THÈSE

Pour l'obtention du grade de
DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ DE POITIERS
Faculté des sciences du sport
Unité de recherche Mobilité, Vieillissement, Exercice (Poitiers)
(Diplôme National - Arrêté du 25 mai 2016)

École doctorale : Biologie-santé - Bio-santé (Limoges)
Secteur de recherche : Sciences du sport

Présentée par :
Wafa Douzi

Utilisation du froid dans le contexte de l'exercice physique et de la récupération

Directeur(s) de Thèse :
Benoît Dugué, Olivier Dupuy

Soutenue le 28 septembre 2018 devant le jury

Jury :

Président	**Julien Louis**	Lecturer, RISES, Liverpool John Moores University, England
Rapporteur	**Giuseppe Banfi**	Professore, Università Vita-Salute San Raffaele, Milano, Italia
Rapporteur	**Jérémy Coquart**	Professeur, CETAPS, Université de Rouen
Membre	**Benoît Dugué**	Professeur, MOVE, Université de Poitiers
Membre	**Olivier Dupuy**	Maître de conférences, MOVE, Université de Poitiers
Membre	**Frédéric Grappe**	Maître de conférences, Université de Besançon

Pour citer cette thèse :
Wafa Douzi. *Utilisation du froid dans le contexte de l'exercice physique et de la récupération* [En ligne]. Thèse Sciences du sport. Poitiers : Université de Poitiers, 2018. Disponible sur Internet <http://theses.univ-poitiers.fr>

THESE

Pour l'obtention du Grade de

DOCTEUR DE L'UNIVERSITE DE POITIERS

(Faculté des Sciences du Sport)
(Diplôme National - Arrêté du 25 mai 2016)

École Doctorale n° 524 : BIOSANTÉ

Secteur de Recherche : SCIENCES DU SPORT

Présentée par **:**

Wafa DOUZI

UTILISATION DU FROID DANS LE CONTEXTE DE L'EXERCICE PHYSIQUE ET DE LE RÉCUPÉRATION

Directeurs de Thèse :

Olivier DUPUY, MCF

Benoit DUGUE, PR

Soutenue le 28 Septembre 2018

JURY

Mr Guiseppe BANFI	Professeur des Universités, Université San Rafaello, Italie (Rapporteur)
Mr Jeremy COQUART	Professeur des Universités, Université de Rouen (Rapporteur)
Mr Benoit DUGUE	Professeur des Universités, Université de Poitiers (Directeur)
Mr Olivier DUPUY	Maître de Conférences, Université de Poitiers (Directeur)
Mr Frédéric GRAPPE	Maître de Conférences HDR, Université de Franche-Comté (Examinateur)
Mr Julien LOUIS	Senior Lecturer, Université de Liverpool John Moores (Examinateur)

Laboratoire 'Mobilité Vieillissement et Exercice (MOVE)'-EA6314

Pour examiner la vérité, il est besoin, une fois dans sa vie, de mettre toutes choses en doute autant qu'il se peut.

René Descartes

L'accomplissement de ce travail de longue haleine procure une immense satisfaction. Il est temps de se remémorer les différents obstacles qu'il a fallu surmonter mais surtout les personnes qui m'ont permis d'achever ce travail. En fait, je n'aurais jamais pu finaliser ce travail sans le soutien d'un grand nombre de personnes qui m'a permis de progresser dans cette phase délicate de « l'apprenti- chercheur ». Je remercie toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

J'aimerais tout d'abord remercier grandement mon directeur de thèse, monsieur le professeur **Benoit Dugué**, pour la confiance qu'il m'a accordée en acceptant d'encadrer ce travail doctoral et pour toute son aide. Je suis ravie d'avoir travaillé en sa compagnie car outre son appui scientifique, il a toujours été là pour me soutenir et me conseiller au cours de l'élaboration de cette thèse. Je lui suis également reconnaissante pour le temps conséquent qu'il m'a accordé, ses qualités pédagogiques et scientifiques, sa franchise et sa sympathie. J'ai beaucoup appris à ses côtés et je lui adresse ma gratitude pour tout cela.

Je souhaiterais également exprimer mes vifs remerciements et ma gratitude à monsieur le docteur **Olivier Dupuy** qui fut pour moi un co-encadrant de thèse attentif et disponible à chaque fois que j'ai sollicité son aide. Pour son attention de tout instant sur mes travaux, pour ses conseils avisés et son écoute qui ont été prépondérants pour la bonne réussite de cette thèse. Pour la confiance qu'il a pu m'accorder et les conseils précieux qu'il m'a prodigués tout au long de la réalisation de ce travail.

Mes remerciements s'adresseront aussi à, monsieur le professeur **Laurent Bosquet**, le directeur du laboratoire MOVE et tous les membres de laboratoire pour m'avoir accueilli au sein de leur équipe. Qu'ils soient assurés de ma profonde gratitude. J'adresse également mes remerciements au doyen de la faculté Sciences du Sport de Poitiers professeur **Aurélien Pichon** et à tous les personnels de la faculté **Nicole, Isabelle, Sylvie**…pour leur aide durant ces trois années de thèse.

J'adresse aussi mes remerciements aux doctorants et collègues de bureau, **Quentin, Roman, Amélie, Trija, Dimitri et Maxence** *et à mes amis,* **Sara, Hiba, Nihel, Khawla, Amira.**

Je tiens à remercier messieurs : professeur **Guiseppe Banfi**, professeur **Jeremy Coquart**, docteur **Frédéric Grappe** et docteur **Julien Louis** pour l'honneur qu'il me fait en acceptant d'être membres de ce jury de thèse.

À **ma mère, Hana Douzi** : grâce à ses tendres encouragements et ses grands sacrifices, elle a pu créer le climat affectueux et propice à la poursuite de mes études. Aucune dédicace ne pourrait exprimer mon respect, ma considération et mes profonds sentiments envers elle, en espérant qu'elle sera toujours fière de moi. Ce travail lui est dédié à 200%. Sa présence et ses encouragements sont pour moi les piliers fondateurs de ce que je suis et de ce que je fais.

À la mémoire de **mon père**, **Mokhtar Douzi**, je dédie ce travail à son âme. Quelle tristesse je ressens aujourd'hui encore à constater ton absence ! Repose-toi en paix PAPA.

J'adresse toute mon affection à ma sœur, **Imen Douzi**, et mes frères, **Zied Douzi** et **Nizar Douzi**, qui ont tant consenti les plus grands sacrifices pour m'offrir les conditions propices à ma réussite. Ils vont trouver ici l'expression de mes sentiments de respect et de reconnaissance pour le soutien qu'ils n'ont cessé de me porter. Une pensée à mes belles sœurs **Ibtissem ben Ahmed** et **Evgenia Popova** et à mon beau-frère **Mohammed yesser Haffouz**. Je dédie ce travail à mes neveux et nièces : **Mohammed Monawer, Youssef, Eya et Mariem**, aucun mot ne pourrait exprimer l'attachement, l'amour et la tendresse que j'éprouve pour eux.

Un tout grand merci à mon cher fiancé, **Dhiya Tlig**, pour son soutien quotidien indéfectible et ses encouragements qui m'ont apporté le réconfort dont j'avais besoin à l'égard de mes travaux comme de la vie en général.

Ces remerciements ne peuvent pas s'achever sans exprimer ma reconnaissance envers tous les établissements qui ont contribué au financement de cette thèse. J'aimerais d'abord remercier **le Ministère d'Enseignement Supérieur Tunisien** de m'avoir accordé une bourse mensuelle pour mes trois ans de thèse et **le Laboratoire Mobilité Vieillissement et Exercice (MOVE)** d'avoir financé partiellement ma thèse. J'exprime également mes vifs remerciements à **l'école doctorale Sciences biologique et Santé** pour m'avoir fourni des fonds pour présenter mes résultats de thèse lors d'un congrès international organisé en Irlande (European College of Sport Science). Un des travaux de cette thèse n'aurait pas été possible sans une subvention accordée par **les 'Fonds de Recherche et de Technologies du Québec (FRQNT)'** dans le cadre d'une collaboration internationale entre le **Laboratoire MOVE de l'Université de Poitiers** et **l'École de technologie supérieure de Montréal.** Merci au docteur **Ludwig Vinches** et au professeur **Stéphane Hallé** pour cette collaboration.
Un grand merci à tous !

Résumé

L'impact de l'exposition au froid dans le contexte de l'exercice physique et de la récupération sur des variables physiologiques et perceptives a été investigué.

Nous avons mis en évidence, par méta-analyse, que :

- L'exposition au froid lors de l'activité physique permet une amélioration de la performance pour des exercices de type aérobies et anaérobies (taille de l'effet variant suivant la technologie de refroidissement utilisée et la partie du corps refroidie).
- La cryothérapie/cryostimulation et l'immersion en eau froide utilisées à la suite d'une activité physique permet une réduction des courbatures, de la fatigue perçue et des concentrations sanguines de marqueurs de dommages musculaires et de l'inflammation.

Nos travaux expérimentaux montrent que :

- Le port d'un gilet refroidissant lors d'une activité physique éprouvante améliore les réponses perceptives de confort thermique, d'humidité et de bien-etre et réduit le stress physiologique (température cutanée diminuée, retour plus rapide à la fréquence cardiaque de base, amélioration de l'oxygénation cérébrale).
- 3 min d'exposition en cryothérapie corps *partiel* est une durée optimale pour améliorer la qualité de sommeil après un entraînement.
- 3 min d'exposition en cryothérapie corps *entier* améliore la qualité subjective (questionnaires) et objective du sommeil (actimétrie). Les mécanismes liés à cette amélioration dépendent de l'activité du système parasympathique lors des phases de sommeil profond.

Ce travail montre l'efficacité de l'utilisation du froid dans différents contextes de l'activité physique et dans les processus de récupération. Les mécanismes biologiques susceptibles d'interagir dans ces processus de récupération sont présentés.

Mots clés : Froid, récupération, per-cooling, post-cooling, cryothérapie, cryostimulation, immersion en eau froide, gilet refroidissant, douleur, fatigue, inflammation, dommages musculaire, qualité de sommeil.

Abstract

The impact of cold exposure in the context of physical exercise and recovery on physiological and perceptual variables was investigated.

We have highlighted, by meta-analysis, that:

- Exposure to cold during physical activity improves aerobic and anaerobic physical performance (effect sizes depending on the cooling technique and the cooled body area).
- Using cryotherapy / cryostimulation and cold-water immersion following a physical activity reduces muscle soreness, perceived fatigue and blood concentrations of muscle damage and inflammatory markers.

Our experimental work shows that:

- Wearing a cooling vest during a vigorous physical exercise improves perceptual responses such as thermal comfort and reduces physiological stress (reduced cutaneous temperature, faster return to resting heart rate, improvement of the cerebral oxygenation).
- A 3-min partial body cryotherapy exposure is an optimal time to improve the quality of sleep after training.
- A 3-min whole body cryotherapy exposure improves the subjective (questionnaires) and objective (actimetry) sleep quality. The mechanisms related to this improvement seems to depend on the parasympathetic activity during deep sleep episodes.

This work shows the effectiveness of the cooling uses in different contexts of physical activity and recovery processes. The biological mechanisms likely to interact in these recovery processes are presented.

Key words: Cooling, recovery, per-cooling, post-cooling, cryotherapy, cryostimulation, cold water immersion, cooling vest, pain, fatigue, inflammation, muscle damage, sleep quality.

Table des matières

Remerciement.....5
Résumé.....8
Abstract.....9
Tables des matières.....10
Liste des publications.....14
Liste des abréviations.....15
Liste des figures 17
Liste des tableaux 19
Introduction générale.....20
Chapitre 1 : L'utilisation du froid pendant un exercice physique (per-cooling) effectué dans un environnement chaud.....24
I. Les effets délétères de l'hyperthermie 25
1. Les processus et troubles liés à la chaleur.....25
1.2. Les crampes de chaleur.....26
1.3. L'épuisement par la chaleur.....26
1.4. Le coup de chaleur.....26
2. Les effets néfastes de l'hyperthermie chez les travailleurs.....28
3. L'effet de l'hyperthermie sur la performance physique 29
3.1. Exercices d'endurance.....29
3.2. Exercices brefs et intenses.....30
Synthèse 31
4. Les réponses physiologiques et perceptives à l'hyperthermie.....31
4.1. Cardio-vasculaires.....31
4.2. Respiratoires.....32
4.3. Cérébrales.....32
4.4. Perceptives.....33
Synthèse.....35
5. Des solutions pour limiter les effets indésirables de l'hyperthermie.....35
5.1. L'acclimatation à la chaleur.....36
5.2. L'hydratation.....36
5.3. L'utilisation de froid.....37
6. Conclusion (partie I) 38

II. Utilisation du froid dans le contexte de l'exercice : le per-cooling.....39
1. Définition du "per-cooling".....39
2. Les utilisations du "per-Cooling".....39
2.1. Contexte sportif.....39
2.2. Utilisation du "per-cooling" chez les travailleurs en environnement chaud.....40
3. Les techniques du "per-cooling".....41
Synthèse.....46
4. L'effet du "per-cooling" sur la performance.....46
4.1. "per-cooling" et exercice d'endurance.....46
4.2. "Per-cooling" et exercices intenses et brefs.....47

Synthèse.....48
5. L'efficacité de "per-cooling" selon la région du corps refroidie.....48
5.1. Refroidissement du corps entier ou plusieurs parties du corps.....48
5.2. Refroidissement de tronc 49
5.3. Refroidissement de la tête et du cou.....49
5.4. Refroidissement de visage.....50
5.5. Refroidissement de la main.....50
5.6. Refroidissement interne.....50
Synthèse.....51
6. Les réponses physiologiques et perceptive au "per-cooling".....51
6.1. Réponses thermorégulatrices.....52
6.2. Réponses cardiovasculaires.....52
6.3. Ajustements du système nerveux central.....53
6.4. Réponses perceptives.....53
Synthèse.....54
7. Influence de la température ambiante sur l'efficacité de per-cooling.....54
8. Les Considérations pratique du "per-cooling".....55
9. Les limites de l'utilisation du "per-cooling" 57
10. Conclusion (partie II) 57

