ingestion of a cold temperature/menthol beverage increases outdoor exercise performance in a hot, humid environment. Tran Trong T, Riera F, Rinaldi K, Briki W, Hue O. PLoS One. 2015 Apr 9;10(4):e0123815. doi: 10.1371/journal.pone.0123815. eCollection 2015.
- Precooling does not enhance the effect of midcooling with ice-slush/menthol on performance. Riera F; Trong TT; Rinaldi K; Hue O. International Journal of Sports Medicine (IJSM)-2016; ISSN: 1439-3964; PMID: 27706550.

PUBLICATIONS

Immersion with menthol improves recovery between 2 cycling exercises in hot and humid environment

Kévin Rinaldi, Than Tran Trong, Florence Riera, Katharina Appel, and Olivier Hue

Abstract: Endurance exercise performance is impaired in a hot and humid environment. This study compared the effects of cold water immersion, with (CMWI) and without (CWI) menthol, on the recovery of cycling performance. Eight heat-acclimatized cyclists (age, 24.1 ± 4.4 years; mass, 65.3 ± 5.2 kg) performed 2 randomized sessions, each consisting of a 20-min cycling trial (T1) followed by 10 min of immersion during recovery and then a second 20-min cycling trial (T2). Mean power output and perceived exertion (RPE) were recorded for both trials. Rectal (T_{rec}) and skin temperatures were measured before and immediately after T1, immersion, and T2. Perceived thermal sensation (TS) and comfort were measured immediately after T1 and T2. Power output was significantly improved in T2 compared with T1 in the CMWI condition (+15.6%). Performance did not change in the CWI condition. After immersion, T_{rec} was lower in CWI (-1.17 °C) than in CMWI (-0.6 °C). TS decreased significantly after immersion in both conditions. This decline was significantly more pronounced in CMWI (5.9 ± 1 to 3.6 ± 0.5) than in CWI (5.6 ± 0.9 to 4.4 ± 1.2). In CMWI, RPE was significantly higher in T1 (6.57 ± 0.9) than in T2 (5.14 ± 1.25). However, there was no difference in TC. This study suggests that menthol immersion probably (i) improves the performance of a repeated 20-min cycling bout, (ii) decreases TS, and (iii) impairs thermoregulation processes.

Key words: performance, constant duration exercise trials, cold water, hot and humid climate, cycling, menthol, recovery.

Résumé : La performance au cours d'un exercice d'endurance est altérée dans un environnement chaud et humide. Dans cette étude, on compare les effets de l'immersion en eau froide avec (« CMWI ») et sans menthol (« CWI ») sur la récupération d'une épreuve à vélo. Huit cyclistes acclimatés à la chaleur (âge : $24,1 \pm 4,4$ ans; masse : $65,3 \pm 5,2$ kg) participent de façon aléatoire à deux essais de 20 min à vélo (« T1 » et « T2 ») intercalés de 10 min de récupération en immersion. On enregistre la production moyenne de puissance et l'intensité de l'effort perçue (« RPE ») en T1 et T2. On mesure les températures rectale (« T_{rec} ») et cutanées avant et immédiatement après T1, l'immersion et T2. On évalue la sensation thermique (« TS ») et le confort thermique immédiatement après T1 et T2. La production de puissance est significativement augmentée en T2 comparativement à T1 dans la condition CMWI (+15,6 %). On n'observe pas de modification de performance dans la condition CWI. Après l'immersion, T_{rec} est plus basse dans la condition CWI ($-1,17$ °C) que dans la condition CMWI ($-0,6$ °C). TS diminue significativement après l'immersion dans les deux conditions; la diminution est significativement plus marquée dans la condition CMWI (de $5,9 \pm 1$ à $3,6 \pm 0,5$) que dans la condition CWI (de $5,6 \pm 0,9$ à $4,4 \pm 1,2$). Dans la condition CMWI, RPE est significativement plus élevée en T1 ($6,57 \pm 0,9$) qu'en T2 ($5,14 \pm 1,25$); toutefois, TC ne présente pas de différence. D'après cette étude, l'immersion dans un bain contenant du menthol (i) suscite probablement une augmentation de la performance dans un deuxième essai de 20 min, (ii) abaisse TS et (iii) entrave les processus thermorégulateurs.

Mots-clés : performance, essais d'égalité durée, eau froide, climat chaud et humide, cyclisme, menthol, récupération.

Introduction

Performance in aerobic sports like running (Vihma 2010, Maughan 2010) and cycling (Peiffer and Abbiss 2011) deteriorates in hot conditions and is increasingly affected as the temperature rises (Davies et al. 2016). The negative effects are even more striking when the relative humidity is high (Maughan et al. 2012). Indeed, the hot and humid environment, which is characterized by a constant temperature (25–26 °C) and high mean relative humidity (80%–82%), has been shown to be an unsustainable challenge in aerobic events (Hue 2011).

Many factors contribute to the decrease in endurance performance in hot and humid conditions, although the exact causes are not well known. One of the most well-described factors is thermoregulation, which can induce changes in cardiovascular

processes (González-Alonso et al. 2008) and increase the sweating rate, thereby causing uncompensable water loss. Furthermore, decreases in blood volume and the blood volume dedicated to active muscles further impair performance. Other authors have suggested that an anticipatory strategy is involved in the performance decrease: in this case, the central nervous system (CNS) regulates the exercise intensity to limit excessive hyperthermia (Noakes 2012). A critical core temperature has also been proposed as a limiting factor in uncompensable heat stress (Nielsen et al. 1993; Cheung 2010). However, humidity alone has an impact on performance: it has been shown that the higher the humidity, the more greatly the performance will be negatively impacted (Maughan et al. 2012).

One way to counteract the negative effects of the hot and humid environment is cold water immersion (CWI). Cold treatment en-

Received 11 August 2017. Accepted 21 December 2017.

K. Rinaldi, T.T. Trong, K. Appel, and O. Hue. Laboratoire ACTES (EA3596), Université des Antilles, BP 250, 97157 Pointe-à-Pitre, Guadeloupe, French West Indies.

F. Riera. Laboratoire LEPSA (EA4604), Université de Perpignan Via Domitia, Font-Romeu, France.

Corresponding author: Kévin Rinaldi (email: kevinrinaldi@hotmail.com).

Copyright remains with the author(s) or their institution(s). Permission for reuse (free in most cases) can be obtained from [RightsLink](#).

Appl. Physiol. Nutr. Metab. 00: 1–7 (0000) dx.doi.org/10.1139/apnm-2017-0525

Published at www.nrcresearchpress.com/apnm on 13 March 2018.

ables better recovery (Roberts et al. 2014) and lower rectal temperature than mock immersion (Clements et al. 2002) for a single bout of exercise. Yet although CWI has a positive effect on recovery (Versey et al. 2013), the effect of immersion between 2 successive exercise bouts has not been studied much. Recently, Christensen and Bangsbo (2016) showed that CWI recovery (15 min at 15 °C) did not lead to better subsequent performance in a simulated competition (2 maximal ~4-min efforts separated by 3 h). Vaile et al. (2008) showed that 3 water immersion conditions (10 °C, 15 °C, 20 °C) were effective in reducing thermal strain and more effective than active recovery in maintaining subsequent high-intensity cycling performance. Similarly, a 5-min CWI recovery (14 °C) significantly lowered rectal temperature and maintained endurance performance during subsequent high-intensity exercise (Peiffer et al. 2010).

Menthol has also been used to improve performance in the hot and humid environment. In neutral conditions, Eccles (1994) showed that menthol stimulates cold receptors and, when applied to the skin and mucosal surfaces, exerts a cooling sensation similar to that of a cold water spray to the face. When used in a warm (wet or not) climate, it might therefore help exercise performance, as suggested (Mündel and Jones 2010). Cold menthol beverages have also been shown to be the best internal method for lowering the negative effects of tropical climate on endurance performance (Riera et al. 2014; Trong et al. 2015) by their action on the CNS and several factors such as thermal sensation (TS) or thermal comfort (TC). Moreover, it was recently demonstrated (Riera et al. 2014; Trong et al. 2015) that menthol in neutral-temperature beverages during exercise in tropical conditions mimics the cold sensation, thus lowering the anticipatory processes. Although the positive effects of menthol on performance have been shown, by both cutaneous application and ingestion, no study has ever used menthol added to cold immersion during recovery in a tropical environment. Yet, the same thermoreceptors may be affected by cutaneous application and immersion, in which case menthol in cold water should optimize performance as assessed by several parameters, such as thermal sensation or body temperature (Trong et al. 2015). It was suggested that the action of menthol on thermoreceptors has an important role in the negative feedback from the CNS (Ruskin et al. 2007), which in turn modifies the recruitment of motor units to achieve better performance.

The aim of the current study was to determine the effect of cold water immersion with menthol on repeated 20-min cycling performance in tropical climate. We hypothesized that immersion in a combination of menthol and cold water would improve recovery (and performance of successive exercise) more than immersion in cold water without menthol by the action of menthol on the skin.

Materials and methods

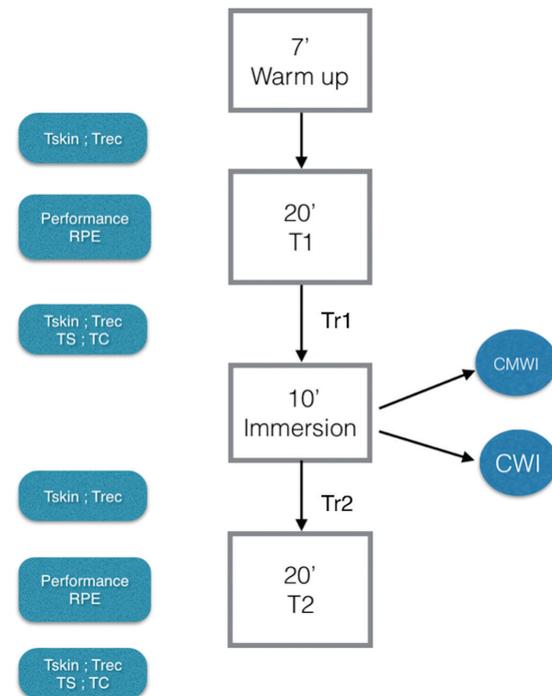
Subjects

Eight heat-acclimatized elite road cyclists (age: 24.1 ± 4.4 years; weight: 65.3 ± 5.2 kg; maximal aerobic power: 321 ± 41 W) were recruited from among Guadeloupien cycling teams. These male cyclists competed regularly in professional and elite road races. They were training for at least 15 h per week at the time of the study. All cyclists 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.

Experimental design

The experimental sessions were separated by 7 days and were undertaken in a randomized crossover design. The athletes were instructed to avoid training during the 24-h period prior to testing but they were authorized to perform 60 min of light-intensity

Fig. 1. Experimental procedures with 7-min (7') warm-up during which thermal sensation (TS) and thermal comfort (TC) were monitored, followed by two 20-min (20') trials (T1 and T2) during which power output (PO) and skin and rectal temperatures (T_{skin} and T_{rec}) were measured. CMWI, cold menthol water immersion; CWI, cold water immersion; RPE, rating of perceived exertion.



exercise 48 h before each session. All sessions began at the same time of day for all cyclists (between 1100 and 1400 h) to limit circadian variations in temperature and hormone secretion. As the same bathtub was used for each session, it was cleaned to avoid contamination with menthol. In addition, sessions with menthol were separated from those without menthol by 24 h. Randomization was preserved.

Experimental procedures

The experimental sessions were performed outdoors in the hot and humid conditions of Guadeloupe, French West Indies (wet-bulb globe temperature (WBGT): mean ± SD; outdoor temperature, 29.1 ± 1.5 °C; relative humidity, 62% ± 4%), and the cyclists were protected from the wind to limit its impact on temperature regulation. Each cyclist performed 2 randomized sessions. The experimental sessions (Fig. 1) included 7 min of warm-up with cycling at a freely chosen cadence, followed by two 20-min cycling trials (T1 and T2) interspersed with a 10-min immersion in (i) cold water (CWI) or (ii) cold menthol water (CMWI). Seven minutes of transition (Tr1 and Tr2) were interspersed between the T1 and T2 immersions. The exercise bouts were performed with fixed resistance. To adjust intensity, the athletes had to increase their cadence.

Measurements

The environmental conditions were measured using a portable WBGT meter (HD 32.2; Delta Ohm, Caselle di Selvazzano, Italy).

Perceived TS, perceived TC, and rating of perceived exertion (RPE) were recorded after each trial. TS and TC were determined with a scale ranking adapted from Hodder and Parsons (2007). To assess perceived effort, a 9-point scale (Stamford and Noble 1974) was used, with “not at all hard” scored as 2 and “very, very hard” scored as 8. Rectal temperature (T_{rec}) was continuously monitored with a rectal probe (YSI409 AC; Yellow Springs Instruments, Yellow Springs, Ohio, USA) inserted 10 cm beyond the anal sphincter. Skin temperature (T_{skin}) was recorded by a cutaneous thermometer (YSI427; Yellow Springs Instruments). In this study, we used the formula of Mitchell and Wyndham (1969) with 4 points:

$$T_{skin} = 0.3(T_{thorax} + T_{arm}) + 0.2(T_{front} + T_{leg})$$

where T_{thorax} , T_{arm} , T_{front} , and T_{leg} are thorax, arm, front, and leg temperature, respectively, in °C.