Chapitre 2 : L'utilisation du froid comme moyen de récupération : "Post-cooling".....60
1. La récupération après un exercice induisant des dommages musculaires (EIDM).....61
1.1. Caractéristiques des exercices induisant des dommages musculaires.....61
1.2. La récupération 62
Synthèse.....63
2. Définition du "post-cooling" 63
3. Techniques du "post-cooling".....64
4. Modalités optimales du post-cooling.....66
4.1. Immersion en eau froide.....66
a) La température d'immersion.....66
b) La durée d'immersion.....67
c) Le niveau d'immersion.....67
4.2. Cryothérapie.....68
a) Durée et température de l'exposition à la cryothérapie.....68
b) Type d'exposition : corps entier ou partiel.....68
c) Nombre de sessions de cryothérapie.....68
Synthèse.....69
5. Effet du post cooling sur les paramètres perceptifs 69
5.1. Les douleurs musculaires d'apparition retardée (DOMS).....70
5.2. La fatigue perçue.....71
5.3. La qualité de sommeil 71
a) Rôle du sommeil dans le processus de la récupération.....71
b) Evaluation de la qualité du sommeil.....72
c) Effet du post-cooling sur la qualité du sommeil.....72
Synthèse.....73

6. Effet du post cooling sur les marqueurs des dommages musculaires et d'inflammation....74
6.1. Marqueurs des lésions musculaires : La créatine kinase et la lactate déshydrogénase....74
6.2. Marqueurs inflammatoires....74
7. Effet du post-cooling sur la performance physique....75
7.1. Effet de la cryothérapie sur la récupération de la performance....75
7.2. Effet de CWI sur la récupération de la performance....76
Synthèse....77
8. Les réponses physiologiques au "post-cooling"....78
8.1. Réponses cardiovasculaires....78
8.2. Réponses métaboliques....78
8.3. Réponses du système nerveux autonome....79
8.4. Réponses immunitaires....79
Synthèse....80
9. Les Considérations pratique du Post-cooling....81
10. Les limites de l'utilisation du "Post-cooling"....81
11. Conclusion (chapitre 2)....83

Chapitre 3 : Les Etudes bibliographiques et expérimentales....85
1. Objectif et Hypothèses de la thèse....86
1.1. Objectif....86
1.2. Hypothèses....86
2. Méthodes et mesures....87
2.1. Méthodologie des travaux de méta-analyse....87
a) Recherche bibliographique....87
b) Critères d'inclusion et d'exclusion....87
c) Codage des études....89
d) Evaluation de la qualité méthodologique des études....89
2.2. Méthodes et mesures des études expérimentales....90
a) Sujets....90
b) Protocole général....91
c) Evaluations physiques et entrainements....92
c) Mesures....93
d) Gilets refroidissants et chambres de cryothérapie....96
3. Les études de thèse :....98
3.1. Etudes 1 (per-cooling)....98
a) Résumé....98
b) Article....100
3.2. Etude 2 (per-cooling)....121
a) Résumé....121
b) Article....123
3.3. Etude 3 (per-cooling)....137
a) Résumé....137
b) Article....139
3.3. Etude 4 (post-cooling)....149

a) Résumé.....149
b) Article..... 151
3.4. Etude 5 (post-cooling) 173
a) Résumé.....173
b) Article.....175
3.5. Etude 6 (post-cooling) 181
a) Résumé.....181
b) Article 183
Discussion Générale.....192
1. Le Per-cooling.....193
1.1. Effet du Per-cooling sur la performance aérobie et anaérobie.....193
1.2. Les réponses physiologiques et perceptives au per-cooling 194
2. Le Post-cooling 197
2.1. Effet du post-cooling sur DOMS, fatigue perçue et marqueurs des dommages musculaires et d'inflammation.....197
2.2. Effet du post-cooling (cryothérapie) sur la qualité de sommeil.....198
2.3. Effet du post-cooling sur la variabilité de la fréquence cardiaque.....200
Limites des études de thèse.....202
Conclusion Générale.....204
Perspectives.....207
Références.....209

Liste des publications portant sur la thématique de thèse

1) Dupuy, Olivier, **Wafa Douzi**, Dimitri Theurot, Laurent Bosquet, et Benoit Dugué. 2018. « An Evidence-Based Approach for Choosing Post-Exercise Recovery Techniques to Reduce Markers of Muscle Damage, Soreness, Fatigue, and Inflammation: A Systematic Review with Meta-Analysis ». Frontiers in Physiology. 9:403. https://doi.org/10.3389/fphys.2018.00403

2) **Douzi W,** Dupuy O, Theurot D, Boucard G, Benoit Dugué. Cryostimulation after training improves sleep quality in professional soccer players. En revision dans Journal of Sports Science and Medicine.

3) **Douzi W,** Dugué B, Vinches L, Sayed C, Hallé S, Bosquet L, Dupuy O. Cooling during exercise enhances aerobic and anaerobic exercise performances, but the cooled body areas matter: A systematic review with meta-analyses. En revision à Sports Medicine.

4) **Douzi W**, Dupuy O, Tanneau M, Boucard G, Benoit Dugué. A 3-min whole-body cryotherapy improves objective and subjective sleep quality in physically active men after a standardized exhaustive exercise. soumis à Journal of Science and Medicine in Sport.

5) **Douzi W**, Dugué B, Theurot D, Dupuy O. Physiological and perceptual responses during submaximal exercise and recovery in ambient temperature: the impact of wearing a new kind of cooling system. En préparation en vue d'une soumission au Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports.

6) Al Sayed C, Vinches L, Dupuy O, **Douzi W**, Dugué B, Hallé S. Development of a new Air/CO2 cooling garment: presentation of the prototype and the benefits of its use in terms of physiological and perceptive responses in subjects exposed to a hot and humid climate during physical activities. En préparation en vue d'une soumission au Building and Environnent.

Communications Affichées

1) 17ème Congrès de l'Association des Chercheurs en Activités Physiques et Sportives (ACAPS) (29 à 31 octobre 2017 à Dijon, France) : **Wafa DOUZI**, Benoit DUGUE, Dimitri THEUROT, Laurent BOSQUET, Olivier DUPUY. Courbatures et lésions musculaires après exercice physique : une méta-analyse pour comparer les techniques de récupération. Session A-7 Physiologie, Poster n°29.

2) Séminaire thématique de l'école doctorale (Mars 2016) : **Wafa DOUZI,** Olivier Dupuy, Benoit Dugué. Development of an individual cooling jacket adapted to work in deep mines.

Communications orales

Le 23ème congrès annuel de "European Congress of Sport Science (ECSS) (4 au 7 juillet 2018 à Dublin, Irlande): **Douzi W**, Dugué B, Vinches L, Sayed C, Hallé S, Bosquet L, and Dupuy O. Cooling during exercise enhances aerobic and anaerobic exercise performances: Which body area should we cool? A systematic review with meta-analyses. Session de thermorégulation (MO-PM19), presentation n°5.

Liste des abréviations

DOMS : Douleurs musculaires à apparition retardée, ‘Delayed Onset Muscle Soreness’

ETP : équivalent temps plein.

NIOSH : Institut National de la Sécurité et de la Santé.

Tlim : Tests de temps limite.

CM : Contre-la-montre.

MVC : Contraction maximale volontaire.

NH3: Ammoniac.

ATP: Adénosine triphosphate.

PCr : Phosphocréatine.

PaCO2 : Pression artérielle de dioxyde de carbone.

RPE : Perception de la difficulté de l’effort.

EEG : Activité électrique cérébrale.

ECG : Activité électrique cardiaque.

EMG : Activité électrique musculaire.

CNS : Système nerveux central.

Tair : Température ambiante.

Tsk : Température cutanée.

Tc : Température centrale.

T : Température corporelle

Q : Débit cardiaque.

FS : Flux sanguin.

PVC : Pression veineuse centrale.

ACLS : Soins Spécialisés en Réanimation Cardio-Pulmonaire, ‘Advanced Life Cardiac Life Support’.

WBGT: ‘Wet Bulb Globe Temperature’.

ES : Taille d’effet.

VE : Vêtement de refroidissement par évaporation.

VL : Vêtement de refroidissement liquide.

VCF : Vêtements de refroidissement à changement de phase.

CC : Collier de refroidissement du cou.

RTX : Dispositif de refroidissement de la main.

$\dot{V}$O2max : Consommation maximale d’oxygène.

PRM : Mémoire de reconnaissance visuelle.

SSP : Capacité de mémoire de travail.

TC : Tête et cou.

TRPM8 : Récepteurs sensibles au froid et au menthol.

EIDM : Exercice induisant des dommages musculaires.

RLO : Radicaux libres oxygénés.

CK : Créatine Kinase.

LDH : Lactate Déshydrogénase.

CWI : Immersion en eau froide.

CE : cryothérapie corps entier.

CP : Cryothérapie corps partiel.

IASP : Association internationale de l'étude de la douleur.

IL : Interleukine.

CRP : Protéine C-réactive.

PAS : Récupération passive.

VSC : Volume sanguin central.

VES : Volume d'éjection systolique.

VFC : Variabilité de la fréquence cardiaque.

FC : fréquence cardiaque

RMSSD : Racine carrée des différences moyennes des intervalles RR, Root Mean Square of the Successive Differences.

HF : L'énergie spectrale des hautes fréquences.

LF : L'énergie spectrale des basses fréquences.

HRmean : Fréquence cardiaque moyenne

NIRS : Spectroscopie dans le proche infrarouge, Near Infrared Spectroscopy.

O2HB : Hémoglobine oxygénée.

HHB : Hémoglobine désoxygénée.

THB : Hémoglobine totale.

HB-Diff : Différence entre O2HB et HHB.

TSI : Indice de saturation de l'oxygénation tissulaire.

APTS-P5 : Système avancé de thermorégulation personnelle Mawashi.

VMA : Vitesse Maximale Aérobie.

VAS : Visual Analog Scale.

SMD : Différence moyenne standardisée.

Liste des figures

Figure 1 : Les parties de la thèse.....23
Figure 2 : Mécanismes du contrôle neuronal de la dissipation de chaleur (Kellogg 2012).....25
Figure 3 : Séquence des évènements conduisant à un coup de chaleur en passant d'un stress thermique compensable à un stress thermique incompensable (Epstein et Roberts 2011).....27
Figure 4 : Résumé des valeurs de WBGT correspondantes à des risques faibles, modérés, élevés et très élevés de maladies liées à la chaleur selon les organisations internationales.....27
Figure 5 : Visites mensuelle d'urgence normalisées pour les heures de travail à temps plein dans le sud-ouest de l'Ontario, Canada, 2004-2010. (Fortune et al. 2014).....28
Figure 6 : Résumé des réponses physiologiques et psychologiques lors d'un exercice effectué dans un environnement chaud (Nybo et al. 2014).....34
Figure 7 : Adaptations au stress thermique durant deux semaines d'exposition à la chaleur (Périard et al .2015).....36
Figure 8 : Temps d'exercice en minutes dans les différentes conditions d'utilisation du froid et dans la condition contrôle (Stevens et al. 2017).....38
Figure 9 : Effets délétères de l'hyperthermie et solutions possibles.....39
Figure 10 : Travailleurs de construction portant leurs gilets de refroidissement à Qatar.....41
Figure 11 : Gilets refroidissants. (a) gilet avec poches de glace (forme passive) ; (b) : Gilet avec des systèmes de ventilation.....41
Figure 12 : Vêtements de refroidissement. (a) Refroidissement par évaporation (la société Kuc hofuku, Japon) ; (b) Refroidissement liquide (agence d'exploration aérospatiale, japon) ; (c) : Refroidissement à partir des tissus à changement de phases (Sarkar et Kothari. 2014).....42
Figure 13 : Maria Sharapova boit de l'eau froide pendant son match au 7ème jour Roland-Garros français. 2013 à Paris, France.....43
Figure 14 : Jerzy Janowicz (un joueur de tennis professionnel polonais) aime être refroidi par un ventilateur d'air froid au tournoi de tennis professionnel. Melbourne, Australie 2014.....44
Figure 15: Colliers de refroidissement du cou utilisé dans l'étude de Tyler et Sunderland (2011).....45
Figure 16: Machine de refroidissement de la main utilisée dans l'étude Amorim et al (2010).....45
Figure 17 : Temps d'exercice à une indice de contrainte physiologique (PSI) de 7,5 (effort modéré-élevé) (McFarlin et al. 2016).....46
Figure 18 : Nombre de répétitions lors d'un test de développé couché (4 séries à 85% de 1RM) pendant les conditions Contrôle, main chaude et main froide (Kwon et al. 2015).....47
Figure 19 : Résumé des réponses physiologiques et perceptives au "Per-cooling.....54
Figure 20 : Estimation des conditions environnementales auxquelles l'ingestion de l'eau froide fournit un effet de refroidissement net pour le pédalage à une puissance externe de 180, 240 et 300 W (Jay et Morris 2018).....55
Figure 21 : Résumé des facteurs influençant l'effet du per-cooling, ses effets sur les réponses physiologiques et ses avantages en domaines sportif et industriel.....59
Figure 22 : Processus inflammatoire aigu déclenché par un exercice induisant des dommages musculaires (EIMD) (Ferreira-Junior et al. 2014).....61
Figure 23 : Evolution de la performance en cas de récupération insuffisante (Gremion et Kuntzer 2014).....62
Figure 24 : Membres de l'équipe féminine de basketball britannique prennent un bain de glace après l'entraînement. Les Jeux Olympiques de Londres 2012.....65

Figure 25 : Cabine de cryothérapie (à gauche) et chambre de Cryothérapie corps entier (à droite) (Centre de Cryothérapie à Aix en Provence, France) 65
Figure 26 : Des joueurs américains, LeBron James (R) et Dwyane Wade (L), utilisent des poches de glace à l'issue d'une séance d'entraînement pendant le championnat du monde de basketball 2006 à Séoul, le 12 août 2006.....66
Figure 27 : Force maximale volontaire (MVC) évaluée après les trois techniques de récupération (après 1h, après 24h, après 48h) (Hausswirth et al. 2011).....75
Figure 28 : Résumé des réponses physiologiques au "Post-cooling".....80
Figure 29 : Résumé des facteurs influençant l'effet du post-cooling, ses effets sur les réponses physiologiques et sur les paramètres objectifs et subjectifs.....84
Figure 30 : Organigramme du processus d'inclusion des études du per-cooling.....88
Figure 31 : Organigramme du processus d'inclusion des études du post-cooling.....88
Figure 32 : Protocole de la première étude du post-cooling.....92
Figure 33 : Protocol de la deuxième étude du post-cooling. 92
Figure 34 : Vélo ergomètre Monark.....93
Figure 35 : ActiGraph GT3X.....93
Figure 36 : Appareils utilisés pour les mesures physiologiques.....95
Figure 37 : Système avancé de thermorégulation personnelle Mawashi (APTS-PS, Canada).....96
Figure 38 : Prototype du gilet refroidissant.....96
Figure 39 : Cryo-cabine.....97
Figure 40 : Chambre de cryothérapie corps entier 97
Figure 41 : Moyennes de la température cutanée du tronc pendant le repos, l'exercice et la récupération avec veste activée (ON) ou désactivée (OFF). * différence significative par rapport au contrôle.....121
Figure 42 : Moyennes de la perception de température (a), bien-être (b) et d'humidité (c) pendant l'exercice et la récupération dans les deux conditions. * différence significative par rapport au contrôle (p<0.05).....122
Figure 43 : Cinétique de la température interne pendant l'exercice et la récupération. # Différence significative entre les conditions (p <0,05).....137
Figure 44 : Cinétique de la fréquence cardiaque pendant l'exercice et la récupération. # Différence significative entre les conditions (p <0,05).....138
Figure 45 : Somme des mouvements (counts) par minute sur les 3 axes de mouvement pendant la nuit suivant l'exposition à la cryostimulation (180s, 90s et 2x90s) et la session contrôle.....173
Figure 46 : Taille de l'effet (g de Hedges) des changements de l'activité des "counts" dans les trois axes de l'espace pendant la nuit suivant les expositions à la cryostimulation par rapport à la session decontrôle.....174
Figure 47 : Pourcentage de réduction de la douleur perçue le jour suivant l'exposition à la WBC ou la récupération passive.....181
Figure 48 : Moyenne des mouvements (count/min) sur les trois axes (X, Y et Z) 182

Liste des tableaux

Tableau 1 : Définition du per-cooling et quelques exemples des sports employant le per-cooling (Adams et al. 2018)……...…..……...40

Tableau 2 : les techniques optimales du Per-cooling selon le sport pratiqué…….....56

Tableau 3: Définition du post-cooling et quelques exemples des sports employant le Post-cooling (Adams et al. 2018)……..64

Tableau 4 : Caractéristiques des participants dans les études expérimentales……....90

Introduction générale

La température du corps humain est régulée par différents processus de thermorégulation afin d'assurer un bon fonctionnement physiologique. Au cours d'un exercice physique, seulement 20-30% de l'énergie chimique est utilisée pour le travail mécanique musculaire et 70-80% est transformée en chaleur. L'augmentation de la température corporelle au cours de l'exercice physique est aussi bien observée dans des conditions froides, chaudes et humides (Kenefick et al. 2010 ; Buono et Cabrales 2016 ; Cuddy et al. 2014 ; Muhamed et al. 2016 ; Veltmeijer et al. 2015). L'augmentation de la température interne au-delà de 40°C, appelée aussi plus communément hyperthermie, induit des perturbations physiologiques qui peuvent conduire à un épuisement précoce et à des coups de chaleur (Cleary et al .2014). En effet, l'augmentation conjointe de la température interne du corps et de la température cutanée peut conduire à une diminution des performances physiques (Kenefick et al. 2010 ; Buono et Cabrales 2016; Cuddy et al . 2014).

De plus, l'exposition à un environnement chaud et humide, accélère ces perturbations physiologiques aussi bien aux niveaux cardiovasculaire, respiratoire que perceptif et cérébrale (Nybo et al. 2014). Ces altérations provoquent une fatigue précoce, une incapacité à tolérer la charge de travail, voire même, une dégradation de la performance physique. Les conséquences de cette exposition à la chaleur peuvent être lourdes de conséquences tant sur le plan professionnel que sportif. En effet, il a été démontré que l'exposition de certains travailleurs (pompiers, mineurs...) à des conditions climatiques extrêmes, pouvait augmenter le nombre de pauses, une baisse de rendement et donc de la productivité (Xiang et al. 2016). Également,, le stress thermique développé, pourrait altérer l'état de vigilance des travailleurs et augmenter la prévalence des accidents de travail (Cheung et al. 2016). Dans le domaine sportif, les événements les plus populaires comme par exemple, les Jeux Olympiques d'été, la coupe du Monde de la FIFA ou encore le Tour de France, peuvent parfois se dérouler dans des environnements relativement chauds et humides. Ainsi, l'exposition de l'athlète à ce type d'environnement peut induire une augmentation très importante de la température corporelle, une déshydratation sévère et ainsi affecter négativement sa performance physique. Plus généralement, les conséquences à ces conditions extrêmes peuvent entraîner des répercussions néfastes et des problèmes de santé majeurs (Racinais et al. 2015).

Le défi serait ainsi de maintenir un niveau optimal de performance sans pour autant compromettre la sécurité des individus en proposant des stratégies permettant de réduire la contrainte thermique. Cet enjeu est d'importance capitale pour les organisateurs de compétitions de haut niveau à venir, telles que la future coupe du monde de football organisée au Qatar en 2022 ou par les employeurs de travailleurs exposés à ces conditions extrêmes. De nombreuses solutions peuvent être utilisées pour réduire le stress thermique et optimiser la performance, telles que l'acclimatation à la chaleur, la bonne hydratation, et l'utilisation du froid. Ce dernier a suscité l'intérêt de nombreux travaux scientifiques soit dans le but de réduire le stress thermique au cours de l'exercice physique (per-cooling), soit dans le but d'accélérer la récupération post-exercice (post-cooling).

Le "**per-cooling**" a été utilisé pour limiter les effets néfastes de l'hyperthermie et ainsi optimiser la performance, soit chez des athlètes, soit chez des personnes travaillant dans des conditions environnementales extrêmes. Cette stratégie a pour avantage de refroidir directement le corps humain, lorsque celui-ci est déjà soumis à la chaleur. Il a ainsi un impact

immédiat sur la performance. Dans ce cadre, de nombreux travaux récents rapportent plus d'avantages avec le per-cooling qu'avec le pré-cooling (Stevens et al. 2017; Bongers et al. 2015b). En effet, les chercheurs recommandent l'utilisation du per-cooling pendant les mi-temps des matchs, lors les compétitions, ou pendant les séances d'entraînement. Ceci permettrait de faciliter la dissipation de la chaleur, améliorer le confort thermique et optimiser la performance (Ruddock et al. 2017). Dans le contexte non sportif, l'utilisation du per-cooling a un impact dans la prolongation du temps de travail et l'amélioration de la productivité. L'utilisation du froid comme moyen de récupération, ou "**post-cooling**", est une stratégie de récupération très courante dans le domaine sportif. Parmi ces techniques, l'immersion en eau froide ou encore la cryostimulation/cryothérapie sont les plus utilisées. Cette technique réduit la température corporelle, les douleurs musculaires et l'inflammation provoquée par l'activité physique (Rose et al. 2017). De plus, il s'avère que le post-cooling assure un retour plus rapide à l'homéostasie grâce à son effet antioxydant et analgésique (Bouzigon et al. 2016).

Bien que l'utilisation du froid soit de plus en plus répandue dans le domaine sportif ou industriel, son effet sur certains paramètres reste très peu discuté. Cela concerne autant le contexte de l'exercice physique que celui de la récupération. En effet, l'effet du per-cooling sur la performance physique est critiquable en raison des protocoles très diversifiés, en termes de durée, de la technique utilisée et du site d'application du froid. Ainsi, plusieurs questions concernant l'effet du per-cooling sur la performance (aérobie, anaérobie) et les facteurs influençant ces effets (technique de refroidissement utilisée ou partie du corps refroidie) ont été abordées dans ce travail de thèse et ont fait l'état d'un premier travail de méta-analyse (1). Etant donné que les mécanismes physiologiques sous-jacents à l'amélioration des performances physiques sous l'influence du cooling sont peu compris, deux travaux expérimentaux ont été également menés pour étudier les effets de per-cooling (gilet refroidissant) sur les réponses physiologiques (fréquence cardiaque, échanges gazeux, température cutanée et oxygénation cérébrale et musculaire) et perceptives. Le premier, en condition thermo-neutre, (22 °C, 25% d'humidité) (2), puis le second, en condition chaude et humide (Chambre climatique : 30°C, 60% d'humidité) (3). L'objectif de ce travail sera d'apporter des réponses et des considérations pratiques concernant l'impact du per-cooling sur les performances physiques et d'en comprendre les mécanismes perceptifs et physiologiques explicatifs.

D'autre part, la multitude des techniques de récupération (massage, étirement, électrostimulation, vêtements de compression, récupération active), y compris le post-cooling, nous amène à aborder plusieurs questions concernant l'effet de ces techniques sur les marqueurs principaux de la récupération, tels que les douleurs musculaires à apparition retardées (DOMS), la fatigue perçue et les marqueurs de dommages musculaires et d'inflammation. Pour répondre à ces questions une autre méta-analyse a été réalisée (4). Enfin, parmi les différents facteurs de la récupération, le sommeil est l'un des principaux. Bien qu'il existe un consensus général sur son importance dans une récupération réussie (Samuels 2009), l'effet du refroidissement sur la qualité du sommeil est très peu étudié. Nous émettons l'hypothèse selon laquelle, l'exposition au froid améliorerait la qualité du sommeil, réduirait la sensation de fatigue et de douleur, et le tout probablement accompagné d'un meilleur tonus parasympathique de repos. Pour évaluer cette hypothèse, deux travaux

expérimentaux ont été réalisés. Le premier vise à comparer l'effet de différentes durées d'exposition à la cryothérapie (1min30s ; 2 fois 1min30s et 3min) sur la qualité de sommeil, après une séance d'entraînement de football (5). L'objectif de ce travail, était de fournir une recommandation claire concernant la durée d'exposition la plus optimale pour améliorer la qualité de sommeil. Le second vise à étudier l'effet de l'exposition au froid sur la qualité du sommeil et le tonus parasympathique durant celui-ci, à la suite d'un exercice physique intense (6).

Ce travail de thèse sera présenté en deux parties principales : un cadre théorique puis un cadre expérimental. Le cadre théorique sera constitué de deux chapitres. Un premier chapitre de littérature sera consacré aux effets de l'hyperthermie sur les performances physiques, ainsi que les réponses physiologiques et perceptives associées. Une sous-partie exposera ensuite l'effet du per-cooling sur les performances physiques ainsi que les réponses physiologiques et perceptives sous-jacentes. Un second chapitre sera consacré aux effets du post-cooling sur les paramètres d'ordre subjectif (perception de la douleur et de la fatigue musculaire, qualité du sommeil) et objectif (inflammation, marqueurs des dommages musculaires et mesures de performance) de la récupération. De plus, les protocoles optimaux du post-cooling, présentés dans la littérature, en termes de température, de durée, du type et du nombre d'expositions, seront également présentés. Pour finir ce chapitre, les réponses physiologiques liées au post-cooling seront également présentées.
Ensuite le cadre expérimental sera exposé sous forme « thèse par article » où seront rappelés les hypothèses et objectifs de ce travail de thèse ainsi qu'une méthodologie générale. Les articles expérimentaux produits seront ensuite présentés. Pour terminer, une discussion générale et une conclusion termineront ce chapitre.