The cycling trials were performed on the cyclists' own bicycles fixed on a cycle trainer (Tacx Satori T1856; Tacx B, Wassenaarn, the Netherlands) and power output (PO) was monitored continuously during exercises.

The water temperature was continuously monitored during immersion. For both conditions, the water temperature was 10 °C and the menthol concentration was 0.1% for CMWI. The cyclists were immersed up to the shoulders, lying in the water.

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 performance, T_{rec} and T_{skin} as a function of trial (before vs. after immersion independently of condition), time and condition (menthol vs. no menthol) were analyzed with a 3-way ANOVA with repeated measures (i.e., condition \times trial \times time). TS, TC, and RPE were analyzed with a 2-way ANOVA with repeated measures (i.e., time \times condition). Tukey's post hoc test was used when required. Data analysis was performed using IBM SPSS (version 19.0; IBM Corp., Armonk, N.Y., USA). Significance was set at $P < 0.05$. All data are presented as means \pm SD.

Results

Performance

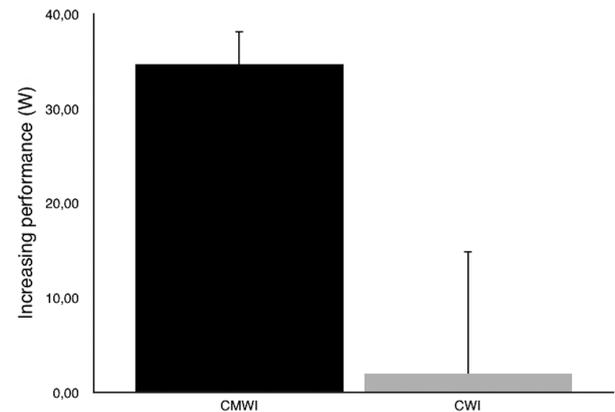
Global performance (T1 + T2 for CWI vs. T1 + T2 for CMWI) was not statistically affected by the condition: cyclists performed at 240.1 ± 42.9 W in CMWI versus 258.2 ± 52.4 W in CWI.

Performance was not affected by trial: independently of condition, T1 (240.0 W \pm 56.6 W) and T2 (258.3 W \pm 37.0 W) were not significantly different. However, the PO was significantly affected by time ($P < 0.05$): PO evolved differently independently of condition. Furthermore, PO was significantly affected by condition \times trial ($P < 0.038$): performance evolved differently after immersion depending on the condition (Fig. 2): PO improved significantly ($P < 0.05$) in CMWI ($+34.7 \pm 3.5$ W, corresponding to $+15.6\%$) after immersion but not in CWI ($+2 \pm 13$ W).

Temperatures

T_{rec} was not affected by trial (before vs. after immersion independently of condition). During sessions, T_{rec} increased over time ($P < 0.001$). We noted a significant time \times trial interaction ($P < 0.05$). The increase was more pronounced before than after immersion ($+1.81 \pm 0.7$ °C and 0.13 ± 0.8 °C, respectively). However, T_{rec} was significantly affected by condition ($P < 0.024$): in CMWI T_{rec} was significantly higher (38.8 ± 0.4 °C) than in CWI (38.1 ± 0.5 °C). Furthermore, condition \times trial was significantly affected by immersion ($P < 0.05$) (Fig. 3): in CMWI, T_{rec} decreased by only 0.6 °C and it decreased by nearly twice that (i.e., 1.17 °C) in CWI.

Fig. 2. The increase in mean power output (PO) during the trial 2 (T2) as opposed to the PO increase during trial 1 (T1). PO was significantly increased in CMWI ($+34.7 \pm 3.5$ W) but no difference between trials was observed for CWI ($+2 \pm 13$ W). The data correspond to the increase in watts during T2 compared with T1. CMWI, cold menthol water immersion; CWI, cold water immersion.



Mean T_{skin} was not affected by condition (Fig. 4). However, T_{skin} was significantly impacted by trial ($P < 0.001$): after immersion, independently of condition, T_{skin} was significantly lower than before immersion (31.8 ± 3.7 °C vs. 35.7 ± 1.3 °C, respectively). T_{skin} was also affected by time ($P < 0.001$) with a significant increase during cycling sessions and a decrease after immersion. When expressed by time \times trial, T_{skin} was significantly affected by immersion ($P < 0.001$), with the increase in T_{skin} during the cycling trials significantly greater after than before immersion.

Sensations

No difference was found for TC between the 2 conditions.

RPE was significantly higher in T1 (6.57 ± 0.9) than T2 (5.14 ± 1.25) for the CMWI condition ($P < 0.05$). However, there was no difference for RPE in CWI.

We observed an effect of time on thermal sensation (Fig. 5): TS significantly decreased independently of condition ($P < 0.004$). Also, TS had a significant time \times condition effect ($P < 0.004$): TS decreased after T2 in both conditions compared with end of T1. This decrease was significantly ($P < 0.004$) more pronounced in CMWI (5.9 ± 1 to 3.6 ± 0.5) than in CWI (5.6 ± 0.9 to 4.4 ± 1.2).

Discussion

This study demonstrated that (i) the core temperature was less decreased with menthol because of a decrease in the thermoregulatory processes; but (ii) the perceived cooling was increased, as reflected by a more pronounced decrease in TS in CMWI than in CWI; and (iii) this increase in perceived cooling had an impact on performance, as the PO was improved after CMWI but not after CWI.

Performance

PO was significantly affected by condition \times trial: in CMWI, PO significantly improved after immersion compared with the first trial. However, no difference in PO was measured in CWI.

Tucker et al. (2004) showed that subjects under exogenous and endogenous heat stress lowered their PO during exercise, even though central temperatures did not reach critical values. These authors (Tucker et al. 2004) hypothesized that an anticipatory mechanism was involved to limit the heat storage related to metabolic production and environmental stress. The higher performance in T2 for CMWI suggests that menthol limited the anticipatory mechanism, which further improved the PO. As it

Fig. 3. Rectal temperature (T_{rec}) at each moment of the protocol: before T1 (T0), during the transition between T1 and immersion (Tr1), during transition between immersion and T2 (Tr2), and after T2 (End). At each moment, T_{rec} was higher for menthol condition (CMWI) than for the no-menthol condition (CWI). T1, trial 1; T2, trial 2. *, T_{rec} increased over time ($P < 0.001$) for each condition. †, T_{rec} was significantly higher ($P < 0.024$) for CMWI (38.8 ± 0.4 °C) than CWI (38.1 ± 0.5 °C).

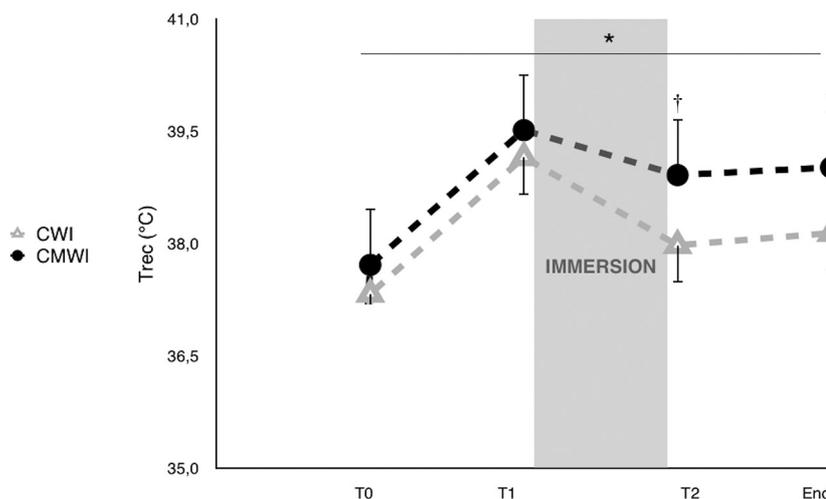
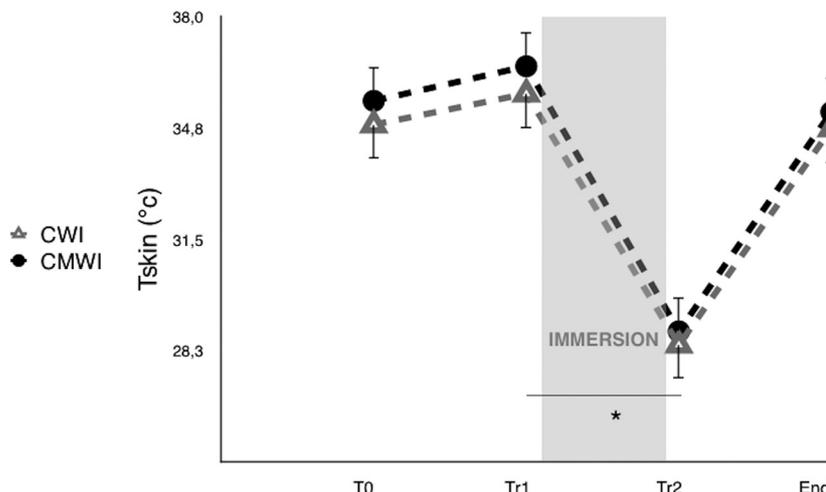


Fig. 4. Skin temperature (T_{skin}) was significantly impacted by the moment: independently of condition (menthol condition (CMWI) or no-menthol condition (CWI)), temperature decreased after immersion ($P < 0.001$) and time \times moment ($P < 0.01$). end, end of the session; T0, start of the session; Tr1, Tr2, trials 1 and 2, respectively.



was in contact with the skin, the menthol might have activated 2 skin receptors: TRPM8 and TRPA1. Activation of TRPM8 induces a lower thermal sensation, whereas TRPA1 is a pain detection molecule (Macpherson et al. 2006). These receptors have an analgesic effect through both peripheral and central mechanisms (Pan et al. 2012), which increases performance and probably limits the anticipatory mechanism.

Parkin et al. (1999) showed that higher rectal temperatures are associated with decreased exercise performance in warm environments. However, the attenuated decrease in T_{rec} after menthol immersion did not affect performance in our study. The combination of cold water and menthol possibly reduced the effect of perceived heat on PO. This was corroborated by the RPE and TS, which decreased significantly in CMWI but not in CWI. Moreover, lower TS in the second trial after menthol immersion may explain the improved PO: applying menthol to the skin alters the feeling of heat in the direction of reduced TS (Gillis et al. 2010). The lower TS may thus explain the lower RPE. Recently it was shown that lower TS is associated with increased performance (Baillot et al. 2014; Riera et al. 2014; Peiffer and Abbiss 2011). These studies con-

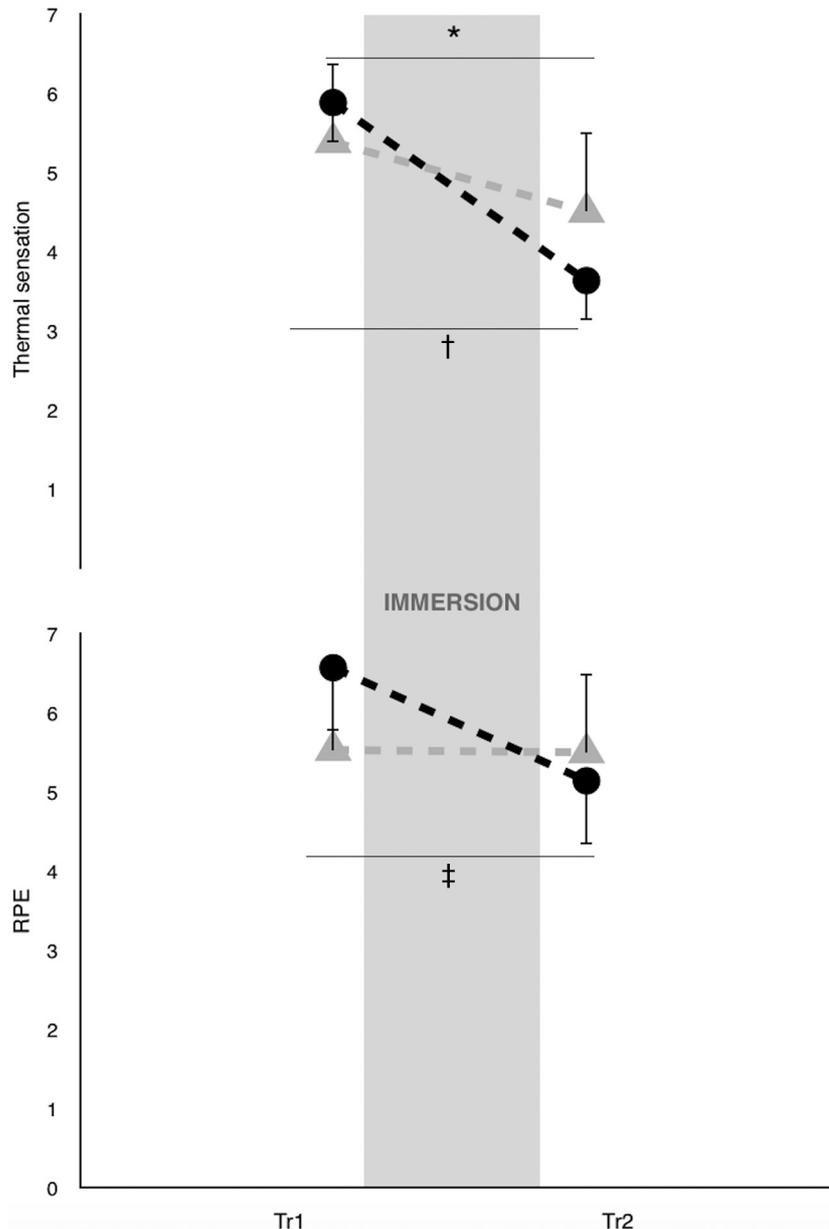
firmed that perceived cooling is beneficial to performance (Baillot et al. 2014; Riera et al. 2014) and that heat storage is not the main factor. In fact, Baillot et al. (2014) and Friesen et al. (2018) showed that the decrease in performance in a hot (or tropical) environment was not due to the rate of heat storage.