L'ensemble des parties de cette thèse est présenté dans la figure suivante **(figure 1)** :

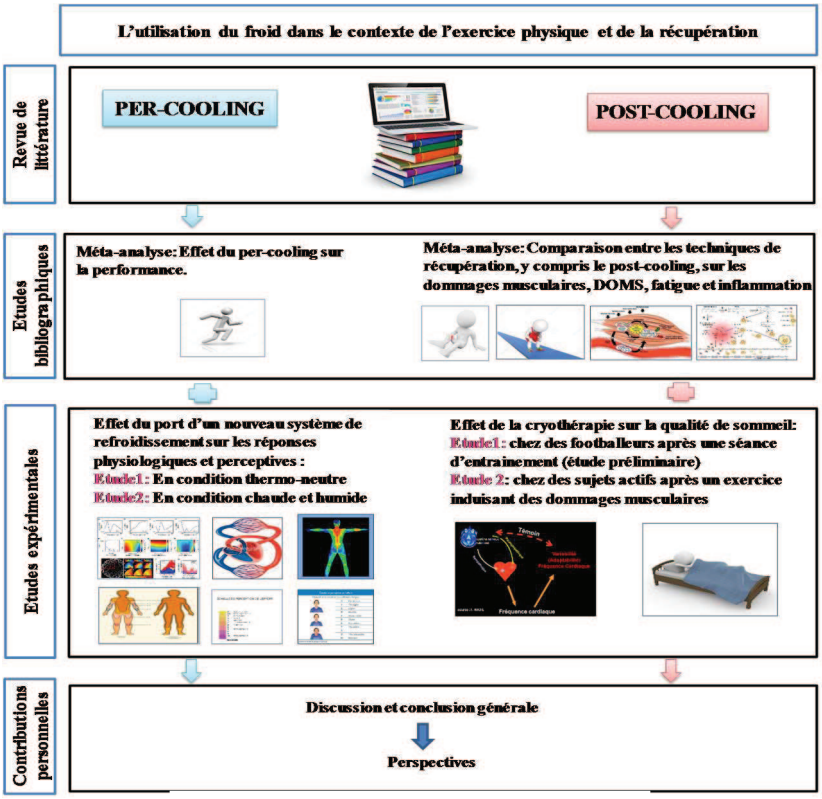


Figure 1 *: Les parties de la thèse*

Chapitre 1

I. Les effets délétères de l'hyperthermie :

1. Les processus et troubles liés à l'hyperthermie :

L'hypothalamus intègre en permanence des informations liées à notre température interne et cutanée sous forme d'une température corporelle moyenne. Ce dernier compare cette valeur moyenne à une température de référence correspondant à 37 °C (Wendt, van Loon, et Lichtenbelt 2007). Lorsque la température corporelle est supérieure ou inférieure à cette valeur de référence, des processus de thermorégulation se déclenchent pour stimuler soit la production soit la dissipation de la chaleur. Pour dissiper la chaleur, les deux branches du système nerveux autonome s'activent. La branche parasympathique stimule la transpiration, et celle du système sympathique stimule la vasodilatation cutanée, induisant ainsi l'augmentation du flux sanguin cutané et l'évacuation de la chaleur (Wexler 2002) **(Figure 2).** Différents mécanismes de conduction, convection, radiation et évaporation sont ainsi initiés pour augmenter la dissipation de la chaleur.

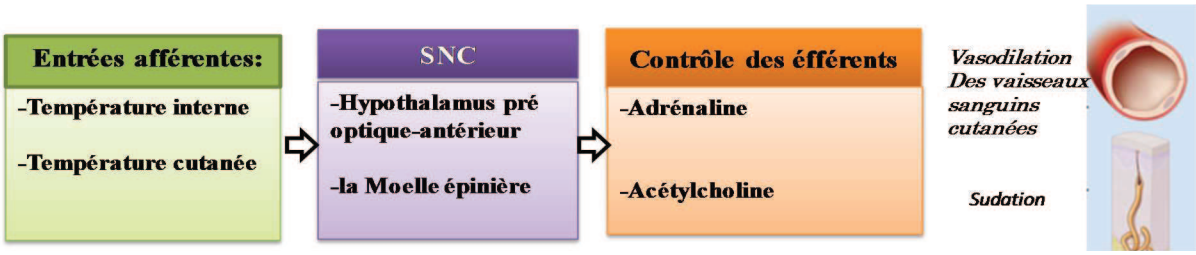


***Figure 2**: Mécanismes du contrôle neuronal de la dissipation de la chaleur (Kellogg 2012).*

Néanmoins, une température ambiante trop élevée conduit à un gain systématique de la chaleur (par conduction), induit par un gradient thermique trop important entre l'air et la surface du corps (Température air > Température peau). Ce gain de chaleur combiné à un exercice physique rend le corps humain incapable de maintenir un état d'équilibre thermique. Ce déséquilibre de balance thermique s'explique par l'incapacité du corps humain à dissiper la chaleur produite par l'exercice physique et la charge thermique apportée par le milieu extérieur (Cheung et al . 2000). Cet état conduit généralement à une augmentation constante de la température centrale, correspondant à une situation thermique non compensable (Kenny et al. 2011). Cette situation également appelée hyperthermie est définie comme une « augmentation de la température centrale au-dessus d'une valeur correspondant à un état normal, soit 37 °C au repos soit 38 °C pendant un exercice physique modéré » (Commission for Thermal Physiology of the International Union of Physiological Sciences 1987).

L'augmentation de la température centrale peut conduire à l'apparition de troubles liés à la chaleur, souvent dus souvent à l'incapacité du corps humain à dissiper la chaleur produite conjointement par l'activité métabolique et l'exposition à des conditions chaudes (Wexler 2002). Également, l'augmentation de la température et de l'humidité ambiante, rend difficile la dissipation de la chaleur (par une évaporation de la sueur) par le corps, en raison de la forte concentration de vapeur d'eau dans l'air. Cette situation réduisant ainsi la capacité du corps à dissiper la chaleur produite pendant l'activité physique (Bolster et ARMSTRONG 2000).

Dans la littérature scientifique, trois troubles liés à la chaleur sont souvent étudiés : les crampes de chaleur, l'épuisement par la chaleur et le coup de chaleur.

1.1. Crampe de chaleur :

Dans un environnement chaud, les crampes de chaleur se caractérisent par « une contraction musculaire aiguë, douloureuse et involontaire pendant ou après des séances d'exercices intenses » (Binkley et al. 2002). Les crampes impliquent également des spasmes douloureux généralement aux niveau des bras, des jambes, de l'abdomen, ou du tronc (Wexler 2002). Les crampes se produisent à cause d'une déshydratation et d'un déséquilibre d'électrolytes tels que l'épuisement du sodium (Bergeron 2003). Le déconditionnement et la fatigue peuvent être des facteurs favorisant l'apparition des crampes musculaires (Bentley 1996). Ce trouble peut être évité grâce aux étirements, au maintien d'une bonne hydratation et à une restitution des pertes de fluides et de sodium (à l'aide des solutions d'électrolytes commerciaux) (Wexler 2002).

1.2. L'épuisement par la chaleur :

"L'épuisement par la chaleur" est souvent décrit comme une condition dans laquelle la personne s'effondre à cause d'un trouble de thermorégulation pendant ou après un exercice physique dans un environnement chaud (Wendt et al. 2007). Cet état est également caractérisé par une incapacité à continuer l'exercice, associé à d'autres symptômes tels que la transpiration abondante, la déshydratation, l'épuisement et la perte d'électrolytes (sodium) (Binkley et al. 2002). La température corporelle, lors d'un état d'épuisement par la chaleur, est généralement supérieure à 38 °C mais inférieure à la valeur atteinte lors d'un coup de chaleur, qui est de 40 °C. Le traitement doit commencer dès l'apparition des symptômes par la mise en place des patients dans un environnement frais avec une restitution des liquides et du sodium par voie orale (Wexler 2002).

1.3. Le coup de chaleur :

Le coup de chaleur est le trouble le plus meurtrier des maladies liées à l'hyperthermie, il se produit lorsque la température corporelle atteint 40 °C. Cette température est associée à des altérations au niveau des organes vitaux tels que le cœur et le cerveau (Binkley et al. 2002). En outre, la surchauffe des organes induit un dysfonctionnement du centre de thermorégulation, un arrêt de la transpiration et une altération sévère de l'état mental (Knochel 1996; Coris et al. 2004). Ces troubles peuvent aboutir à la mort. Le taux de mortalité pouvant atteindre 10% (Centers for Disease Control and Prevention. 1995).

Le coup de chaleur se produit en passant d'un stress thermique compensable à un stress thermique non compensable **(Figure 3).** Dans cette première phase la réponse thermorégulatrice se déclenche. Elle s'associe à une augmentation du débit cardiaque (Q) et du flux sanguin (FS) cutané. Néanmoins, une fois que le seuil de stress thermique est dépassé (incapacité à dissiper la chaleur), la pression veineuse centrale (PVC) diminue significativement avec une élévation importante de la température centrale (Tc). Cela crée une altération de la thermorégulation qui sera ensuite aggravée par une détresse circulatoire, une endotoxémie et par un déséquilibre ionique intracellulaire (déplétion énergétique). Des dysfonctionnements rénaux, hépatiques, respiratoires et cardiaques se produisent suite à la détresse circulatoire (Bouchama et Knochel 2002). Toutes ces défaillances peuvent entraîner la mort (Epstein et Roberts 2011). L'ensemble des évènements conduisant à un coup de chaleur est détaillé dans la figure présentée ci-dessous (Epstein et Roberts 2011) :

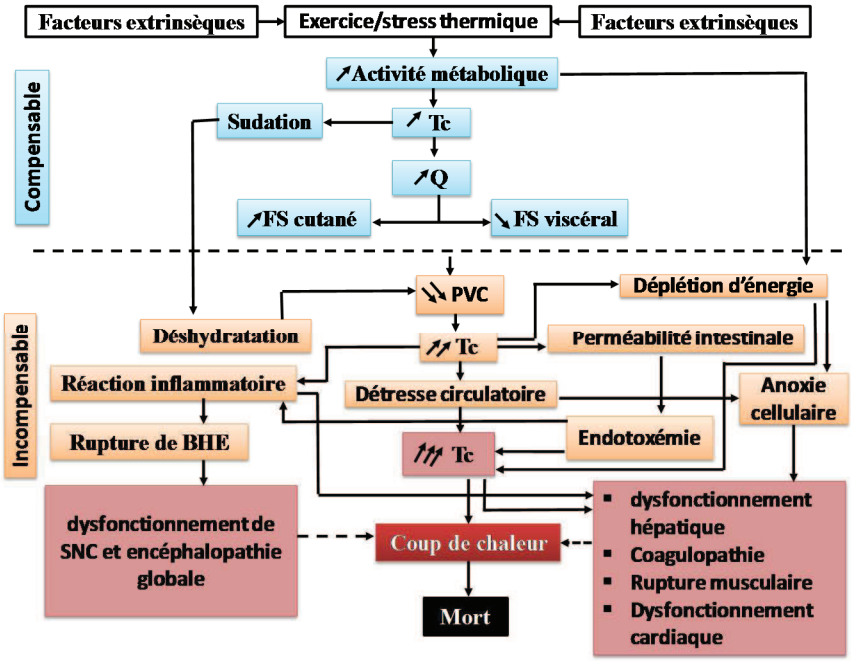


Figure 3 *: Séquence des évènements conduisant à un coup de chaleur en passant d'un stress thermique compensable à un stress thermique incompensable (Epstein et Roberts 2011) ;* ***Tc*** *:température centrale ;* ***Q*** *: débit cardiaque ;* ***FS*** *: flux sanguin ;* ***PVC*** *: pression veineuse centrale ;* ***BHE*** *: la barrière hémato-encéphalique.*

Ces troubles ont des effets néfastes sur la santé des sportifs ou des travailleurs évoluant dans des conditions chaudes et humides. En ce sens, de nombreuses organisations internationales ont utilisé un indice permettant de définir les valeurs de température à partir desquelles le risque des troubles liés à la chaleur augmente. Cet indice est le "Wet Bulb Globe Temperature" (WBGT) qui sert à estimer l'effet combiné de la température, du rayonnement solaire et de l'humidité sur l'homme (Budd 2008). Un résumé des valeurs de WBGT correspondant à des risques faibles, modérés, élevés et très élevés de troubles liées à la chaleur selon les organisations internationales, est présenté dans la figure suivante (figure 4) (Cheung et al. 2016) :

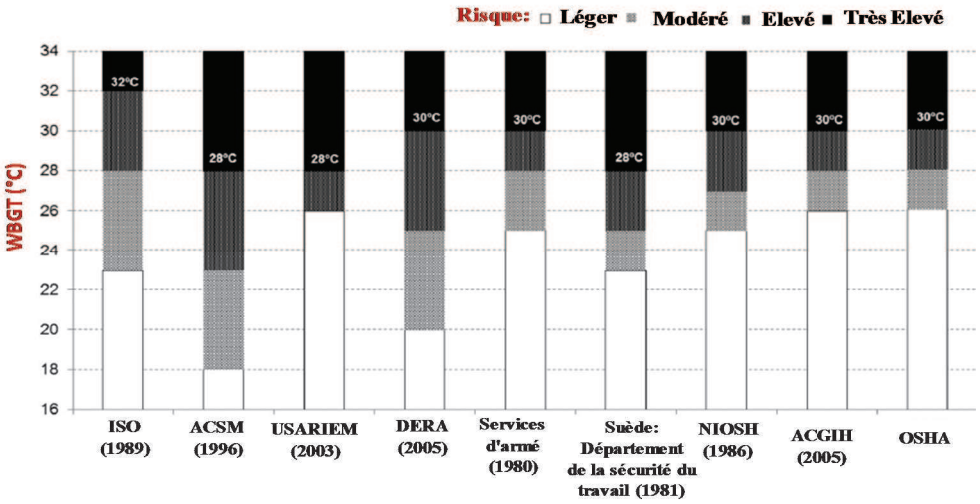


Figure 4 *: Résumé des valeurs de WBGT correspondant à des risques faibles, modérés, élevés et très élevés de maladies liées à la chaleur selon les organisations internationales.* ***ISO*** *: Organisation internationale de Standardisation ;* ***ACSM*** *: Collège américain de médecine du sport ;* ***USARIEM*** *: Institut de recherche de l'armée américaine de médecine environnementale ;* ***DERA*** *: Évaluation de la défense et Agence de recherche ;* ***NIOSH*** *: Institut national pour la sécurité et la santé au travail ;* ***ACGIH*** *: Conférence américaine d'hygiène industrielle du gouvernement ;* ***OSHA*** *: Sécurité professionnelle et Administration de la santé (Cheung et al. 2016).*

2. Les effets néfastes de l'hyperthermie chez les travailleurs :

De nombreuses activités professionnelles sont effectuées dans un environnement difficile, en termes de température et/ou d'humidité. C'est le cas par exemple des pompiers, des horticulteurs en serre, des boulangers, des fondeurs, des soldats, des mineurs et bien d'autres... La condition thermique extrême dans ce type de métiers découle (1) de la chaleur métabolique produite au cours de l'activité physique qui peut atteindre plus de 1000 W (Parsons 2006), (2) des tâches spécifiques au milieu du travail (3) du port obligatoire des uniformes de protection qui peuvent limiter la dissipation de la chaleur et (4) des conditions climatiques (Cheung et al. 2016). Ainsi, certaines études ont démontré que le travail dans de telles conditions est susceptible d'induire une augmentation des temps de repos et ainsi provoquer une baisse de la productivité (Cheung et al. 2016). De plus, l'exposition à la chaleur peut provoquer l'apparition des "troubles liés à la chaleur" et augmenter la prévalence d'accidents de travail (Yazdi et Sheikhzadeh 2014) (Cheung et al, 2016).