Another possible explanation for these effects is that menthol, by its vasoconstrictor action, also limits muscular cooling, which could therefore have a direct effect on its efficiency during the second effort.

T_{skin}

In the 2 conditions, T_{skin} was significantly lower after immersion ($P < 0.05$). This result clearly demonstrates that cold water immersion decreased T_{skin} independently of the condition (CMWI or CWI). Schlader et al. (2011) suggested that T_{skin} influences the choice of cycling cadence, i.e., the intensity of exercise, by decreasing the perception of exercise effort at a given exercise intensity. Therefore, T_{skin} seems to be part of a feedback mechanism to the CNS, which regulates exercise intensity (Schlader et al. 2011).

Fig. 5. Thermal sensation was significantly lower at the end of the second trial (T2) than the first trial (T1) for both conditions, menthol (CMWI) and no-menthol (CWI) (*, $P < 0.05$), but this decrease was significantly more pronounced in CMWI (†, $P < 0.004$); rating of perceived exertion (RPE) was significantly higher in T1 (6.57 ± 0.9) than T2 (5.14 ± 1.25) for CMWI (‡, $P < 0.05$).



This would partially explain the pacing strategy in CWI. The decrease in T_{skin} prompted the cyclists to choose the same intensity in T2 as in T1 despite the potential fatigue induced by T1. Furthermore, it could be suggested that the decrease in T_{skin} in CMWI was not affected by menthol. In this case, only immersion had an effect on T_{skin} but this would not explain the improvement of PO in CMWI.

TS

The lower TS after immersion in the 2 conditions was probably due to the cold water immersion. High skin temperatures are associated with increased sensations of warmth and thermal discomfort (Schlader et al. 2011), and prolonged immersion in cold water thus reduced TS in the hot and humid environment. The decreased TS in this study can be explained by the reduced T_{skin} .

The decrease in TS was nevertheless more pronounced in CMWI and perceived cooling is beneficial to performance as demon-

strated by the enhanced PO. Menthol activates TRPM8 and TRPA1, which are also activated in low temperatures up to 17 °C (McKemy et al. 2002). The activation of these receptors stimulates the hypothalamus, which in turn reduces TS (Morrison and Nakamura 2011). This finding was corroborated by a study conducted in warm and humid conditions that suggested that a spray of 0.05% menthol produced cooler body sensations without measurable thermoregulatory damage during a 45-min cycling exercise at 45% of peak PO (Gillis et al. 2010). We assumed that this decrease in TS had an effect on the choice to pedal faster in T2 compared with T1 in CMWI by decreasing the effects of high values in WBGT. As recently demonstrated by Peiffer and Abbiss (2011), the lower TS in menthol condition could have improved performance.

T_{rec}

The mean T_{rec} was significantly higher in CMWI than CWI: the delta of the temperatures decreased less in CMWI than in CWI (0.6

and 1.17 °C, respectively) during immersion. One possible explanation is that the cooler TS with menthol reduced thermoregulation, thus allowing T_{rec} to increase. We assume that the action of menthol induced a modification in the feedback generated by the CNS, which thus limited the thermolytic process, including sweating. The attenuated drop in core temperature following CMWI is certainly due to peripheral vasoconstriction, resulting in decreased heat dissipation from the core. This would explain the smaller decrease in T_{rec} despite the same immersion temperature in the 2 conditions. In this study, a menthol concentration of 0.1% was used. The impact on the thermoregulatory capacity was impaired when the menthol concentration was greater than 0.2% on the skin (Gillis et al. 2010; Kounalakis et al. 2010). However, Gillis et al. (2010) showed that a 0.05% solution did not impact T_{rec} , confirming that a concentration of less than 0.2% menthol does not attenuate the increase in T_{rec} . The use of 0.1% menthol nevertheless attenuated the decrease in T_{rec} .

During T2, the increase in T_{rec} was significantly less pronounced than during T1. After immersion, T_{rec} did not return to basal level (temperature before the first trial). Furthermore, T_{rec} (peak) was lower after the second trial than the first. These results suggest that the cold immersion (10 °C for 10 min) induced physiological responses, including decreases in muscle and rectal temperatures, which limited the increases in temperature during exercise. It could be assumed that the increase in heat production was limited during T2 by the muscle cooling with immersion and that this slowed the increase in T_{rec} .

RPE

In CMWI, RPE was significantly higher in T1 than in T2 because of the effects of menthol on the TRPM8 and TRPA1 receptors. However, there was no difference for RPE in CWI. CWI can improve recovery for running or resistance exercise (Versey et al. 2013). Indeed, in CWI, the cyclists performed the second trial as well as the first, with similar RPE. It might thus be suggested that this maintenance of performance and RPE was due to the effect of immersion.

Therefore, the analgesic action of menthol may distract cyclists from pain by provoking cooling sensations, thus blocking the activity of TRPA1 (Macpherson et al. 2006). These results demonstrated that menthol was able to decrease TS, which limited the rise in RPE.

Practical applications

Immersion with menthol increases the effects of cold water immersion without reducing the immersion temperature. The implementation/application of this technique is not always easy, but it may be the most effective way to optimize the core temperature decrease/performance increase ratio in tropical climate. Although very few sports correspond to the exact protocol used in this study (20 min of exercise – 10 min of rest – 20 min of exercise), it has been suggested that the rules could be changed to permit athletes to recover using adapted methods (e.g., immersion) when thermoregulatory processes are matched by uncompensable heat stress, as encountered in the tropical climate. This has been suggested for football (Maughan 2010; Grantham 2010) and it was applied for the 2016 Davis Cup semi-finals between Canada and France in Guadeloupe, where the tennis players were allowed to use cold water immersion between training and matches to prevent heat illness. For example, even though the exercise–recovery timing would not be absolutely the same, this combination might be the most effective strategy for recovery between 2 bouts of tournament track cycling or rowing, or between bouts during team sport tournaments like football and handball. Another possible application for this method could be training sessions when several work periods are repeated. However, this method applied to other sports will have to be investigated.

Conclusion

This study suggests that cold water immersion with menthol (i) impaired thermoregulation processes, (ii) decreased thermal sensations and RPE, and (iii) improved performance of a repeated 20-min cycling bout.

The addition of menthol to 10 °C water immersion may have biased the afferent feedback from skin receptors and allowed the cyclists to improve their PO in T2 more than in T1. Cold (10 °C) menthol water immersion improved TS and RPE, which resulted in better PO compared with immersion at the same temperature without menthol because it gave the impression of greater cold. However, this process tricks the regulatory system and limits the activation of thermolysis, which concerns the heat transfer between an organism and the environment mainly by convection, radiation, or evaporation. This limitation must be taken into account in the context of performance during long-distance exercise in hot and humid environments to avoid hyperthermia.

Conflict of interest statement

The authors report no conflicts of interest associated with this manuscript.

Acknowledgements

The authors wish to thank Frederic Boudillon and Chiraz Agrebi.

References

- Baillet, M., Le Bris, S., and 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. doi:10.1055/s-0033-1349108. PMID:23868683.
- Cheung, S.S. 2010. Interconnections between thermal perception and exercise capacity in the heat. *Scand. J. Med. Sci. Sports*, 20(Suppl. 3): 53–59. doi:10.1111/j.1600-0838.2010.01209.x. PMID:21029191.
- Christensen, P.M., and Bangsbo, J. 2016. Influence of prior intense exercise and cold water immersion in recovery for performance and physiological response during subsequent exercise. *Front. Physiol.* 7(June): 269. doi:10.3389/fphys.2016.00269. PMID:27445857.
- Clements, J.M., Casa, D.J., Knight, J.C., McClung, J.M., Blake, A.S., Meenen, P.M., et al. 2002. Ice-water immersion and cold-water immersion provide similar cooling rates in runners with exercise-induced hyperthermia. *J. Athl. Train.* 37(2): 146–150. PMID:12937427.
- Davies, M.J., Clark, B., Welvaert, M., Skorski, S., Garvican-Lewis, L.A., Saunders, P., and Thompson, K.G. 2016. Effect of environmental and feedback interventions on pacing profiles in cycling: a meta-analysis. *Front. Physiol.* 7(December). doi:10.3389/fphys.2016.00591. PMID: 27994554.
- Eccles, R. 1994. Menthol and related cooling compounds. *J. Pharm. Pharmacol.* 46(8): 618–630. doi:10.1111/j.2042-7158.1994.tb03871.x. PMID:7529306.
- Friesen, B.J., Périard, J.D., Poirier, M.P., Lauzon, M., Blondin, D.P., Haman, F., and Kenny, G.P. 2018. Work rate during self-paced exercise is not mediated by the rate of heat storage. *Med. Sci. Sports Exerc.* 50(1): 159–168. doi:10.1249/MSS.0000000000001421. PMID:28902126.
- Gillis, D.J., House, J.R., and Tipton, M.J. 2010. The influence of menthol on thermoregulation and perception during exercise in warm, humid conditions. *Eur. J. Appl. Physiol.* 110(3): 609–618. doi:10.1007/s00421-010-1533-4. PMID:20574677.
- González-Alonso, J., Crandall, C.G., and Johnson, J.M. 2008. The cardiovascular challenge of exercising in the heat. *J. Physiol.* 586(1): 45–53. doi:10.1113/jphysiol.2007.142158. PMID:17855754.
- Grantham, D. 2010. Iraqi professionals experience recovery. *Behav. Healthcare*, 30(10): 22–23. PMID:21355372.
- Hodder, S.G., and Parsons, K. 2007. The effects of solar radiation on thermal comfort. *Int. J. Biometeorol.* 51(3): 233–250. doi:10.1007/s00484-006-0050-y. PMID:17009012.
- Hue, O. 2011. The challenge of performing aerobic exercise in tropical environments: applied knowledge and perspectives. *Int. J. Sports Physiol. Perform.* 6(4): 443–454. doi:10.1123/ijspp.6.4.443. PMID:22248546.
- Kounalakis, S.N., Botonis, P.G., Koskolou, M.D., and Geladas, N.D. 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): 183–189. doi:10.1007/s00421-009-1345-6. PMID:20047092.
- Macpherson, L.J., Hwang, S.W., Miyamoto, T., Dubin, A.E., Patapoutian, A., and Story, G.M. 2006. More than cool: promiscuous relationships of menthol and other sensory compounds. *Mol. Cell. Neurosci.* 32(4): 335–343. doi:10.1016/j.mcn.2006.05.005. PMID:16829128.
- Maughan, R.J. 2010. Distance running in hot environments: a thermal challenge to the elite runner. *Scand. J. Med. Sci. Sports*, 20(Suppl. 3): 95–102. doi:10.1111/j.1600-0838.2010.01192.x. PMID:21029196.

- Maughan, R.J., Otani, H., and Watson, P. 2012. Influence of relative humidity on prolonged exercise capacity in a warm environment. *Eur. J. Appl. Physiol.* **112**(6): 2313–2321. doi:10.1007/s00421-011-2206-7. PMID:22012542.
- McKemy, D.D., Neuhausser, W.M., and Julius, D. 2002. Identification of a cold receptor reveals a general role for TRP channels in thermosensation. *Nature*, **416**(6876): 52–58. doi:10.1038/nature719. PMID:11882888.
- Mitchell, D., and Wyndham, C.H. 1969. Comparison of weighting formulas for calculating mean skin temperature. *J. Appl. Physiol.* **26**(5): 616–622. doi:10.1152/jappl.1969.26.5.616. PMID:5781615.
- Morrison, S.F., and Nakamura, K. 2011. Central neural pathways for thermoregulation. *Front. Biosci. (Landmark Ed.)*, **16**: 74–104. doi:10.2741/3677.
- Mündel, T., and Jones, D.A. 2010. The effects of swilling an l(-)-menthol solution during exercise in the heat. *Eur. J. Appl. Physiol.* **109**(1): 59–65. doi:10.1007/s00421-009-1180-9. PMID:19727797.
- Nielsen, B.Y.B., Hales, J.R.S., Strange, S., Juel, N., Christensen, N.J., Warberg, J., and Saltin, B. 1993. Human circulatory and thermoregulatory adaptations with heat acclimation and exercise in a hot, dry environment. *J. Physiol.* **460**(1): 467–485. doi:10.1113/jphysiol.1993.sp019482. PMID:8487204.
- Noakes, T.D. 2012. Fatigue is a brain-derived emotion that regulates the exercise behavior to ensure the protection of whole body homeostasis. *Front. Physiol.* **3**(April): 82. doi:10.3389/fphys.2012.00082. PMID:22514538.
- Pan, R., Tian, Y., Gao, R., Li, H., Zhao, X., Barrett, J.E., and Hu, H. 2012. Central mechanisms of menthol-induced analgesia. *J. Pharm. Exp. Therapeut.* **343**(3): 661–672. doi:10.1124/jpet.112.196717. PMID:22951274.
- Parkin, J.M., Carey, M.F., Zhao, S., and Febbraio, M.A. 1999. Effect of ambient temperature on human skeletal muscle metabolism during fatiguing submaximal exercise. *J. Appl. Physiol.* **86**(3): 902–908. doi:10.1152/jappl.1999.86.3.902. PMID:10066703.
- Peiffer, J.J., and Abbiss, C.R. 2011. Influence of environmental temperature on 40 km cycling time-trial performance. *Int. J. Sports Physiol. Perform.* **6**(2): 208–220. doi:10.1123/ijspp.6.2.208. PMID:21725106.
- Peiffer, J.J., Abbiss, C.R., Watson, G., Nosaka, K., and Laursen, P.B. 2010. Effect of a 5-min cold-water immersion recovery on exercise performance in the heat. *Br. J. Sports Med.* **44**: 461–465. doi:10.1136/bjism.2008.048173. PMID:18539654.
- Riera, F., Trong, T.T., Sinnaph, S., and 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.
- Roberts, L.A., Nosaka, K., Coombes, J.S., and Peake, J.M. 2014. Cold water immersion enhances recovery of submaximal muscle function following resistance exercise. *Am. J. Physiol. Regul. Integr. Comp. Physiol.* **22**: R998–R1008. doi:10.1152/ajpregu.00180.2014. PMID:25121612.
- Ruskin, D.N., Anand, R., and LaHoste, G.J. 2007. Menthol and nicotine oppositely modulate body temperature in the rat. *Eur. J. Pharmacol.* **559**(2–3): 161–164. doi:10.1016/j.ejphar.2007.01.006. PMID:17303112.
- Schlader, Z.J., Simmons, S.E., Stannard, S.R., and Mündel, T. 2011. Skin temperature as a thermal controller of exercise intensity. *Eur. J. Appl. Physiol.* **111**(8): 1631–1639. doi:10.1007/s00421-010-1791-1. PMID:21197543.
- Stamford, B.A., and Noble, B.J. 1974. Metabolic cost and perception of effort during bicycle ergometer work performance. *Med. Sci. Sport*, **6**(4): 226–231. PMID:4461982.
- Trong, T.T., Riera, F., Rinaldi, K., Briki, W., and 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. PMID:25856401.
- Tucker, R., Rauch, L., Harley, Y.X.R., and Noakes, T.D. 2004. Impaired exercise performance in the heat is associated with an anticipatory reduction in skeletal muscle recruitment. *Eur. J. Physiol.* **448**: 422–430. doi:10.1007/s00424-004-1267-4. PMID:15138825.
- Vaile, J., Halson, S., Gill, N., and Dawson, B. 2008. Effect of cold water immersion on repeat cycling performance and thermoregulation in the heat. *J. Sports Sci.* **26**(5): 431–440. doi:10.1080/02640410701567425. PMID:18274940.
- Versey, N.G., Halson, S.L., and Dawson, B.T. 2013. Water immersion recovery for athletes: effect on exercise performance and practical recommendations. *Sport Med.* **43**(11): 1101–1130. doi:10.1007/s40279-013-0063-8. PMID:23743793.
- Vihma, T. 2010. Effects of weather on the performance of marathon runners. *Int. J. Biometeorol.* **54**(3): 297–306. doi:10.1007/s00484-009-0280-x. PMID:19937453.

[click here to view linked References](#)

1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12
13
14
15
16
17
18
19
20
21
22
23
24
25
26
27
28
29
30
31
32
33
34
35
36
37
38
39
40
41
42
43
44
45
46
47
48
49
50
51
52
53
54
55
56
57
58
59
60
61
62
63
64
65

1 Title page

2 One hour of precooling with cold beverage and menthol enhances cycling performance in 3 tropical climate

4
5 Kevin Rinaldi^{1*}; Than Tran Trong¹; Myriam Uhrhan¹; Olivier Hue¹

6
7 ¹ *Laboratoire ACTES (EA3596), Université des Antilles, BP 250, 97157 Pointe-à-Pitre,*
8 *Guadeloupe (French West Indies).*

9 * Corresponding author:

10 Kévin Rinaldi

11 Address: *Laboratoire ACTES (EA3596), Université des Antilles, BP 250, 97157 Pointe-à-*
12 *Pitre, Guadeloupe (French West Indies)*

13 Phone: (+33) 761521756

14 Fax: (+590) 590.48.31.79

15 Mail: kevinrinaldi@hotmail.com

16 Authors' mails:

17 Than Tran Trong: Thantrongtran@gmail.com

18 Myriam Uhrhan: muhrhan@stud.hs-bremen.de

19 Olivier Hue: Ohue@univ-ag.fr

20

Abstract

Purpose: The aim of this study was to compare durations of precooling with ice-slush before aerobic performance in tropical climate. **Methods:** Seven heat-acclimatized and trained male cyclists completed a 1-hour time trial in a hot and humid environment (WBGT: $28.6^{\circ}\text{C} \pm 0.7^{\circ}\text{C}$; relative humidity, RH: $77 \pm 1\%$). Before the exercise, they drank $8 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ of (1) a neutral beverage at 23°C in the 1-hour pre-exercise resting period (Neutral) at T0, T30, T45 and T60, or (2) an ice-slush/menthol beverage at -1°C in the last 30 min of the resting period (Pre-30), or (3) an ice-slush/menthol beverage at -1°C in the 1-hour pre-exercise resting period (Pre-60). In each condition, they drank cold-water/menthol at 3°C during the exercise regulated by volume every 15 min. **Results:** Performance was significantly better ($P = 0.01$) in Pre-60 than Pre-30 and Neutral (respectively, $+10.2\%$ and $+11.1\%$), with no difference between Pre-30 and Neutral. During the resting period, rectal temperature was significantly lower in Pre-60 than Pre-30 ($P = 0.042$) and Neutral ($P = 0.045$). Thermal comfort, thermal sensation and rating of perceived exertion were not affected by the conditions. **Conclusions:** This study shows that 1 hour of precooling with ice-slush and menthol beverage (1) improved performance in a 1-hour time trial, (2) did not seem to negatively interfere with the menthol in the cold-water/menthol beverage during exercise, and (3) decreased rectal temperature during the resting period.

Keywords: precooling; performance, cold beverage; menthol, tropical climate; cycling

1
2
3
4 40 **List of abbreviations**
5
6
7 41
8 42 CNS : Central Nervous System
9
10 43 HR : Heart Rate
11
12 44 RH : Relative Humidity
13
14 45 RPE : Rating of Peceived Exertion
15
16 46 Tc : Thermal Comfort
17
18 47 Ts : Thermal Sensation
19
20 48 Trec : Rectal Temperature
21
22 49 Tx : Temps (min)
23
24 50 Pre-x : condition with x min of pre-cooling
25
26 51 WBGT : Wet Buld Globe Temperature
27
28
29
30
31
32
33 52
34
35
36
37
38
39
40
41
42
43
44
45
46
47
48
49
50
51
52
53
54
55
56
57
58
59
60
61
62
63
64
65

53 Introduction

54 Tropical climate is characterized by hot and wet conditions and has a negative impact on
55 endurance exercise (Ely et al. 2007, Hue 2011). The processes involved in the performance
56 alteration have not been fully elucidated, but many factors have been advanced to explain this
57 impact. For example, it was suggested that the time to exhaustion in hot environments is
58 inversely related to the initial temperature and directly related to the rate of heat storage
59 (González-Alonso and Teller 1999). Also, the performance decrease was found to be associated
60 with higher skin temperature in a warm environment (Kenefick et al. 2010). Other factors include
61 an anticipatory process (Tucker et al. 2006), cardiovascular adjustments (Périard et al. 2011),
62 psychology (Wegmann et al. 2012) and dehydration (Kenefick et al. 2010).

63 Many strategies like precooling and mid-cooling protocols have been used to minimize the
64 impact of the tropical climate on aerobic performance. Several, such as cold-water immersion
65 (Clements et al. 2002, Vaile et al. 2008) and cooling vests (Arngrímsson et al. 2004, Uckert and
66 Joch 2007), have been studied. However, it was sometimes difficult to apply these strategies to
67 real sports contexts (Ihsan et al. 2010, Hue 2011, Siegel and Laursen 2012), although internal
68 cooling with beverages is among the easiest. One strategy is to drink cold-water/ice-slurry or
69 cold-water/ice-slurry combined with menthol during exercise [13-15], which was shown to be
70 beneficial for endurance performance in the heat. Indeed, menthol, when added to the beverages,
71 positively impacted thermal sensation and increased performance independently of water
72 temperature (Riera et al. 2014). These authors showed that the colder the ingested water was (or
73 ice-slush), the higher the performance was, with these results being accentuated when menthol
74 was added to the beverages.

1
2
3
4 75 The combination of precooling and per-cooling with beverages was studied with the participants
5
6 76 in a 30-km cycling race in a tropical climate (Riera et al. 2016). The authors showed no effect on
7
8
9 77 performance after 30 min of precooling with cold beverage (3°C) compared with control
10
11 78 beverage (23°C) on the subsequent 30 min of cycling with per-cooling (ice-slush/menthol). These
12
13
14 79 authors (Riera et al. 2016) suggested that a longer precooling period might have been beneficial
15
16 80 for subsequent performance. Another author showed the beneficial effect on performance with
17
18
19 81 ingestion of ice-slush 30 min before and during exercise in hot environment (Naito et al. 2017).
20
21 82 Combination on 30 minute of pre-cooling and per-cooling in hot environment had a positive
22
23
24 83 effect in a tropical climate, however the longer combination has never been studied in a tropical
25
26 84 climate.

27
28
29
30 85 The aim of the current study was therefore to determine whether the positive results of cold-
31
32 86 water/menthol ingestion during a 1-hour cycling time trial in a tropical climate would be further
33
34
35 87 enhanced by the addition of 1 hour or 30 min of internal precooling with ice-slush/menthol. We
36
37 88 hypothesized that a combination of 1-hour internal precooling with ice-slurry/menthol ingestion
38
39 89 and internal mid-cooling with cold-water/menthol ingestion would restrict heat stress over the
40
41
42 90 entire exercise period, which in turn would improve performance more than a shorter precooling
43
44 91 (30 min).

48 49 92 **Material and methods**

50 51 52 53 93 **Subjects**

54
55
56 94 Seven heat-acclimatized (i.e., living and training in Guadeloupe) trained male cyclists (age: 23 ±
57
58
59 95 5 years, body mass: 70.3 ± 5.7 kg) were recruited from among Guadeloupian cycling teams. Each

1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12
13
14
15
16
17
18
19
20
21
22
23
24
25
26
27
28
29
30
31
32
33
34
35
36
37
38
39
40
41
42
43
44
45
46
47
48
49
50
51
52
53
54
55
56
57
58
59
60
61
62
63
64
65

96 cyclist was well-trained and had been competing regularly in elite road races. These cyclists were
97 training at least 15 hours per week at the time of the study. The study was approved by the Ethics
98 Committee of the Medicine and Sports Centre in Guadeloupe (Ministry of Youth and Sports) and
99 the Ethics Committee of the Training and Research in Sports Sciences Unit in Guadeloupe
100 (Ministry of Higher Education and Research). All cyclists completed a medical screening
101 questionnaire and gave written informed consent prior to the study, which was approved by the
102 University Ethics Committee and conducted according to the Declaration of Helsinki.

104 **Experimental design**

105 The experimental sessions were separated by 7 days and undertaken in a randomized crossover
106 design. The cyclists were instructed to avoid training sessions for 24 hours prior to testing and
107 were allowed 60 min of light-intensity exercise 48 hours before each session. At the start of the
108 session day, the cyclists consumed a standard breakfast that included food and 500 mL of
109 beverage. The sessions began at the same time of day for each session (between 2:00 and 3:00
110 p.m.).

112 **Experimental procedure**

113 The experimental sessions (pre-exercise and exercise) were conducted in a laboratory
114 reproducing the hot/humid conditions of Guadeloupe, French West Indies, with wet bulb globe
115 temperature (WBGT): $28.6^{\circ}\text{C} \pm 0.7^{\circ}\text{C}$ (mean \pm SD) and relative humidity (RH): $77 \pm 1\%$.
116 During the sessions, the cyclists were not subjected to any flow of ambient air. They completed
117 three experimental randomized sessions: (1) a control session during which they drank a neutral

1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12
13
14
15
16
17
18
19
20
21
22
23
24
25
26
27
28
29
30
31
32
33
34
35
36
37
38
39
40
41
42
43
44
45
46
47
48
49
50
51
52
53
54
55
56
57
58
59
60
61
62
63
64
65

118 beverage at 23°C during the 1-hour pre-exercise resting period and cold-water/menthol at 3°C
119 during exercise (Neutral), (2) a session during which they sat in the lab for the first 30 min of the
120 resting period without drinking and then drank an ice-slush/menthol beverage at -1°C in the last
121 30 min and cold-water/menthol at 3°C during exercise (Pre-30), and (3) a session during which
122 they drank an ice-slush/menthol beverage at -1°C in the 1-hour pre-exercise resting period and
123 cold-water/menthol at 3°C during exercise (Pre-60).