De nombreuses enquêtes attestent de la pénibilité et des risques encourus chez les travailleurs exposés à ce type d'environnement (Xiang et al. 2016). Ces risques augmentent quand la température ambiante dépasse 22 °C. Au Canada (Ontario), il a été noté que les visites d'urgence augmentaient de 75 % pour chaque degré, au-delà de cette température. Un total de 785 cas de maladies liées à la chaleur a été relevé entre 2004 et 2010 (Fortune et al. 2014) **(Figure 5).** En Europe, un employé sur cinq est exposé à des températures élevées (Arnaudo et al. 2004).

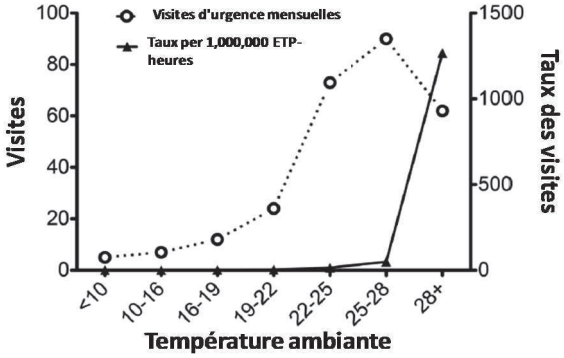


***Figure 5** : Visites mensuelles d'urgence normalisées pour les heures de travail à temps plein dans le sud-ouest de l'Ontario, Canada, 2004-2010. ETP : équivalent temps plein. (Fortune et al. 2014).*

Selon l'Institut National de la Sécurité et de la Santé (NIOSH), plus de 40% des causes de décès chez les pompiers en 2011 étaient attribuées à des incidents cardiovasculaires liés à la chaleur. En Asie (Chung et al. 2015), et plus généralement à l'échelle mondiale (Guo et al. 2014), il a été constaté, que l'exposition à la chaleur est associée à une augmentation de la mortalité cardiovasculaire.

Par conséquent, une réflexion est nécessaire afin de limiter les contraintes thermiques et l'augmentation du stress thermique et ainsi faciliter la dissipation de la chaleur. À ce jour, les pompiers (Barr et al . 2010), les militaires (Cadarette et al. 2006), les mineurs (Mairiaux et al. 1977), ou encore les pilotes (Frim 1989) ont opté pour l'utilisation de systèmes de refroidissement du corps afin de lutter contre le stress thermique.

3. L'effet de l'hyperthermie sur la performance physique :

Les athlètes peuvent développer une intolérance à la charge d'entraînement lors d'un exercice physique prolongé dans un environnement chaud. Deux hypothèses ont été suggérées pour expliquer l'arrêt de l'exercice et la diminution de la performance dans ces conditions extrêmes. La première est celle de la température critique. Elle est basée sur le concept selon lequel le corps diminuerait l'intensité de l'exercice lorsque la température corporelle atteint une valeur « critique » (40°C). Ceci afin d'empêcher la production des coups de chaleur (González-Alonso et al. 1999). La deuxième se base sur « le modèle d'anticipation ». Le cerveau anticiperait l'augmentation de la température corporelle et donc inhiberait la commande motrice (modifier l'intensité) pour ajuster l'intensité de l'exercice et ainsi empêcher l'augmentation de la température corporelle (Marino 2004; Tucker et al. 2004). Ce dysfonctionnement peut altérer les performances (Duffield 2008), causer des maladies liées à la chaleur et même provoquer des cas de décès (Gronlund 2014).

3.1. Exercices d'endurance

Les études examinant l'effet de l'hyperthermie sur la performance d'endurance utilisent généralement, soit des tests physiques de type « temps limite » (Tlim) soit des tests physiques de type « contre la montre » (CM). Les épreuves de Tlim sont des tests où les sujets doivent effectuer un exercice à des intensités sous-maximales ou maximales jusqu'à ce qu'ils ne puissent plus maintenir le rythme de travail requis (la vitesse ou la puissance). En CM, les sujets doivent parcourir une distance donnée le plus rapidement possible ou accomplir le plus de travail possible pendant une durée donnée (Laursen et al. 2007).

Indépendamment des protocoles d'exercices utilisés, les études ont montré que le stress thermique provoque une dégradation de la performance aérobie lors des exercices prolongés (González-Alonso et al. 1999 ; Kay et al. 2001 ; Nybo et al. 2001 ; Tucker et al. 2004). Une étude (Galloway et Maughan 1997) a confirmé cet effet négatif en comparant la performance d'un exercice de Tlim (sur vélo) à 70 % du $\dot{V}O_2$ max dans des environnements de différentes températures ambiantes allant de 4 à 31 ° C. Ainsi, le Tlim a été réduit d'environ 42 minutes dans l'environnement le plus chaud (31 ° C). Ces auteurs ont observé que plus la température ambiante était élevée, plus le Tlim était court. De même, les études utilisant des CM ont rapporté une altération des performances aérobies en condition chaude. Par exemple, Périard et al (2011) ont rapporté que la performance d'un CM (40 km sur vélo à 60% $\dot{V}O_2$ max) a été dégradée d'environ 13% (puissance moyenne) dans un environnement chaud par rapport à la condition environnementale tempérée. De manière générale, la littérature rapporte que l'hyperthermie perturbe les performances aérobies pour des exercices prolongés d'intensité variant de 40% à 80% de la consommation maximale d'oxygène et d'une durée d'une heure ou plus.

Cette diminution de performance en condition chaude et humide peut être attribuée à des perturbations physiologiques des systèmes cardiovasculaires, respiratoires, cérébrales et métaboliques (Racinais et al.2015). Il s'ajoute à cela des altérations au niveau périphérique, telles qu'une réduction du flux sanguin musculaire et une diminution de l'apport en oxygène vers les muscles actifs (González-Alonso et Calbet 2003). Tous ces dysfonctionnements peuvent expliquer la dégradation des performances aérobies (Nybo et al .2014).

3.2. Exercices brefs et intenses

Lors d'un exercice intense et court tel que le sprint ou la contraction maximale volontaire (MVC), la performance peut être améliorée grâce à une légère augmentation de la température musculaire associée à une amélioration de la contractilité musculaire (Girard et Racinais 2013). Guy et al (Guy et al. 2015) ont ainsi observé que la performance des sprints de 100 et 200 mètres s'améliore dans un environnement chaud de ~ 2% (plus rapide) par rapport à un environnement froid. De plus, d'autres travaux ont rapporté une augmentation de la vitesse de contraction musculaire suite à l'augmentation de la température musculaire (Morrison et al.2004 ; Thomas et al. 2006). Ces améliorations s'expliquent par une meilleure vitesse de conduction nerveuse dans la fibre musculaire (Gray et al. 2006).

Néanmoins, cet effet bénéfique peut disparaître en répétant plusieurs fois l'exercice, par exemple lors d'une répétition de sprints ou de contractions maximales volontaires (MVC). En effet, la capacité à maintenir une force maximale diminue en répétant l'exercice ; phénomène d'autant plus altéré en condition d'hyperthermie (Matsuura et al. 2015). Cette altération a été observée également lors des contractions isométriques prolongées (Morrison et al. 2004 ; Thomas et al. 2006) ou des contractions isocinétiques répétées (Martin et al. 2005). De manière générale, la littérature rapporte que l'hyperthermie altère les performances anaérobies que ce soit pour des performances d'une durée variant de 3 à 10 minutes, pour des contractions maximales volontaires ou même des répétitions de sprints (Lars Nybo 2008).

La perturbation des performances anaérobies en condition d'hyperthermie pourrait être attribuée à l'installation d'une fatigue centrale (Nybo et al. 2005), causée par des niveaux accrus d'ammoniac (NH3) et des dysfonctionnements au niveau des neurotransmetteurs cérébraux (Krustrup et al. 2003). Au niveau périphérique, l'augmentation trop importante de la température intramusculaire peut entraîner une altération de la fonction mitochondriale, ainsi que des perturbations des composants cellulaires (potassium, calcium et phosphate), conduisant à une diminution de la contractilité musculaire (Brooks et al. 1971 ; Fitts 1994). Il s'ajoute à cela le faible apport d'oxygène aux muscles actifs, associé à une baisse des taux d'adénosine triphosphate (ATP) et de phosphocréatine (PCr) avec une accumulation du lactate et d'ions d'hydrogène dans le muscle (Sawka et al. 2011).

Synthèse :

Exercices d'endurance

- L'exposition à la chaleur au cours d'un exercice prolongé provoque la dégradation de la performance, qui se manifeste par une durée plus courte au cours d'une épreuve de temps limite (Tlim) ou plus longue lors d'un test contre-la-montre (CM)
- Le stress thermique peut altérer les réponses physiologiques telles que la réponse cardiovasculaire. Cela peut avoir des répercussions au niveau périphérique, à cause d'une diminution de flux sanguin musculaire et une réduction de l'apport d'oxygène aux muscles actifs, dégradant ainsi la performance physique.
- Effectuer un exercice physique prolongé dans un environnement chaud nécessite une attention particulière du personnel, des entraîneurs et des athlètes.

Exercices brefs et intenses

- Bien qu'une augmentation de la température musculaire puisse améliorer la fonction musculaire lors d'un exercice bref et intense, cet effet bénéfique disparaît une fois que l'exercice est répété.
- La réduction de la capacité à générer de la force, soit en hyperthermie passive soit à l'effort, est modulée par les composantes de fatigue centrale et périphérique. D'une part, la diminution de la performance est due à l'incapacité du système nerveux central à activer suffisamment le muscle squelettique pour produire ou maintenir la force nécessaire. D'autre part, cette diminution est due à des facteurs périphériques tels que la diminution de la capacité contractile musculaire et l'épuisement de l'énergie (ATP, PCr).

4. Les réponses physiologiques et perceptives à l'hyperthermie :

Un exercice physique effectué dans un environnement chaud déclenche quelques réponses physiologiques pour faciliter la thermorégulation et la continuité de l'exercice (Armstrong 2003). Des revues récentes de la littérature suggèrent qu'une combinaison de plusieurs altérations (cardiovasculaires, respiratoires, thermiques, cérébrales et psychophysiologiques) est en grande partie responsable de la fatigue et de la dégradation des performances dans un environnement chaud (Nybo et al .2014 ; Cheung 2010).

4.1. Les réponses cardio-vasculaires :

En réponse à l'apparition d'un stress thermique au cours d'un exercice physique (augmentation de la température interne et cutanée), certains ajustements cardiovasculaires se mettent en place (Périard et al. 2013). Ils se manifestent par des changements au niveau vasculaire, notamment par une redistribution du sang du centre vers la périphérie grâce à la vasodilatation des vaisseaux sanguins cutanés afin d'améliorer la dissipation de la chaleur (Wegmann et al. 2012). Cependant, quand un grand volume de sang est déplacé vers la peau, le débit sanguin et l'apport d'oxygène aux muscles, et éventuellement au cerveau, peuvent être modifiés (José González-Alonso et al. 2004). Mortensen et al (Mortensen et al. 2005) ont observé une réduction du débit sanguin et de l'apport d'oxygène aux muscles actifs. Ainsi, au cours d'un exercice dans un environnement chaud, il s'avère que la distribution du sang ne peut pas répondre efficacement aux demandes conjointes des muscles actifs (nécessaire pour la contraction) et de la peau (nécessaire dissiper la chaleur. En effet, la redistribution d'un

gros volume du sang vers la peau cause une réduction du volume sanguin central. Cela provoque à son tour une diminution du débit cardiaque (Périard et Racinais 2015) et du volume d'éjection systolique (résultant d'un retour veineux réduit) (Trinity et al. 2010). Pour pallier à cela, la fréquence cardiaque va augmenter, afin de maintenir un débit cardiaque stable et de compenser un volume d'éjection systolique jusque-là réduit (Rowell 1986). Cependant, la capacité de pompage du cœur peut atteindre ses limites dans un environnement extrêmement chaud, ce qui pourrait restreindre le flux sanguin musculaire et dégrader la performance physique (González-Alonso et al .2008).

4.2. Les réponses respiratoires :

Sur le plan respiratoire, l'exposition à la chaleur, au repos, ou pendant un exercice prolongé, entraîne une augmentation de la température interne et de la ventilation pulmonaire (Tsuji et al. 2012). Il a été estimé, au cours d'un exercice physique prolongé, que la ventilation augmente de 5 à 12 L/ min, pour toute augmentation de la température interne de 1°C dans un intervalle allant de 37 à 40 °C (Tsuji et al. 2015). En outre, il a été signalé que l'augmentation du travail respiratoire est associée à une augmentation de l'activité sympathique (effet vasoconstricteur) des muscles actifs, provoquant ainsi une réduction du flux sanguin musculaire et donc une fatigue précoce lors d'un exercice physique intense (Nybo et al .2014).