124 During the 1 hour of pre-exercise, the cyclists drank 8 g.kg⁻¹ of neutral water (Neutral condition)
125 or ice-slush (Pre-60 condition) divided into T0, T15, T30 and T45. During the 30 min of pre-
126 exercise, the cyclists drank 8 g.kg⁻¹ of ice-slush (Pre-30 condition) divided into T30, T45 and T60
127 min. During exercise in the three conditions, the cyclists drank 8 g.kg⁻¹ of cold-water/menthol at
128 T0, T30 and T45 minutes. The cyclists remained seated in the lab over the entire 1 hour of pre-
129 exercise for each session.

130 The menthol (L-menthol) beverage was a 0.025% natural menthol aroma (% vol: 86.0% ± 1.0;
131 dose recommended by the manufacturer: 5 g.L⁻¹) (Robertet, Grasse, France). This percentage of
132 menthol was comparable to that of other studies using menthol beverage (Riera et al. 2014, 2016,
133 Trong et al. 2015). The ice-slush was produced with an ice-slush machine (Brema, GB 902A,
134 Professional Slush Machine, Ice Makers, Germany). Although ice expands in volume, we
135 carefully ensured that the volume of ice-slush (in mL of water) was precisely the same as the
136 volume of cold water. The temperature of each beverage was measured with a digital
137 thermometer (YSI 409B, Yellow Springs Instruments, OH, USA). A straw with a 1.5-cm
138 diameter was connected to the lid of the water bottle to aid ingestion of the ice-slush.

139 After pre-exercise, the cyclists warmed up for a standardized 5 min by cycling and performed a

1
2
3
4 140 1-hour time trial at the fastest possible speed. Cycling exercises were performed on each
5
6 141 participant's own bicycle fixed on a cycle trainer (Tacx Satori T1856 Tacx BV, Wassenaar, the
7
8
9 142 Netherlands).

13 143 **Measurements**

15
16 144 The environmental conditions were measured using a portable WBGT meter (HD 32.2, Delta
17
18 145 Ohm, Caselle di Selvazzano, Italy). For the three conditions, WBGT was $30.1^{\circ}\text{C} \pm 0.5^{\circ}\text{C}$.

20
21 146 Heart rate (HR) was monitored continuously using a portable telemetry unit (Suunto Memory
22
23 147 Belt, Suunto, Vantaa, Finland) with recording every 5 s, and the data were analysed with Suunto
24
25 148 software. Perceived thermal comfort (TC) and perceived thermal sensation (TS) were determined
26
27 149 using scales with the range of scores adapted from Hodder and Parsons (Hodder and Parsons
28
29 150 2007). Cyclists were asked to rate their perceived exertion according to the grades of Borg's
30
31 151 perceived exertion scale (Borg 1982). Rectal temperature (Trec) was monitored continuously
32
33 152 with a rectal probe (YSI409 AC, Yellow Springs Instruments, Yellow Springs, OH, USA)
34
35 153 inserted 10 cm beyond the anal sphincter.

36
37
38
39
40
41
42 154 Trec, TC and TS were recorded every 5 min during precooling and exercise. Rating of perceived
43
44 155 exertion (RPE) and performance were recorded every 5 min during exercise.

48 156 **Statistical analyses**

49
50
51 157 Performance and RPE were assessed during exercise, whereas Trec, TS and TC were assessed in
52
53 158 two phases: during the 60 min of rest and during exercise. We tested for normality using
54
55 159 Skewness and Kurtosis tests, with acceptable Z values not exceeding +1 or -1. Once the
56
57 160 assumption of normality was confirmed, parametric tests (Mauchly sphericity test) were
58
59
60
61
62

1
2
3
4 161 performed. To test our hypotheses regarding the changes in Trec, performance, TS, TC and RPE,
5
6 162 2-way analyses of variance (ANOVA) with repeated measures (i.e. precooling condition x time)
7
8
9 163 were conducted and Tukey's post hoc test was performed when required. Data analysis was
10
11 164 performed using the Statistical Package for Social Sciences (SPSS version 23.0). Significance
12
13
14 165 was set at $P < 0.05$. All data are presented as mean \pm SD. Condition*time corresponded to the
15
16 166 changes in data over time according to the condition.
17
18
19
20

21 167 **Results**

22 23 24 168 **Performance**

25
26
27
28
29 169 Global performance (Fig. 1) was significantly affected by the condition ($P < 0.003$): cyclists
30
31 170 performed better ($P < 0.02$) in the Pre-60 condition ($39.9 \text{ km} \pm 1.9 \text{ km}$) than in Pre-30 ($35.8 \text{ km} \pm$
32
33 171 4 km) and Neutral ($35.5 \text{ km} \pm 2.2 \text{ km}$). No difference was found between Pre-30 and Neutral.
34
35
36 172 When expressed by 5-min blocks (Fig. 2), performance in Pre-60 ($3.32 \text{ km} \pm 0.4 \text{ km}$) was
37
38 173 significantly better ($P < 0.031$) than in Pre-30 ($2.99 \text{ km} \pm 0.4 \text{ km}$) and Neutral ($2.96 \text{ km} \pm 0.6$
39
40 174 km) ($P < 0.001$). The significant differences appeared from the 9th block, with Pre-60
41
42
43 175 significantly higher than Pre-30 and Neutral. However, performance was not affected by time.
44
45
46
47 176

48 49 50 51 177 **Rectal Temperature (Trec)**

52
53
54 178 During the resting period, mean Trec (Fig. 3) was significantly affected by the beverage
55
56 179 condition ($P = 0.035$), with Pre-60 ($37.0^\circ\text{C} \pm 0.4^\circ\text{C}$) significantly lower than Pre-30 ($P < 0.043$)
57
58 180 and Neutral ($P < 0.046$) (respectively, $37.2^\circ\text{C} \pm 0.4^\circ\text{C}$ and $37.2^\circ\text{C} \pm 0.5^\circ\text{C}$), with no difference
59
60
61
62
63
64
65

1
2
3
4 181 between Pre-30 and Neutral. Trec was affected by time ($P < 0.001$): it decreased during the
5
6 182 resting period at each time ($P < 0.05$). However, Trec was not affected by condition*time.
7
8
9
10 183
11
12
13 184 During exercise (Fig. 4), Trec increased over time ($P < 0.001$). The post hoc test showed that
14
15
16 185 Trec increased significantly at each time ($P < 0.05$) up to 45 min. However, the last three blocks
17
18 186 (50 min, 55 min and 60 min) for Pre-30 and Neutral showed no increase in Trec. No significant
19
20
21 187 differences in effects for conditions or condition*time were found.
22
23
24 188

28 189 **RPE, thermal sensation, thermal comfort**

30
31 190 During the resting period, TC (Fig. 5) was not significantly different between conditions,
32
33 191 condition*time or time. However, TS (Fig. 6) was significantly affected by time ($P < 0.05$), with
34
35
36 192 no difference for conditions or condition*time: the data did not evolve differently over time
37
38 193 according to condition.
39
40

41
42 194 During exercise, RPE (Fig. 7), TC and TS increased significantly over time ($P < 0.001$).
43
44 195 However, condition and condition*time effects were not different.
45
46
47

48 196
49
50
51 197 **Heart rate**
52
53
54 198 During the resting period and exercise, no difference was observed between conditions. Only a
55
56
57 199 time effect ($P < 0.001$) during the time trial was observed without a difference between
58
59 200 conditions.
60
61
62

201 **Discussion**

202 The most important results of this study were the following: (1) prolonging the precooling time
203 (i.e. Pre-60 as opposed to Pre-30 and Neutral) improved performance and (2) significantly
204 lowered rectal temperature

206 **Performance**

207 Precooling for 60 min significantly increased performance compared with Pre-30 (+10.2%) and
208 Neutral conditions (+11.1%), with no difference between Pre-30 and Neutral. Recently, Riera et
209 al. (Riera et al. 2016) found no difference in performances after 30 min of precooling and a
210 neutral condition in tropical climate. In their study, they compared the use of a neutral beverage
211 at 23°C with a cold beverage at 3°C (both beverages without menthol) during the 30-min pre-
212 exercise period before cyclists performed a 30-km exercise, drinking an ice-slush/menthol
213 beverage (7 g.kg⁻¹ at -1°C) for both conditions. In addition, Schulze et al. (Schulze et al. 2015)
214 showed that 30 min of precooling with ice-slush (15 g.kg⁻¹) at -1°C topped with frozen towels (on
215 legs and torso) and combined with ad libitum ingestion of ice-slush (-1°C) during exercise did
216 not increase performance compared to ad libitum ingestion of ice-slush during exercise without
217 precooling. These results indicate that internal precooling for 30 min with cold beverages has no
218 additive effect on exercise performance, regardless of the quantity and beverage ingested (cold
219 water or ice-slush, with or without menthol) and regardless of whether the internal mid-cooling is
220 with ice-slush (with or without menthol) or, as in our study, with cold-water/menthol. However,
221 in a hot environment, a longer time to exhaustion was shown in the ice-slush trial
222 (50.0 ± 12.2 min) than the cold-water trial (42.2 ± 10.1 min) after 30 min of precooling with either

1
2
3
4 223 ice-slush (0.5°C) or cold water (4°C) every 5 min (Naito et al. 2017). The difference in the
5
6 224 percentage of humidity between our study and that of Naito and Ogaki (Naito et al. 2017)
7
8
9 225 (respectively, 79% RH and 30% RH) may explain the difference in effect for a precooling time of
10
11 226 30 min. Another study (Moyen et al. 2014) showed that metabolic heat production was greater
12
13
14 227 with high RH (70% and 85%) and that heat removal was hampered by insufficient evaporation,
15
16 228 without there being any difference for low RH. This difference in RH could explain why 30 min
17
18
19 229 of precooling was not enough to be cumulated with per-cooling to induce positive changes in
20
21 230 performance in a tropical climate.

22
23
24
25 231 While it was shown that ice-slush increased performance more than cold water during exercise,
26
27 232 menthol had an additive effect with cold beverage (Riera et al. 2014). Independently of the
28
29
30 233 method (ice-slush or cold water), 30 min does not yield a cumulative effect to impact
31
32 234 performance. In this respect, Yeo et al. (Yeo et al. 2012) showed an ergogenic effect on
33
34 235 performance in a tropical climate with 30 min of precooling with 8 g/kg⁻¹ of ice-slush. The
35
36
37 236 authors demonstrated that precooling induced a more significant decrease in gastrointestinal
38
39 237 temperature from the last 5 min of the drinking phase (25 min after the start) and TS at the end of
40
41
42 238 precooling than a room-temperature drink did (30.9°C), which would explain the decreases in
43
44 239 temperature between T0 and T30 in the Pre-60 condition. In their study (Yeo et al. 2012), the
45
46
47 240 runners drank ambient temperature water ad libitum during exercise, which did not allow them to
48
49 241 study the cumulative effect of precooling with per-cooling. In addition, we showed that the way
50
51 242 ice-slush is ingested affects the evolution of rectal temperature. Indeed, in our study ingestion of
52
53
54 243 8 g.kg⁻¹ over 1 hour resulted in a greater decrease than 8 g.kg⁻¹ over 30 min (respectively, -0.6°C
55
56 244 for Pre-60 and -0.44°C for Pre-30).

1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12
13
14
15
16
17
18
19
20
21
22
23
24
25
26
27
28
29
30
31
32
33
34
35
36
37
38
39
40
41
42
43
44
45
46
47
48
49
50
51
52
53
54
55
56
57
58
59
60
61
62
63
64
65

245 Our study also demonstrated for the first time a significantly increased performance with 1 hour
246 of precooling using ice-slush/menthol at 1°C combined with internal per-cooling with cold
247 beverage. Heat storage has been one of the most frequently advanced factors to account for the
248 decreases in performance in a hot and dry environment (Galloway and Maughan 1997). The
249 lower pre-exercise temperature in the Pre-60 condition might have prolonged the time to reach
250 the critical temperatures defined by Gonzalez-Alonso et al. (González-Alonso and Teller 1999).
251 In this case, ice-slurry would decrease T_{rec} (a good reflection of T_{core}), which would in turn
252 increase performance (Hasegawa et al. 2006). These authors suggested that a decrease of 0.3°C in
253 T_{core} might increase aerobic performance in a hot environment. In our study, the ice-slush in the
254 Pre-60 condition resulted in a 0.6°C reduction. This observation was supported by the lack of
255 T_{rec} difference between the Pre-30 and Neutral conditions, which resulted in no difference in
256 performance between these two conditions.