Au repos, "l'hyperventilation induite par l'hyperthermie" est due, soit à l'augmentation du volume courant (Fan et al. 2008), soit à l'augmentation de la fréquence respiratoire (Nelson et al. 2011) soit des deux (Tsuji et al. 2012). En revanche, à l'exercice, celle-ci est produite suite à une augmentation de la fréquence respiratoire (Tsuji et al. 2012). Cette "hyperventilation induite par l'hyperthermie" cause la réduction de la pression artérielle de dioxyde de carbone (PaCO2) et crée une hypocapnie (Tsuji et al. 2015). D'un point de vue physiologique, une diminution de la PaCO2 (hypocapnie) entraîne une vasoconstriction des artérioles cérébrales et une diminution subséquente du flux sanguin cérébral (Fan et al. 2008). Ces changements peuvent conduire à une hypoperfusion cérébrale (Tsuji et al. 2016) entraînant des troubles majeurs. Des études ont montré que la restauration de la PaCO2 au niveau normal, par l'inhalation d'air riche en CO2 pendant un exercice prolongé, conduit à une restauration partielle (~ 30%) du débit sanguin cérébral (Fujii et al. 2008).

4.3. Les réponses cérébrales :

Effectuer un exercice physique dans un environnement chaud est un défi, non seulement pour les systèmes locomoteur et cardiovasculaire, mais aussi pour le cerveau (Nybo 2007). L'hyperthermie induit des changements cérébraux impliquant une diminution du débit sanguin cérébral (comme vu précédemment), qui pourrait ainsi limiter l'évacuation de la chaleur au niveau du cerveau (Yablonskiy et al .2000).

En effet, l'hyperthermie induit une diminution de la vitesse du flux sanguin cérébrale au repos (Bain et al. 2013) et pendant l'exercice (Rasmussen et al. 2006). Dans une étude réalisée chez l'homme, les auteurs (Nybo et Nielsen 2001a) ont observé, dans un groupe exposé à l'hyperthermie, une réduction de la vitesse d'écoulement du sang dans l'artère cérébrale moyenne, allant de 73 cm / s (au début de l'exercice) à 54 cm / s (en fin de l'exercice). Cependant, chez le groupe témoin, aucune diminution n'a été constatée (70-72 cm / s pendant

toute la durée l'exercice). Ces résultats mettent ainsi en avant une réduction du débit sanguin cérébral à la fin d'un exercice effectué en hyperthermie. Périard et al, (2013) observent également une diminution de l'oxygénation cérébrale au cours de l'exercice en condition chaude en comparaison à une condition thermo-neutre.

Il s'ajoute à cela des perturbations au niveau des neurotransmetteurs cérébraux, lors d'une exposition à la chaleur. La dopamine représente un des régulateurs importants du système nerveux central (Meeusen et Roelands 2010). Cependant, l'hyperthermie provoque des chutes de dopamine qui coïncident avec l'apparition de la fatigue centrale (Davis et Bailey 1997), et donc une dégradation de la performance. Également, des perturbations sont également notées au niveau de la sérotonine ; autre neurotransmetteur important de notre fonctionnement cérébral. En effet Stevens et al (2017) observent une réduction du rapport dopamine/sérotonine associé à un arrêt précoce de l'exercice.

Ces perturbations sont également associées voire explicatives d'un ralentissement de l'activité électrique cérébrale, noté par un changement du rapport α / β (α et β sont des ondes cérébrales), entraînant une diminution de l'excitation cérébrale. Cette inhibition cérébrale induite par l'hyperthermie peut être en partie responsable de l'arrêt de l'exercice (Robertson et Marino 2017).

En somme, la fatigue centrale induite par une activité physique dans ce type d'environnement est due à plusieurs facteurs tels que l'inhibition de certaines régions cérébrales (responsable de l'activité motrice), associée à une diminution du débit sanguin cérébral et des perturbations au niveau des neurotransmetteurs. Ainsi, la performance d'un exercice physique effectué dans un environnement chaud est gouvernée par une interaction entre les réponses physiologiques à l'hyperthermie et les réponses psychologiques provenant de la perception de l'environnement. Ce type de réponse sera développé dans le point suivant.

4.4. Les réponses perceptives :

Parmi les réponses perceptives, le ressenti de la température intervient constamment dans la modulation des mécanismes de thermorégulation et peut impacter les performances physiques (Cheung 2010). De plus, il a été montré également que plus la perception de la difficulté de l'effort est élevée, plus la performance d'endurance est réduite. Ce qui n'est pas le cas dans des conditions plus froides (Pitsiladis et Maughan 1999). Ainsi, la réalisation d'une activité physique, dans un environnement chaud, provoque une exacerbation de la perception de l'effort et des sensations thermiques (Périard et al. 2014). Cependant, ces composantes perceptives jouent un rôle protecteur pour l'athlète. À travers le ralentissement ou l'arrêt de l'exercice, ces composantes perceptives anticipent voire empêchent probablement la survenue des troubles liés à la chaleur, tel que le coup de chaleur.

La perception de la difficulté de l'effort, mesurée par l'échelle RPE « Rating of Perceived Exertion », augmente linéairement avec la température interne (Nielsen et Nybo 2003). En outre, les valeurs élevées de RPE, lors d'un exercice physique effectué dans un environnement cha4.4.ud, sont généralement corrélées avec une perturbation de l'activité électrique cérébrale (EEG) (Rasmussen et al. 2004). Le meilleur prédicteur de RPE est généralement la réduction de l'activité électrique dans le cortex frontal, reflétant donc une

difficulté accrue à maintenir l'intensité de l'exercice (Nielsen et al. 2001). D'un point de vue pratique, une sensation thermique élevée peut prédisposer les athlètes ou les travailleurs à des blessures liées au stress (thermique) (Maw et al. 1993).

La figure suivante **(Figure 6)** présente un modèle dans lequel Nybo et al (Nybo et al. 2014) ont résumé les réponses physiologiques et psychologiques qui se déclenchent lors d'un exercice physique effectué dans un environnement chaud.

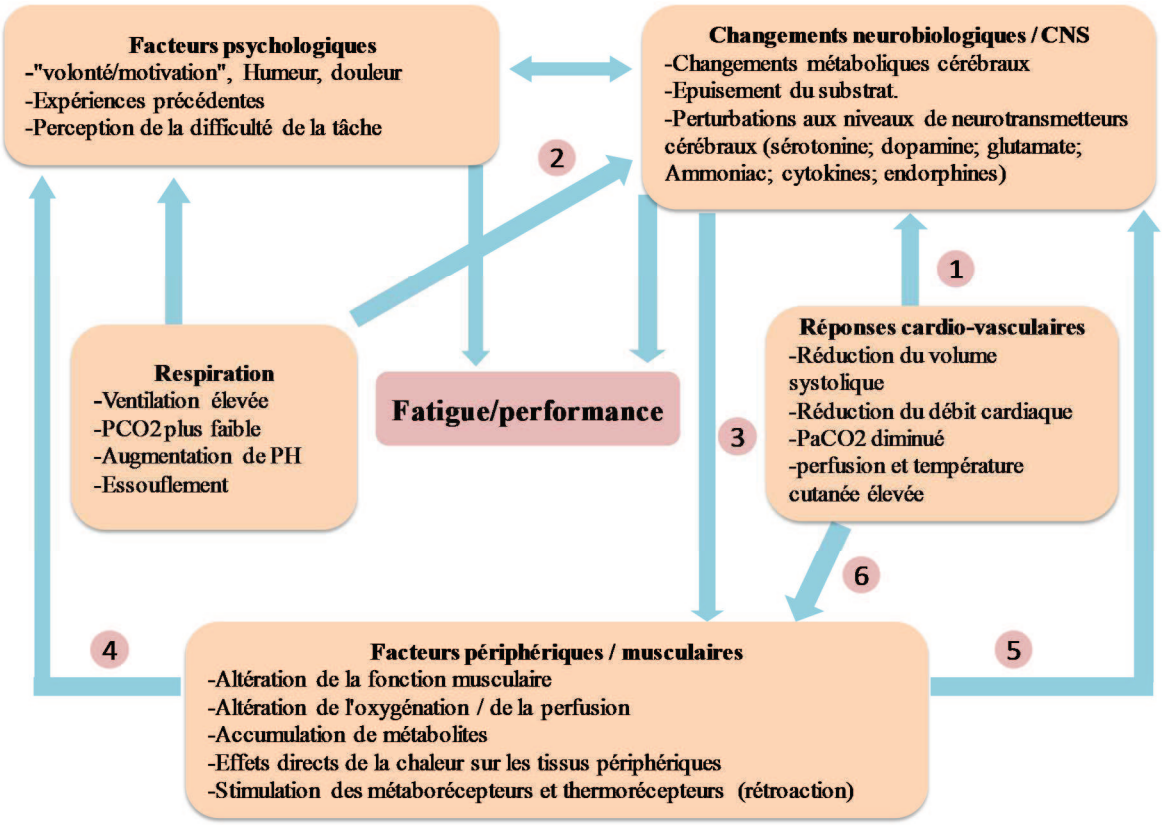


Figure 6 *: Résumé des réponses physiologiques et psychologiques lors d'un exercice effectué dans un environnement chaud (Nybo et al. 2014)*

Les interactions indiquées par les flèches représentent que : (1) les changements cardiovasculaires peuvent influencer le flux sanguin cérébral, et donc l'apport de substrats et d'oxygène au cerveau ; (2) les altérations au niveau du flux sanguin cérébral sont fortement dépendantes de l'hypocapnie induite par l'hyperventilation ; (3) les changements neurobiologiques peuvent influencer l'activité motrice périphérique ; (4) la fonction musculaire peut être influencée par des facteurs psychologiques ; (5) l'altération de la fonction musculaire engendre une fatigue périphérique et peut exercer une rétroaction afférente sur le système nerveux central ; (6) la rétroaction afférente intègre aussi des signaux provenant de la température cutanée élevée et du stress cardiovasculaire.

En revanche, toutes ces réponses physiologiques et perceptives peuvent dépendre de plusieurs facteurs notamment le sexe (McLellan 1998), l'âge (Drinkwater et al. 1982), l'effet de l'acclimatation (Dawson 1994) et le niveau d'aptitude aérobie

Synthèse :

Les réponses cardio-vasculaires

- Lors d'un exercice physique effectué dans un environnement chaud, le flux sanguin cutané augmente pour faciliter la dissipation de la chaleur, mais cela peut conduire à :
  - Une réduction du volume sanguin central.
  - Une réduction de volume d'éjection systolique à cause d'un retour veineux réduit.
  - Une augmentation de la fréquence cardiaque pour maintenir un débit cardiaque normal et compenser la réduction du volume d'éjection systolique.
- Le stress cardiovasculaire est étroitement corrélé avec la dégradation de la performance physique.

Les réponses respiratoires

- Une température interne élevée, dans un environnement chaud (repos ou exercice), entraîne une augmentation de la ventilation pulmonaire et une réduction de la pression artérielle en CO2 (hypocapnie).
- L'hypocapnie induite par la chaleur entraîne une vasoconstriction des artérioles cérébrales et une diminution subséquente du flux sanguin cérébral.

Les réponses cérébrales

- L'exposition à la chaleur lors d'un exercice physique entraîne une diminution du débit sanguin cérébral (en raison de la réduction de PaCO2 artérielle), limitant ainsi la dissipation de la chaleur du cerveau.
- L'hyperthermie ralentit l'activité électrique cérébrale exprimée par un changement du rapport α / β et des perturbations au niveau des neurotransmetteurs cérébraux, réduisant ainsi la commande nerveuse vers les muscles locomoteurs.
- Les changements au niveau cérébral provoquent une fatigue centrale et une dégradation de la performance.

Réponses perceptives :

- La perception de la difficulté de l'effort (RPE) augmente linéairement avec la température interne et cela peut s'accompagner d'une altération de l'activité cérébrale.
- Une sensation thermique élevée peut prédisposer les athlètes ou les travailleurs à des blessures liées au stress thermique.

5. Des solutions pour limiter les effets indésirables de l'hyperthermie :

En se basant sur les effets néfastes des troubles liés à la chaleur cités ci-dessus, nous pouvons conclure que l'exposition à une température ambiante élevée, particulièrement associée à un exercice physique, peut entraîner des problèmes de santé et même des risques de décès. Pour éviter ces troubles et optimiser la performance, certaines interventions peuvent être adoptées telles que l'acclimatation à la chaleur (Périard et al. 2015), une bonne hydratation (Racinais et al. 2015) et l'utilisation de froid au cours de l'exercice physique (Grantham et al. 2010 ; Racinais et al. 2015).

5.1. L'acclimatation à la chaleur :

L'acclimatation à la chaleur se produit à travers des exercices répétés dans un environnement chaud durant une à deux semaines pour lutter contre les effets néfastes du stress thermique (Périard et al . 2015). Une séance d'acclimatation à la chaleur doit durer au moins 60 min/jour afin de stimuler la transpiration et augmenter la température corporelle (Racinais et al. 2015). Une série d'adaptations se mettent en place suite à l'acclimatation à la chaleur :

- ***Cardio-vasculaires*** : Dès la première semaine d'exposition à la chaleur :
  - le volume plasmatique augmente (Périard et al. 2015)
  - la fréquence cardiaque diminue grâce à une diminution de l'activité nerveuse sympathique (Hodge et al. 2013).
  - le volume systolique et le débit cardiaque augmentent (Nielsen et al. 1993)
  - la compliance ventriculaire est améliorée (Levy et al. 1997).
- ***Perceptives*** : le confort thermique est amélioré (Gonzalez et Gagge 1976).
- ***Thermiques*** **:** la température interne (au repos et à l'exercice) et cutanée diminuent (Périard et al. 2015), et le débit sudoral augmente (Nadel et al. 1974).
- ***Physiques*** ***:*** une augmentation de la capacité aérobie (Périard et al. 2015).

Cependant, il faut signaler que l'amplitude de ces adaptations dépend largement de l'intensité, de la durée, de la fréquence et du nombre d'expositions à la chaleur (Sawka et al. 2011). Dans leur étude de revue en 2015, Périard et al (Périard et al .2015) ont résumé ces adaptations dans la figure présentée ci-dessous (figure 7) et ont souligné que celles-ci peuvent limiter l'apparition des troubles liés à la chaleur chez l'athlète en renforçant sa tolérance à la chaleur.