257 The increase in performance noted in Pre-60 could also be linked to the use of menthol. Indeed,
258 Pre-60 might have resulted in an increased concentration of menthol in the brain compared with
259 Pre-30: it has been shown that the plasma half-life of menthol is 56.2 minutes when taken in a
260 capsule containing 100 mg of menthol (Gelal et al. 1999). Menthol could thus act as a stimulant
261 on the central nervous system (CNS) by inhibiting the recapture of dopamine and/or facilitating
262 its release. This stimulation enhances activity in rats (Umezu et al. n.d., Pan et al. 2012). It is
263 considered effective in the treatment of mental fatigue and may possess an action similar to that
264 of psychostimulants (Umezu 2010) by enhancing during exercise the intensity of the afferent
265 signals from the stimulation created by cold-water/menthol ingestion. These processes would
266 further corroborate the central regulator model in the brain introduced by St Clair Gibson and

1
2
3
4 267 Noakes (St Clair Gibson et al. 2004). However, for the exercise in Pre-30, we assume that the
5
6 268 time of precooling was not sufficient to increase the menthol concentration in the brain.
7
8
9
10 269 Neutral performance in our study was lower than Pre-60, despite ingestion of cold-water/menthol
11
12 270 during exercise for both conditions. When expressed by blocks, performance was significantly
13
14
15 271 affected starting from 45 min: from this point onwards, Neutral performance was negatively
16
17 272 affected by the tropical climate, and this result in natives to tropical climate was expected
18
19
20 273 (Voltaire et al. 2003). Pre-60 performance was not negatively impacted by climate, and it would
21
22 274 seem that precooling for 1 hour with ice-slush/menthol (Pre-60) enhanced the effect of mid-
23
24
25 275 cooling by decreasing thermal stress and heat storage. Gonzalez-Alonso et al. (González-Alonso
26
27 276 and Teller 1999) suggested a time to exhaustion in hot environments that is inversely related to
28
29
30 277 the initial temperature and directly related to the rate of heat storage. This argument was
31
32 278 corroborated by the significant decrease in Trec for Pre-60 compared with the other pre-exercise
33
34 279 conditions.
35
36
37 280

40 281 **Temperatures**

42
43 282 During the resting period, rectal temperatures were significantly lower in Pre-60 than Pre-30 and
44
45
46 283 Neutral, with no significant difference between Pre-30 and Neutral. It is well known that a cold-
47
48 284 water beverage can decrease Trec before exercise (Byrne et al. 2011, Riera et al. 2016). Siegel et
49
50
51 285 al. (Siegel and Laursen 2012) showed that the absorption of ice-slush reduces body temperature
52
53 286 more than the absorption of the same quantity of cold water (Pre-60 vs Neutral). We assume that
54
55
56 287 the longer period of ice-slush ingestion may explain the decreases in the temperature in Pre-60
57
58
59
60
61
62
63
64
65

1
2
3
4 288 compared with Pre-30: after 30 min of precooling, both conditions (Pre-30 and Pre-60) resulted
5
6 289 in a 0.3°C loss, whereas in Pre-60, Trec was reduced by - 0.6°C at the end of precooling.
7
8
9
10 290 The absence of a Trec difference between Pre-30 and Neutral at the end of the precooling period
11
12 291 may have been due to the effect of menthol, which limits thermoregulation. One possible
13
14 292 explanation is that the cooling effect of menthol on TRPM8 and TRPA1 induces the body to
15
16 293 reduce thermoregulation (Macpherson et al. 2006). The menthol action provides feedback to the
17
18 294 CNS of a temperature lower than the real temperature, based on the effect of menthol on TRPM8
19
20 295 and TRPA1. This signal then induces lower thermoregulatory feedback by the CNS and may
21
22 296 therefore limit thermoregulation. This would explain the smaller decrease in Trec in Pre-30 than
23
24 297 Pre-60. Furthermore, menthol can cause vasoconstriction, which would limit the
25
26 298 thermoregulation processes. Kashima and Hayashi (Kashima and Hayashi 2013) applied a
27
28 299 menthol solution of 20 nM or 0.4 mM to the oral cavity for 20 s. They demonstrated that a
29
30 300 solution of 20 nM menthol caused vasoconstriction in the nose. Moreover, Ruskin et al. (Ruskin
31
32 301 et al. 2007) injected 200 or 400 mg.kg⁻¹ of menthol subcutaneously in rats and found that body
33
34 302 temperature increased by 0.4°C with 400 mg.kg⁻¹ of menthol and 0.8°C with 200 mg.kg⁻¹.
35
36 303 However, we assumed that these effects would be marginal and the low concentration used in our
37
38 304 study partially explains this result. We also assumed that the main factor to explain the lack of
39
40 305 decrease in Trec was the quantity of ice-slush given in the 30-min period. The absorption of large
41
42 306 quantities of a cold drink (or ice-slush) results in greater Tcore reduction than the ingestion of
43
44 307 smaller quantities of water at the same temperature. Ross et al. (Ross et al. 2011) found that
45
46 308 ingestion of 500 g and 1000 g of ice-slush reduced Trec, respectively, by 0.25°C and 0.60°C. In
47
48 309 our study, we used 8 g.kg⁻¹ (corresponding to 562.2 g ± 45.6 g) of ice-slush/menthol for 30 min
49
50
51
52
53
54
55
56
57
58
59 310 without decreasing Trec. Yet, the absorption of the ice-slush/menthol over a longer period
60
61
62
63
64
65

1
2
3
4 311 significantly decreased Trec (i.e. Pre-60). Yeo et al. (Yeo et al. 2012) found a significant decrease
5
6 312 in gastrointestinal temperature after ingestion of 8 g/kg⁻¹ over 30 min compared with the
7
8
9 313 ingestion of an ambient beverage (30.9°C) in a tropical climate. We had some concerns in
10
11 314 comparing the ambient beverage used in their study (30.9°C) to our Neutral condition with water
12
13
14 315 at 23°C. We could not conclude whether the lack of a reduction in Trec in our study was due to
15
16 316 the delta between ice-slush and neutral water or the effect of menthol.
17
18
19
20 317 During exercise, Trec was significantly affected by time with no difference for condition or
21
22 318 condition*time. The increase in Trec over time was due to the metabolic heat production
23
24
25 319 generated by the exercising muscles. However, we assumed that the limiting evacuation process
26
27 320 due to a tropical climate was able to induce a similar increase in Trec independently of condition.
28
29
30 321 On the other hand, Trec increased significantly from the beginning of exercise up to 45 min, with
31
32 322 no further change from 45 min to the end of exercise in Pre-30 and Neutral conditions, whereas
33
34 323 Pre-60 Trec continued to increase until the end of exercise. This bigger increase in Pre-60 than
35
36
37 324 Pre-30 and Neutral could be explained by the lower values in Pre-60 at the beginning of exercise.
38
39 325 It may be suggested that a critical temperature was reached to limit hyperthermia in Pre-30 and
40
41
42 326 Neutral (Nielsen et al. 1993, González-Alonso and Teller 1999, Cheung 2007).
43
44 327

48 328 **Sensation and RPE**

49
50
51 329 During the resting period, TC was not affected by time, condition or condition*time. The
52
53 330 common environment for the three conditions explains this result. Furthermore, the subjects were
54
55
56 331 acclimatized, and we assume that they did not perceive the tropical environment as
57
58
59
60
61
62
63
64
65

1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12
13
14
15
16
17
18
19
20
21
22
23
24
25
26
27
28
29
30
31
32
33
34
35
36
37
38
39
40
41
42
43
44
45
46
47
48
49
50
51
52
53
54
55
56
57
58
59
60
61
62
63
64
65

332 uncomfortable. Hydration by neutral water or ice-slush/menthol did not influence this feeling of
333 comfort. A similar result for TC was found in the tropical climate (Riera et al. 2016).

334 TS was significantly affected by time, independently of condition. We assumed that hydration
335 would influence TS in a tropical climate independently of the beverage temperature. However,
336 TS decreased at the end of precooling with cold-drink ingestion. In their study, Yeo et al. (Yeo et
337 al. 2012) showed that precooling with 8 g.kg⁻¹ of cold drink for 30 min in a hot and wet
338 environment induced a significant decrease in thermal sensation.

339 Despite the higher performance in Pre-60, RPE, TC and TS were not affected by condition or
340 condition*time and increased significantly over time. We assume that the higher performance in
341 Pre-60 without a change in sensations (TC, TS and RPE) was due to the effect of ice-slush with
342 menthol, which biases the CNS by increasing performance without the RPE being negatively
343 impacted. The post hoc test corroborated this assumption by revealing a significant difference
344 between Pre-60 and Neutral (P< 0.02). Moreover, menthol is also known to be an analgesic
345 through peripheral and central mechanisms (Pan et al. 2012). Therefore, we suspect that the
346 combination of ice-slush/menthol during Pre-60 had an analgesic effect, allowing the cyclists to
347 perform better without an increase in TS, TC or RPE.

349 **Practical Applications**

350
351 One hour of precooling with cold beverage and menthol enhances cycling performance in tropical
352 climate. This method of optimizing performance can be used in cycling time trials. Effectively,
353 one way to optimised performance in hot and humid conditions is the use of menthol and cold
354 drink allowing the CNS to regulate the effort differently while having reduced heat stress.

1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12
13
14
15
16
17
18
19
20
21
22
23
24
25
26
27
28
29
30
31
32
33
34
35
36
37
38
39
40
41
42
43
44
45
46
47
48
49
50
51
52
53
54
55
56
57
58
59
60
61
62
63
64
65

Conclusion

This study suggests that prolonged precooling with ice-slush and menthol beverage has a more beneficial effect than shorter precooling. One hour of precooling as opposed to 30 min and control had the following effects: (1) improved performance in a 1-hour time trial, (2) a cumulative effect with cold-water/menthol beverage during exercise, and (3) decreased rectal temperature during the pre-exercise resting period. This decrease in rectal temperature over the 1-hour precooling period could explain the higher performance in the Pre-60 condition, but the cumulative effect of menthol on pre- and per-cooling might have enhanced the intensity of the afferent signals from stimulation of the central nervous system.

References

- Arngrímsson, S.A., Pettitt, D.S., Stueck, M.G., Jorgensen, D.K., and Cureton, K.J. 2004. Cooling vest worn during active warm-up improves 5-km run performance in the heat. *J. Appl. Physiol.* **96**(5): 1867–74. doi:10.1152/jappphysiol.00979.2003.
- Borg, G.A. 1982. Psychophysical bases of perceived exertion. *Med. Sci. Sports Exerc.* **14**(5): 377–81. Available from <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/7154893>.
- Byrne, C., Owen, C., Cosnefroy, A., Kai, J., and Lee, W. 2011. Self-Paced Exercise Performance in the Heat After Pre-Exercise Cold-Fluid Ingestion. **46**(6): 592–599.
- Cheung, S.S. 2007. Neuropsychological determinants of exercise tolerance in the heat. *Prog. Brain Res.* **162**(06): 45–60. doi:10.1016/S0079-6123(06)62004-9.
- Clements, J.M., Casa, D.J., Knight, J.C., McClung, J.M., Blake, A.S., Meenen, P.M., Gilmer, A.M., and Caldwell, K. a. 2002. Ice-water immersion and cold-water immersion provide similar cooling rates in runners with exercise-induced hyperthermia. *J. Athl. Train.* **37**(2): 146–150.
- Ely, M.R., Chevront, S.N., Roberts, W.O., and Montain, S.J. 2007. Impact of weather on marathon-running performance. *Med. Sci. Sports Exerc.* **39**(3): 487–493. doi:10.1249/mss.0b013e31802d3aba.

1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12
13
14
15
16
17
18
19
20
21
22
23
24
25
26
27
28
29
30
31
32
33
34
35
36
37
38
39
40
41
42
43
44
45
46
47
48
49
50
51
52
53
54
55
56
57
58
59
60
61
62
63
64
65

382 Galloway, S.D., and Maughan, R.J. 1997. Effects of ambient temperature on the capacity to
383 perform prolonged cycle exercise in man. *Med. Sci. Sports Exerc.* **29**(9): 1240–1249.
384 doi:10.1097/00005768-199709000-00018.

385 Gelal, A., Jacob, P., Yu, L., and Benowitz, N.L. 1999. Disposition kinetics and effects of
386 menthol. *Clin. Pharmacol. Ther.* **66**(2): 128–35. doi:10.1053/cp.1999.v66.100455001.

387 González-Alonso, J., and Teller, C. 1999. Influence of body temperature on the development of
388 fatigue during prolonged exercise in the heat. *J. Appl. Available from*
389 <http://www.jappl.org/content/86/3/1032.short>.

390 Hasegawa, H., Takatori, T., Komura, T., and Yamasaki, M. 2006. Combined effects of pre-
391 cooling and water ingestion on thermoregulation and physical capacity during exercise in a
392 hot environment. *J. Sports Sci.* **24**(1): 3–9. doi:10.1080/02640410400022185.

393 Hodder, S.G., and Parsons, K. 2007. The effects of solar radiation on thermal comfort. *Int. J.*
394 *Biometeorol.* **51**(3): 233–250. doi:10.1007/s00484-006-0050-y.

395 Hue, O. 2011. The challenge of performing aerobic exercise in tropical environments: Applied
396 knowledge and perspectives. *Int. J. Sports Physiol. Perform.* **6**(4): 443–454.

397 Ihsan, M., Landers, G., Brearley, M., and Peeling, P. 2010. Beneficial Effects of Ice Ingestion as
398 a Precooling Strategy on 40-km Cycling Time-Trial Performance. : 140–151.