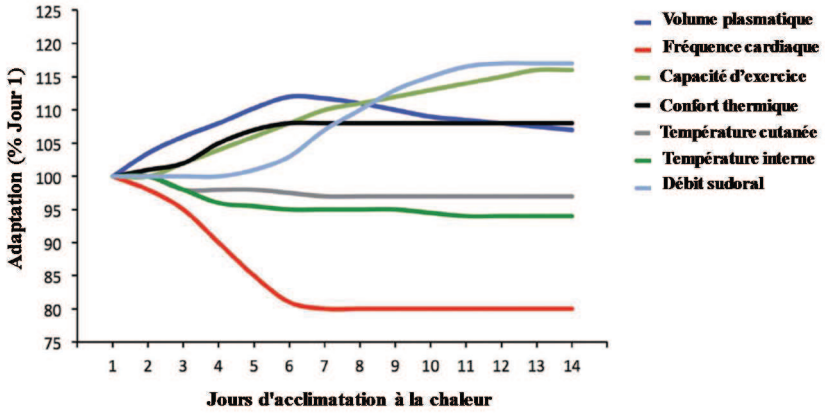


Figure 7 : *Adaptations au stress thermique durant deux semaines d'exposition à la chaleur (Périard et al .2015)*

5.2. Hydratation :

Les athlètes devraient commencer l'exercice physique avec une bonne hydratation en buvant 6 ml de liquide par kg de masse corporelle entre 2 et 3 heures avant le début de l'exercice afin d'éviter la déshydratation (Racinais et al. 2015). Cependant, une consommation excessive d'eau provoque une hyponatrémie, c'est à dire une concentration de sodium dans le plasma sanguin inférieure à 135 mmol/l, qui peut mettre la vie en danger (O'Connor 2006).

5.3. L'utilisation du froid :

L'utilisation du froid est l'une des stratégies les plus utilisées pour réduire le stress thermique et faciliter la dissipation de la chaleur. Plusieurs stratégies de refroidissement sont possibles, soit appliquées avant l'exercice (pre-cooling), soit durant l'exercice (per-cooling). Le froid peut être également appliqué en condition post-exercice afin d'optimiser la récupération (post-cooling).

De manière générale, l'immersion en eau froide (Demartini et al. 2015) est souvent utilisée pour réduire la température corporelle le plus rapidement possible pendant des entraînements ou des compétitions réalisés dans un environnement chaud. Plus le refroidissement est retardé, plus le risque de mortalité est élevé chez les patients victimes d'un coup de chaleur. Pour cette raison, le refroidissement du corps est recommandé dans les 30 minutes suivant un coup de chaleur pour assurer la survie (Belval et al. 2018). Une technique de refroidissement mobile a récemment été établie pour traiter les coups de chaleur, à travers un sac de refroidissement composé d'une capuche et d'un uniforme, pour le corps entier (vêtements de refroidissement) (Li et al. 2017). En outre, l'Association Nationale des Entraîneurs d'Athlétisme (Casa et al. 2015) et le Collège Américain de Médecine du Sport (Armstrong et al. 2007) ont publié des recommandations indiquant que l'immersion du corps entier dans l'eau froide est la méthode de refroidissement la plus efficace pour traiter les personnes atteintes de coup de chaleur grâce à une grande capacité convective de l'eau (Casa et al. 2007) et à son taux de refroidissement important qui peut atteindre 0,35°C par minute (Proulx et al. 2003).

Plus spécifiquement au domaine industriel ou sportif, les techniques de refroidissement ont été mises au point pour améliorer la dissipation de la chaleur et réduire le risque des troubles liés à la chaleur, en particulier lors d'événements organisés dans un environnement chaud, comme par exemple, les Jeux Olympiques d'été. Les athlètes peuvent utiliser des systèmes de refroidissement commerciaux (par exemple, les gilets de refroidissement) ou d'autres techniques de refroidissement pratiques et simples (poches de glace, ingestion de glace, ventilation, immersion en eau froide, etc.). Pour ce faire, l'optimisation des stratégies de refroidissement a été le sujet de nombreuses études récentes (Grantham et al. 2010 ; Racinais et al. 2015).

Le pré-cooling a reçu la plus grande attention dans la littérature scientifique (Adams et al. 2018). Le but de celui-ci est de réduire la température corporelle (T) avant de commencer l'exercice pour prolonger l'effort physique avant l'atteinte d'une limite critique de température (Bongers et al. 2015a). De nombreuses études ont montré un effet bénéfique du "pré-cooling" sur la performance et le confort thermique (González-Alonso et al. 1999 ; Yeargin et al. 2006). En effet, le "pré-cooling" peut induire quelques changements physiologiques et physiques souhaitables notamment les réductions de la température centrale et cutanée, l'amélioration du confort thermique et ainsi l'optimisation des performances. Cependant, ces bénéfices peuvent être perdus pendant l'exercice (Tyler et al .2015) à cause d'une vasoconstriction extrême ou d'une diminution importante de la température musculaire avant le début de l'exercice (Bolster et al. 2000). En effet, des études ont montré que le pré-cooling n'a aucun effet sur la performance ou même provoque la dégradation de celle-ci (Mitchell et al. 2003 ; Cheung et Robinson 2004). Le pré-cooling peut même augmenter le

risque d'apparition des troubles liés à la chaleur en retardant les réponses physiologiques liées à la dissipation de la chaleur corporelle (la vasodilatation cutanée et la transpiration) pendant l'exercice (Adams et al. 2018).

D'autre part, le "per-cooling" a reçu beaucoup moins d'attention dans la littérature scientifique, pour des raisons pratiques telles que l'excès de poids ou par la réglementation sportive (Arngrïmsson et al. 2004). Pour autant, le per-cooling semble être plus efficace que le pre-cooling. En effet, certains travaux ont comparé ces deux techniques, et ont conclu que l'avantage obtenu par le "per-cooling" était supérieur à celui obtenu par le "pré-cooling" (Stevens et al. 2017 ; Stevens et al. 2017). **(Figure 8).**

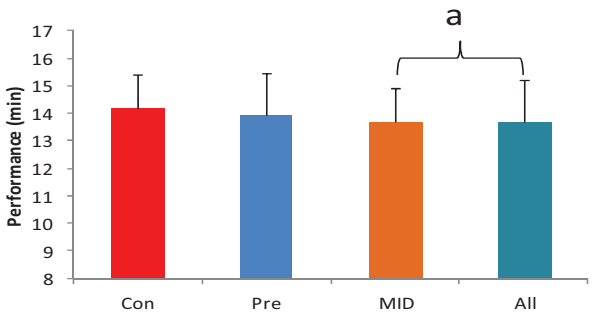


Figure 8 *: Temps d'exercice en minutes dans les différentes conditions d'utilisation du froid (Pre : avant ; MID : pendant ; ALL: avant et pendant l'exercice) et Con: condition contrôle; (a) significativement différent de Con. (Stevens et al. 2017).*

6. Conclusion : (Partie I) Résumé des effets délétères de l'hyperthermie (sur la performance, les réponses physiologiques et sur la santé) et les solutions possibles :

Une activité physique effectuée dans un environnement chaud provoque des altérations cardiovasculaires, thermorégulatrices, cérébrales et psychologiques. Ces altérations sont en grande partie responsables de l'apparition d'une fatigue précoce et de l'altération de la performance. En effet, il a été souligné dans la littérature, qu'un exercice physique effectué dans une condition climatique chaude est associé à une dégradation des performances d'endurance, soit par un Tlim plus court soit par un CM plus long. De même, lors d'un exercice bref et intense, l'exposition à la chaleur réduit la capacité à générer de la force. De manière générale, effectuer un exercice physique dans un environnement chaud et humide peut conduire à l'apparition des troubles liés à la chaleur pouvant entraîner la mort dans certains cas.

Pour réduire la contrainte thermique et optimiser les performances, quelques interventions peuvent être adoptées telles que l'acclimatation à la chaleur, une bonne hydratation et l'utilisation du froid. Ce dernier a suscité l'intérêt de plusieurs recherches scientifiques dans le contexte de l'exercice physique ou de la récupération post-exercice. Les effets délétères de l'hyperthermie sur la santé et la performance ainsi que les solutions possibles pour limiter ces effets sont présentés dans la figure présentée ci-dessus :

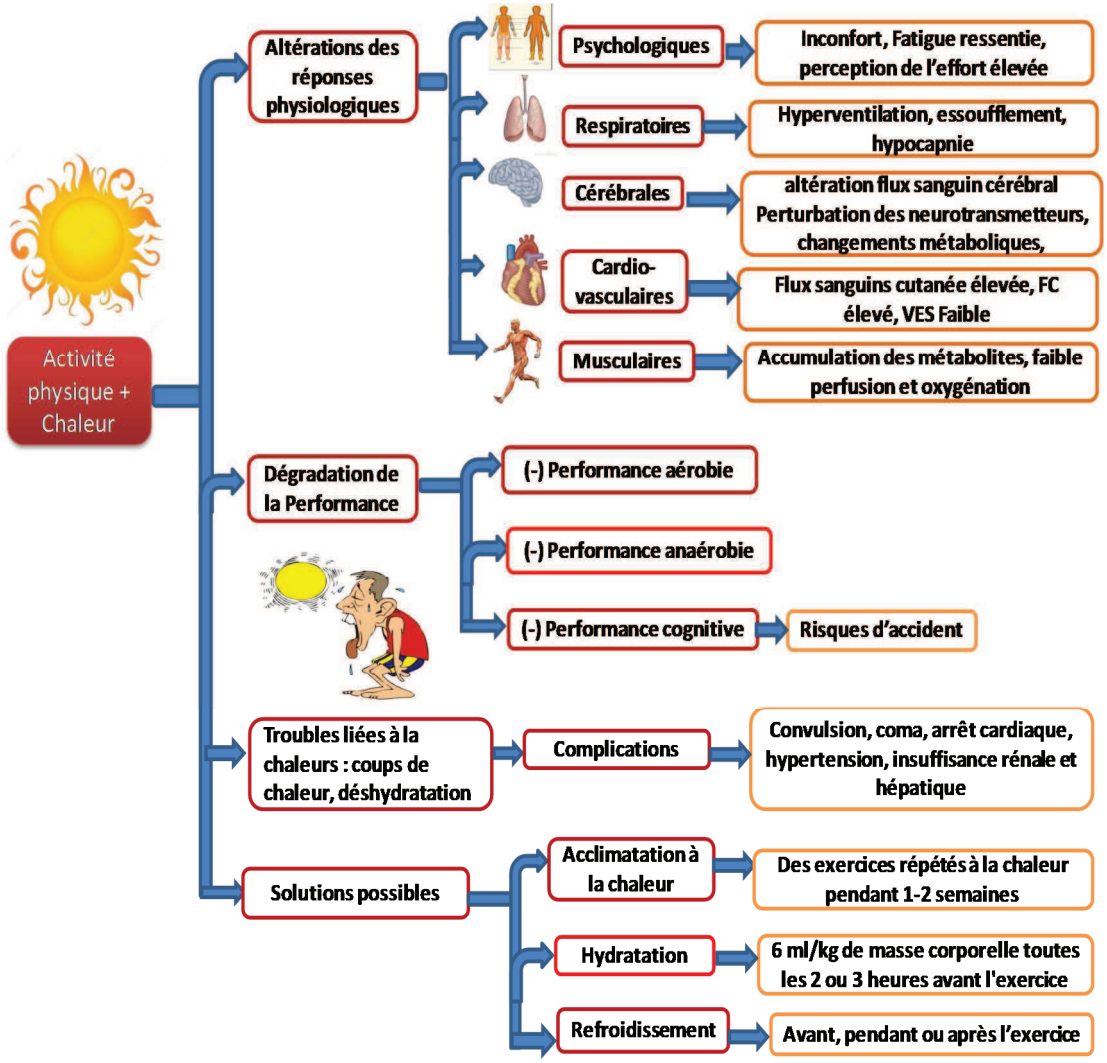


***Figure** 9 : Les effets délétères de l'hyperthermie et les solutions possibles*

II. L'utilisation du froid dans le contexte de l'exercice : Le per-cooling

1. Définition du « per-cooling » :

Le per-cooling se réfère à l'utilisation du froid pendant l'activité physique, où "per" dérive du mot latin signifiant "pendant" (Bongers et al. 2015a). Le but de l'utilisation du per-cooling est d'améliorer les performances physiques et réduire la température corporelle, que ce soit chez des athlètes ou des travailleurs exécutant une activité physique dans des environnements chauds.

2. Les utilisations du « per-cooling » :

2.1. Contexte sportif:

Les événements sportifs les plus populaires (les Jeux Olympiques d'été, la coupe du Monde de la FIFA et le Tour de France) se déroulent généralement dans des environnements relativement chauds (Athènes, Atlanta, Pékin, Rio de Janeiro, Doha et Tokyo). Ces conditions climatiques extrêmes peuvent influencer négativement la performance des athlètes. Prenons le cas de la vice-championne Paula Radcliffe, la détentrice du record du monde féminin du marathon en 2003, qui a abandonné le marathon olympique de 2004 à Athènes en raison des

conditions environnementales extrêmes (35 ° C / 95 ° F et 31% d'humidité relative). Certes, il est reconnu qu'une activité physique prolongée à la chaleur peut induire une fatigue précoce et affecter négativement la performance physique et cognitive (Nybo et al. 2014 ; Jiang et al. 2013). Pour limiter ces effets indésirables de l'hyperthermie, les chercheurs recommandent fortement l'utilisation du froid pendant les entraînements ou les compétitions. Adams et al (Adams et al. 2018) proposent une définition et quelques exemples de per-cooling, qui sont présentés dans le tableau suivant :

Tableau 1 *: Définition du per-cooling et quelques exemples des sports employant le Per-cooling (Adams et al. 2018)* :

Type de refroidissement	Définition de refroidissement	Moment de refroidissement	Exemple de sports	Exemples des techniques
Per-cooling	Un refroidissement du corps effectué lors d'un exercice ou d'une compétition.	**a)** Au cours de l'exercice.	Course à pied, vélo, triathlon.	Gilets, ingestion d'eau froide.
		b) Pendant les mi-temps et entre séries	Football, Rugby, Lacrosse.	Poches de glace, boissons froides et ventilateurs.