1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12
13
14
15
16
17
18
19
20
21
22
23
24
25
26
27
28
29
30
31
32
33
34
35
36
37
38
39
40
41
42
43
44
45
46
47
48
49
50
51
52
53
54
55
56
57
58
59
60
61
62
63
64
65

399 Kashima, H., and Hayashi, N. 2013. Facial skin blood flow responses to irritant stimuli in the oral
400 cavity. *Aut. Neurosci* **174**(1–2): 61–65. Elsevier B.V. doi:10.1016/j.autneu.2012.11.010.

401 Kenefick, R.W., Chevront, S.N., Palombo, L.J., Ely, B.R., and Sawka, M.N. 2010. Skin
402 temperature modifies the impact of hypohydration on aerobic performance. *J. Appl. Physiol.*
403 **109**(1): 79–86. doi:10.1152/jappphysiol.00135.2010.

404 Lee, J.K.W., Shirreffs, S.M., and Maughan, R.J. 2008. Cold drink ingestion improves exercise
405 endurance capacity in the heat. *Med. Sci. Sports Exerc.* **40**(9): 1637–44.
406 doi:10.1249/MSS.0b013e318178465d.

407 Macpherson, L.J., Hwang, S.W., Miyamoto, T., Dubin, A.E., Patapoutian, A., and Story, G.M.
408 2006. More than cool: Promiscuous relationships of menthol and other sensory compounds.
409 *Mol. Cell. Neurosci.* **32**(4): 335–343. doi:10.1016/j.mcn.2006.05.005.

410 Moyen, N.E., Ellis, C.L. V, Ciccone, A.B., Thurston, T.S., Cochrane, K.C., Brown, L.E., Coburn,
411 J.W., and Judelson, D.A. 2014. Increasing relative humidity impacts low-intensity exercise
412 in the heat. *Aviat. Sp. Environ. Med.* **85**(2): 112–119. doi:10.3357/ASEM.3787.2014.

413 Naito, T., Iribe, Y., and Ogaki, T. 2017. Ice ingestion with a long rest interval increases the
414 endurance exercise capacity and reduces the core temperature in the heat. *J. Physiol.*
415 *Anthropol.* **36**(1): 9. *Journal of Physiological Anthropology.* doi:10.1186/s40101-016-0122-
416 6.

1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12
13
14
15
16
17
18
19
20
21
22
23
24
25
26
27
28
29
30
31
32
33
34
35
36
37
38
39
40
41
42
43
44
45
46
47
48
49
50
51
52
53
54
55
56
57
58
59
60
61
62
63
64
65

417 Nielsen, B.Y.B., Hales, J.R.S., Strange, S., and Juel, N. 1993. Thermoregulatory adaptations. *J.*
418 *Physiol.* **460**(1): 467–485. doi:10.1002/jez.a.208.

419 Pan, R., Tian, Y., Gao, R., Li, H., Zhao, X., Barrett, J.E., and Hu, H. 2012. Central mechanisms
420 of menthol-induced analgesia. *J. Pharmacol. Exp. Ther.* **343**(3): 661–72.
421 doi:10.1124/jpet.112.196717.

422 Périard, J.D., Cramer, M.N., Chapman, P.G., Caillaud, C., and Thompson, M.W. 2011.
423 Cardiovascular strain impairs prolonged self-paced exercise in the heat. *Exp. Physiol.* **96**(2):
424 134–44. doi:10.1113/expphysiol.2010.054213.

425 Riera, F., Trong, T.T., Rinaldi, K., and Hue, O. 2016. Precooling does not Enhance the Effect on
426 Performance of Midcooling with Ice-Slush/Menthol. *Int. J. Sports Med.* doi:10.1055/s-0042-
427 107597.

428 Riera, F., Trong, T.T., Sinnapah, S., and Hue, O. 2014. Physical and perceptual cooling with
429 beverages to increase cycle performance in a tropical climate. *PLoS One* **9**(8): e103718.
430 doi:10.1371/journal.pone.0103718.

431 Ross, M.L.R., Garvican, L. a, Jeacocke, N. a, Laursen, P.B., Abbiss, C.R., Martin, D.T., and
432 Burke, L.M. 2011. Novel precooling strategy enhances time trial cycling in the heat. *Med.*
433 *Sci. Sports Exerc.* **43**(1): 123–33. doi:10.1249/MSS.0b013e3181e93210.

434 Ruskin, D.N., Anand, R., and LaHoste, G.J. 2007. Menthol and nicotine oppositely modulate

1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12
13
14
15
16
17
18
19
20
21
22
23
24
25
26
27
28
29
30
31
32
33
34
35
36
37
38
39
40
41
42
43
44
45
46
47
48
49
50
51
52
53
54
55
56
57
58
59
60
61
62
63
64
65

body temperature in the rat. *Eur. J. Pharmacol.* **559**(2–3): 161–164.

doi:10.1016/j.ejphar.2007.01.006.

Schulze, E., Daanen, H.A., Levels, K., Casadio, J.R., Plews, D.J., Kilding, A.E., Siegel, R., and

Laursen, P.B. 2015. Effect of thermal state and thermal comfort on cycling performance in

the heat. *Int. J. Sports Physiol. Perform.* **10**(5): 655–663. Available from

<http://www.embase.com/search/results?subaction=viewrecord&from=export&id=L6055258>

[11%5Cnhttp://dx.doi.org/10.1123/ijsp.2014-](http://dx.doi.org/10.1123/ijsp.2014-0281)

[0281%5Cnhttp://sfx.library.uu.nl/utrecht?sid=EMBASE&issn=15550265&id=doi:10.1123/i](http://sfx.library.uu.nl/utrecht?sid=EMBASE&issn=15550265&id=doi:10.1123/ijsp.2014-0281)

[jspp.2014-0281](http://sfx.library.uu.nl/utrecht?sid=EMBASE&issn=15550265&id=doi:10.1123/ijsp.2014-0281)&atitle=Effect+of+thermal+state+and.

Siegel, R., and Laursen, P.B. 2012. Keeping Your Cool Heat with Internal Cooling Methods.

42(2): 89–98.

St Clair Gibson, A., Gibson, A.S., Noakes, T.D., and St Clair Gibson, A. 2004. Evidence for

complex system integration and dynamic neural regulation of skeletal muscle recruitment

during exercise in humans. *Br. J. Sports Med.* **38**(6): 797–806.

doi:10.1136/bjism.2003.009852.

Trong, T.T., Riera, F., Rinaldi, K., Briki, W., and Hue, O. 2015. Ingestion of a cold

temperature/menthol beverage increases outdoor exercise performance in a hot, humid

environment. *PLoS One* **10**(4): 1–11. doi:10.1371/journal.pone.0123815.

Tucker, R., Marle, T., Lambert, E. V, and Noakes, T.D. 2006. The rate of heat storage mediates

1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12
13
14
15
16
17
18
19
20
21
22
23
24
25
26
27
28
29
30
31
32
33
34
35
36
37
38
39
40
41
42
43
44
45
46
47
48
49
50
51
52
53
54
55
56
57
58
59
60
61
62
63
64
65

454 an anticipatory reduction in exercise intensity during cycling at a fixed rating of perceived
455 exertion. *J. Physiol.* **574**(3): 905–915. doi:10.1113/jphysiol.2005.101733.

456 Uckert, S., and Joch, W. 2007. Effects of warm-up and precooling on endurance performance in
457 the heat. *Br. J. Sports Med.* **41**(6): 380–4. doi:10.1136/bjism.2006.032292.

458 Umezu, T. 2010. Evidence for dopamine involvement in ambulation promoted by pulegone in
459 mice. *Pharmacol. Biochem. Behav.* **94**(4): 497–502. Elsevier Inc.
460 doi:10.1016/j.pbb.2009.11.001.

461 Umezu, T., Sakata, A., and Ito, H. (n.d.). Ambulation-promoting effect of peppermint oil and
462 identification of its active constituents. *Pharmacol. Biochem. Behav.* **69**(3–4): 383–90.
463 Available from <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/11509195>.

464 Vaile, J., Halson, S., Gill, N., and Dawson, B. 2008. Effect of cold water immersion on repeat
465 cycling performance and thermoregulation in the heat. *J. Sports Sci.* **26**(5): 431–440.
466 doi:10.1080/02640410701567425.

467 Voltaire, B., Berthouze-Aranda, S., and Hue, O. 2003. Influence of a hot/wet environment on
468 exercise performance in natives to tropical climate. *J. Sports Med. Phys. Fitness* **43**(3): 306–
469 11. Available from <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/14625511>.

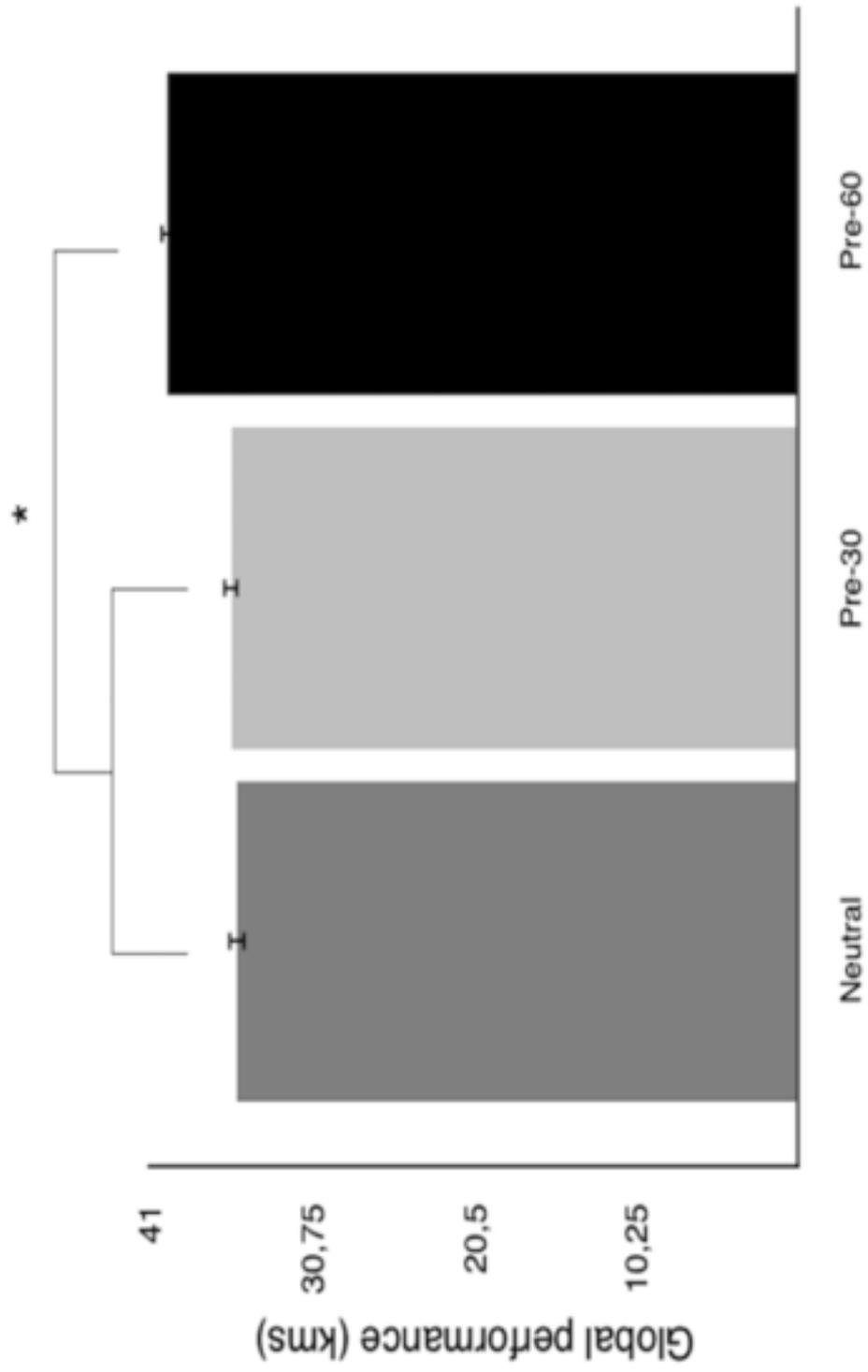
470 Wegmann, M., Faude, O., Poppendieck, W., Hecksteden, A., and Meyer, T. 2012. Pre-Cooling
471 and Sports Performance. **42**(7): 545–564.

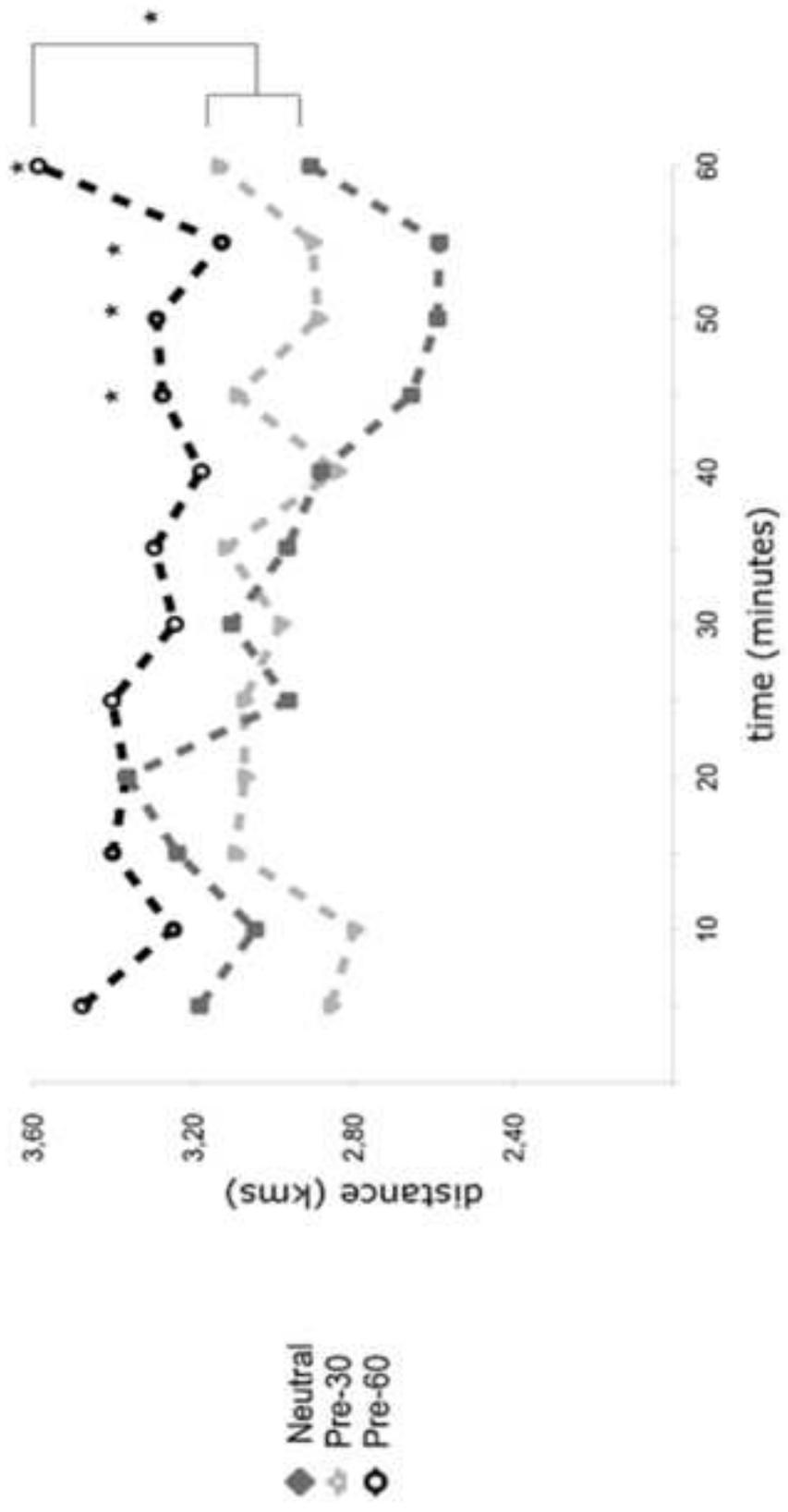
1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12
13
14
15
16
17
18
19
20
21
22
23
24
25
26
27
28
29
30
31
32
33
34
35
36
37
38
39
40
41
42
43
44
45
46
47
48
49
50
51
52
53
54
55
56
57
58
59
60
61
62
63
64
65

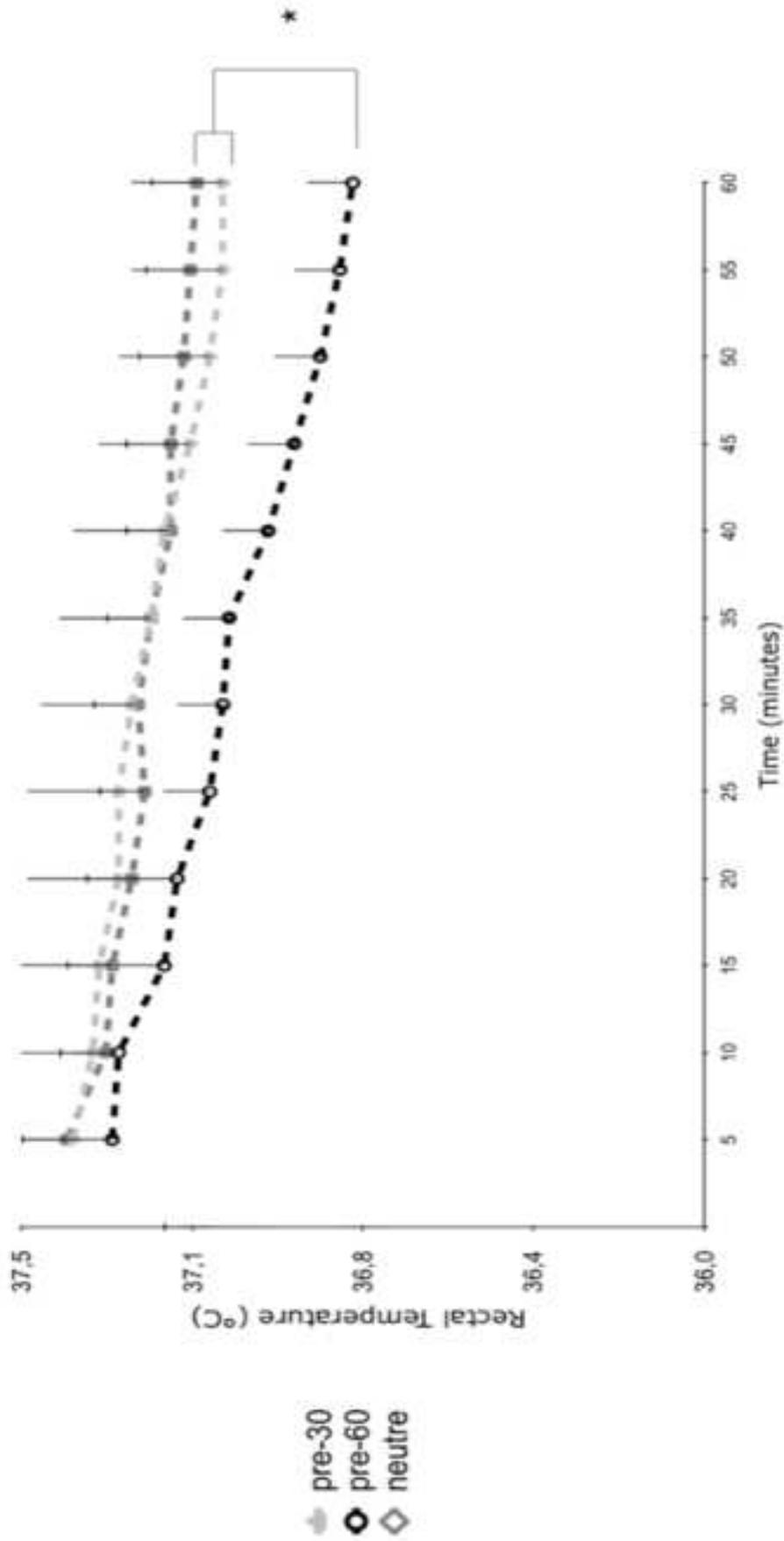
472 Yeo, Z.W., Fan, P.W.P., Nio, A.Q.X., Byrne, C., Lee, J.K.W., Medical, D., Sciences, H., and
473 Kingdom, U. 2012. Ice Slurry on Outdoor Running Performance in Heat. : 859–866.

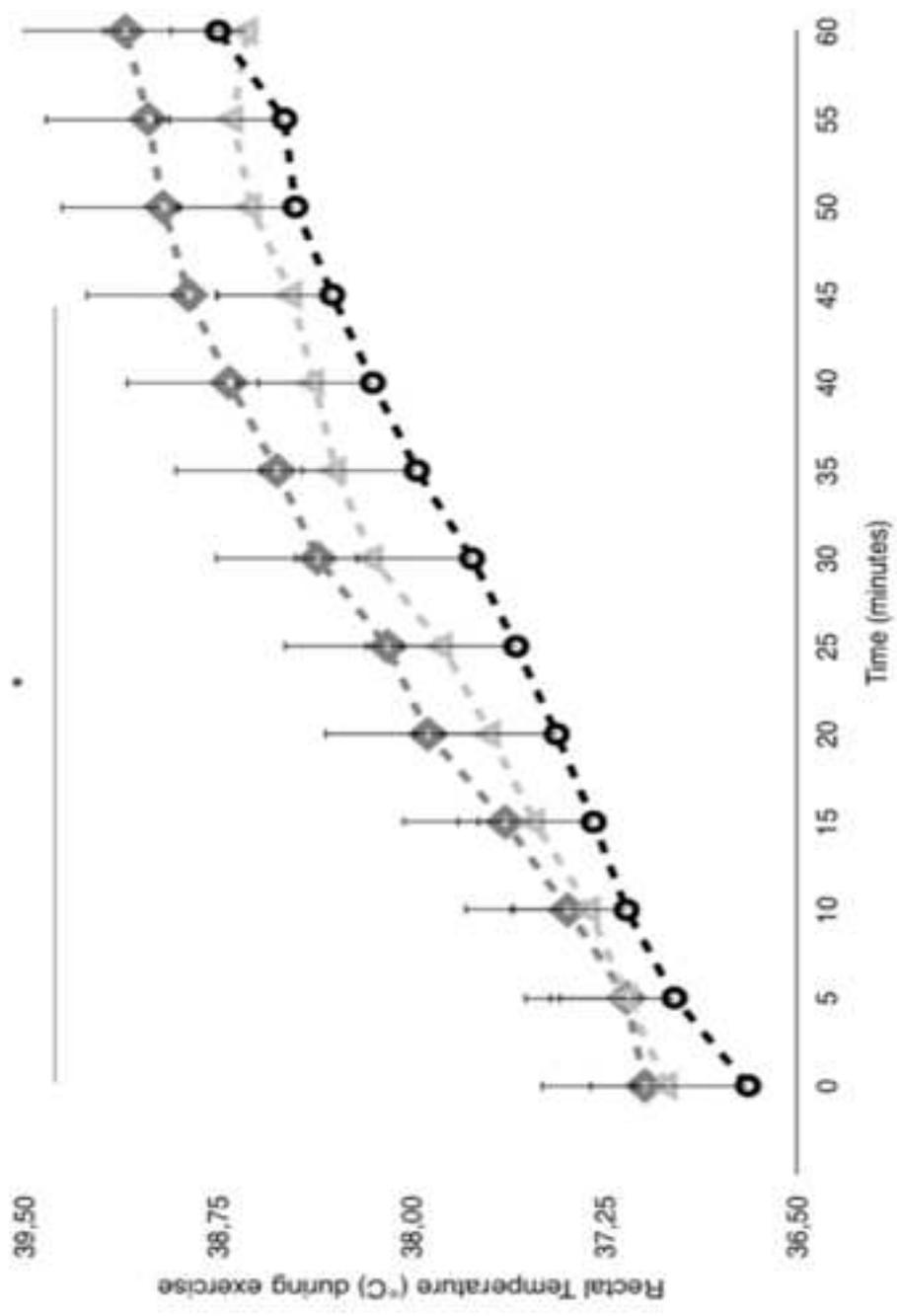
474

1
2
3
4 475 Figure 1. Global performance (km). Performance was significantly higher for Pre-60 than Pre-30
5
6 476 ($P < 0.032$) and Neutral ($P < 0.001$), with no difference between Pre-30 and Neutral.
7
8
9
10 477 Figure 2. Performance by 5-km blocks. Performance was significantly affected by time from 45
11
12 478 min to the end of exercise.
13
14
15
16 479 Figure 3. Rectal temperature ($T^{\circ}\text{C}$) at rest for the three conditions: Pre-60, Pre-30 and Neutral.
17
18 480 T_{rec} was significantly lower in Pre-60 than Pre-30 ($P < 0.043$) and Neutral ($P < 0.046$), with no
19
20 difference between Pre-30 and Neutral.
21 481
22
23
24 482 Figure 4. Rectal temperature ($T^{\circ}\text{C}$) during exercise for the three conditions: Pre-60, Pre-30 and
25
26 483 Neutral. T_{rec} increased over time ($P < 0.001$). T_{rec} was significantly impacted, increasing from
27
28 484 the beginning of exercise to 45 min, with no difference from 45 min to the end of exercise for
29
30 Pre-30 and Neutral, and no significant difference between conditions or condition*time.
31 485
32
33
34
35 486 Figure 5. Thermal comfort (TC) during the resting period and exercise. TC was significantly
36
37 487 affected by time during exercise ($P < 0.001$).
38
39
40
41 488 Figure 6. Thermal sensation (TS). TS was significantly affected by time during the resting
42
43 489 period ($P < 0.05$) and exercise ($P < 0.001$).
44
45
46
47 490 Figure 7. Rate of perceived exertion (RPE) during exercise. RPE was significantly affected by
48
49 491 time ($P < 0.001$).
50
51
52
53
54
55
56
57
58
59
60
61
62
63
64
65









- ◆ Pre-60
- ◊ Pre-30
- ◊ Neutral