Ces techniques sont utilisées pour faciliter la dissipation de la chaleur et réduire la prévalence des maladies associées à la chaleur (Grantham et al. 2010 ; Racinais et al. 2015). En outre, les athlètes peuvent utiliser des systèmes de refroidissement commerciaux tels que les gilets refroidissants ou d'autres techniques plus classiques comme les poches de glace, l'ingestion des boissons froides, la ventilation, l'immersion en eau froide… etc. Cependant, les études déjà menées sur le per-cooling ont reçu beaucoup moins d'attention que celles examinant l'utilisation de froid avant l'exercice ("pré-cooling"). Comme son nom l'indique, le "per-cooling" agit directement pour refroidir le corps lorsqu'il est directement soumis à un stress thermique pendant l'exercice physique, ce qui devrait avoir un impact immédiat sur la thermorégulation et la performance physique.

2.2. Utilisation du "per-cooling" chez les travailleurs en environnement chaud :

De nombreuses activités professionnelles sont confrontées à un environnement de travail difficile en termes de température et/ou d'humidité. De ce fait, l'utilisation de systèmes de refroidissement a été proposée et recommandée, notamment chez les pompiers (Smolander, Kuklane, et al. 2004), les soldats (Cadarette et al. 2006), les travailleurs dans les mines profondes (Mairiaux et al. 1977), les agriculteurs (Choi et al.2008), les soldats qui ont des missions dans le désert (Ciuha et al. 2016), les pilotes assis dans un petit cockpit chaud (Frim 1989) ou dans d'autres domaines tels que la construction **(Figure 10).** L'objectif était de réduire le stress thermique et améliorer les conditions de travail.

Figure 10 *: Travailleurs de construction portant leurs gilets de refroidissants au Qatar*

De nombreuses études ont montré que le "per-cooling" réduit efficacement le stress thermique et améliore le confort thermique dans des conditions chaudes (Barwood et al . 2009 ; Hadid et al. 2008). Il s'ajoute à cela des avantages économiques grâce à un prolongement du temps de travail et une augmentation de la productivité (Yazdi et Sheikhzadeh 2014). De surcroît, l'emploi de ces techniques dans ces conditions favorise la concentration des travailleurs, empêche la dégradation de leurs fonctions cognitives (vigilance, attention, prise de décision) et réduit le risque d'accidents de travail (Kenny et al. 2011).

3. Les techniques du "per-cooling » :

Les gilets refroidissants :

Les gilets refroidissants peuvent être utilisés, soit sous forme passive ou active. La forme passive est principalement basée sur l'utilisation des poches de glace qui assure le transfert de chaleur par conduction (**Figure 11a)** et la forme active implique toujours un système de ventilation qui stimule la dissipation de la chaleur par évaporation et convection (**Figure 11b)** (Chan et al. 2017).

(a)

(b)

Figure 11 *: Les gilets refroidissants. (a) Gilet avec poches de glace (forme passive) ; (b) : Gilet refroidissant avec des systèmes de ventilation.*

Le port du gilet refroidissant est l'une des techniques de refroidissement les plus utilisées dans le domaine sportif pour améliorer la performance sportive. Deux récentes méta-analyses (Bongers et al. 2015 ; Tyler et al. 2015) ont montré que le port d'un gilet refroidissant a plus d'impact sur la performance que d'autres techniques de refroidissement. Également, cette technique peut également réduire le stress thermique imposé aux personnes travaillant dans un environnement chaud (Yazdi et Sheikhzadeh 2014).

Le port du gilet refroidissant a constamment été recommandé dans des environnements chauds, grâce à ses effets positifs sur les réponses physiologiques et perceptives. L'étude de

Smolander et al (Smolander et al. 2004) vient appuyer cette constatation puisque ces auteurs ont montré que l'utilisation de cette stratégie, lors d'un exercice physique effectué dans un environnement chaud, permet d'améliorer les réponses physiologiques et perceptives à travers la réduction de la fréquence cardiaque (10 battements / min), du taux de sudation (13%) et de la perception de la chaleur. Le refroidissement du tronc à l'aide d'un gilet refroidissant semble être le moyen le plus efficace pour dissiper la chaleur en le comparant à d'autres techniques de refroidissement local, grâce en partie à une plus grande vascularisation du tronc, favorisant ainsi la dissipation de la chaleur (ESAR Shvartz 1976).

Les vêtements de refroidissement :

Les vêtements de refroidissement ont été développé dans un premier temps pour le domaine industriel afin d'améliorer les conditions de travail dans des climats extrêmes (Nunneley 1970). Cette stratégie permet de réduire le stress thermique et prolonger le temps de travail (Yazdi et Sheikhzadeh 2014). Les vêtements de refroidissement ont ensuite été proposé dans le domaine sportif chez les athlètes s'entraînant dans un environnement chaud (Barwood et al. 2009).

Ces types de vêtements sont généralement divisés en trois types selon la technique de refroidissement utilisée: (1) les vêtements de refroidissement par évaporation (VE) intègrent des systèmes de ventilation et sont basés sur le refroidissement par convection et évaporation (Chinevere et al. 2008) **(Figure 12a)**, les vêtements de refroidissement liquide (VL) sont basés sur le refroidissement par conduction en utilisant de l'eau froide passant à travers de petits tubes (Vernieuw et al .2007) **(Figure 12b)** et les vêtements de refroidissement à changement de phase (VCF) comprennent souvent une source de refroidissement telle que des matériaux à changement de phase qui absorbent la chaleur du porteur lorsque les matériaux passent d'un état solide à un état liquide (Yazdi et Sheikhzadeh 2014) **(Figure 12c).**

(a) (b) (c)

Figure 12 : *Les vêtements de refroidissement. (a) par évaporation (la société Kuchofuku, Japon ; (b) refroidissement liquide (agence d'exploration aérospatiale, japon) ; (c) : Refroidissement à partir des tissus à changement de phases (Sarkar et Kothari. 2014).*

L'utilisation de ces vêtements semble être efficace pour réduire le stress thermique et améliorer la performance physique en limitant l'augmentation de la température cutanée (Chan et al. 2017) sans pour autant réduire la température musculaire (Racinais et al. 2015).

Ingestion de boissons froides et glacées :

L'ingestion de boissons froides ou glacées représente un refroidissement interne, qui est fortement utilisé avant ou pendant un exercice physique dans un environnement chaud (Trong et al. 2015 ; De Carvalho et al. 2015) **(Figure 13).**

Figure 13 *: Maria Sharapova boit de l'eau froide entre les sets de son match au 7ème jour de Roland-Garros français. 2013 à Paris, France.*

Ce type de refroidissement est très pratique puisqu'il ne limite pas les mouvements des athlètes et ne nécessite pas un mode d'emploi spécifique. De surcroît, cette stratégie de refroidissement réduit la température interne de plus de 0,7 ° C et améliore le confort thermique (Snipe et Costa 2018). Il a été constaté que les boissons les plus fraîches (0-22 ° C) ont tendance à être plus appétissantes que les boissons chaudes (22-46°C), puisqu'elles sont associées à une réduction de la soif et à des sensations de plaisir supérieurs à celles ressenties avec les boissons les plus chaudes (22-46 ° C). Ainsi, les liquides allant de 0 ° C à 22 ° C augmentent la palatabilité et l'hydratation pendant l'exercice (Burdon et al. 2012). Cependant, l'efficacité de cette stratégie de refroidissement peut dépendre des conditions environnementales. En effet, le bénéfice le plus souvent rapporté était dans des environnements plus chauds et humides (> 28 ° C, 30% d'humidité) avec des boissons froides à moins de 5 ° C (Burdon et al. 2010). Pendant les compétitions ou les entraînements, les athlètes ingèrent généralement de l'eau froide ou des « boues » de glace. Cependant, l'ingestion d'eau froide peut avoir plus d'impact sur la réduction de la température corporelle que l'ingestion de glace (Ruddock et al. 2017 ; Brearley 2012).

Refroidissement par le menthol :

Le menthol est un produit organique extrait des huiles essentielles de la menthe. Il procure une sensation de fraîcheur grâce à la stimulation des récepteurs sensibles au froid (Eccles 2000). Outre son effet refroidissant, le menthol peut être impliqué dans la réduction de la sensation de douleur (Johar et al. 2012). Dans le domaine sportif, les athlètes utilisent ce produit soit, par un rinçage buccal (Stevens et al. 2017), soit comme additif à d'autres boissons (Trong et al. 2015) ou soit comme un gel (« spray ») appliqué sur la peau ou sur les vêtements (M. J. Barwood et al. 2015).

La forme interne du menthol (rinçage de la bouche ou boisson) est plus efficace que son application externe, probablement dû, à une plus grande sensibilité de la langue et de la cavité buccale au refroidissement. En effet, il a été démontré que pour une même dose de menthol le rinçage buccale est plus efficace que l'application externe (Watson et al. 1978). De plus, il a été démontré que son application externe sur les vêtements des athlètes par pulvérisation

(d'une concentration de 0,05%) n'amène aucune amélioration de la performance lors d'une épreuve de cyclisme de contre la montre de 5km (Barwood et al .2014) ou de 40 km (Barwood et al. 2011), malgré une meilleure sensation thermique.

Les systèmes de ventilation et pulvérisation d'eau :

La ventilation refroidit la peau en augmentant la capacité évaporatoire et convective (Saunders et al. 2005). Il a été signalé que l'évaporation de 1 ml d'eau dissipe la chaleur sept fois plus que la fonte de 1 g de glace (Travis 1988). Cela explique l'amélioration du confort thermique et le sentiment de fraicheur ressenti tout en s'exposant au vent (Yin et al. 2011). De plus, l'exposition de la tête (Ansley et al. 2008) ou du corps entier (Saunders et al. 2005) au vent ou à un système de ventilation améliore les performances d'endurance.

La ventilation s'accompagne généralement d'une pulvérisation d'eau **(figure 14)** chez les sportifs ou les patients atteints d'un coup de chaleur (Weiner et Khogali 1980). La combinaison des deux modalités sert à compenser la faible vitesse de refroidissement d'un ventilateur qui est de l'ordre de 0.02 °C/min et l'augmenter à 0.11°C/min (Adams et al . 2016).

Figure 14 : *Jerzy Janowicz (un joueur de tennis professionnel polonais) aime être refroidi par un ventilateur d'air froid au tournoi de tennis professionnel. Melbourne, Australie 2014.*

Les études examinant l'effet de la pulvérisation d'eau sur le visage, ont indiqué que cette stratégie de refroidissement semble avoir des effets positifs sur la performance. Prenons l'étude de Ansley et al (Ansley et al. 2008) qui ont observé une amélioration de la performance de 51 % lors d'un exercice de Tlim (sur vélo) à 75% $\dot{V}O_2$ max. Ces auteurs suggèrent que ces améliorations pourraient être le résultat d'une diminution de la concentration sanguine de prolactine (réduction de la fatigue centrale) et une diminution de la perception de la température et de la difficulté de l'effort (Mündel et al. 2007). Une étude récente (Konishi et al. 2017) confirme ces résultats en montrant que la ventilation associée à une pulvérisation d'eau réduit la fréquence cardiaque et la fatigue ressentie lors d'un exercice physique prolongé.

Colliers de refroidissement du cou

Le collier de refroidissement du cou (CC) contient généralement des compartiments en plastiques remplis de réactif de refroidissement (Black Ice LLC) qui procure une sensation de fraîcheur sans irriter la peau. La plupart de ces colliers sont maintenus en place par une bande de néoprène avec un crochet et une boucle pour attacher autour du cou. Avant l'utilisation, il

doit être placé dans un congélateur pendant une durée qui varie selon les instructions du fabricant (Tyler et Sunderland 2011a).

L'utilisation du CC est fortement recommandée dans le domaine sportif (Sunderland et al. 2015) pour les raisons suivantes :

- Techniques : le cou est plus accessible que d'autres parties du corps dans la plupart des sports.
- Anatomiques : le cou se situe à proximité du centre thermorégulateur.
-Physiologiques : le cou fait référence à une région de haute thermo-sensibilité.
-Physiques : le port de ces colliers pendant un exercice physique effectué dans un environnement chaud (30–32 °C ;50–70 %Rh) améliore la performance.

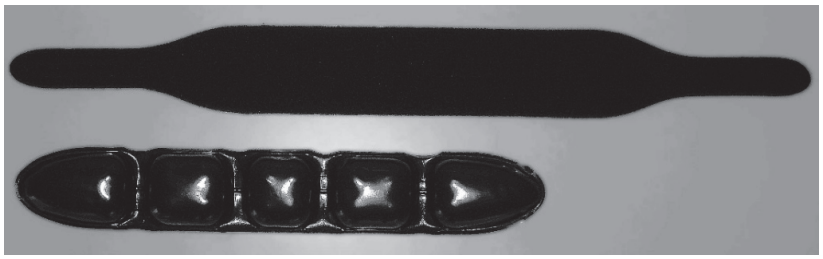


***Figure 15**: Colliers de refroidissement du cou utilisé dans l'étude de Tyler et Sunderland 2011*

Dispositif de refroidissement de la main : (Le RTX)

Le RTX comme l'indique l'image présentée ci-dessous **(Figure 16),** est une machine permettant de refroidir la main. Elle se constitue d'une surface métallique sur laquelle repose la paume de la main et entourée d'une chambre en plastique transparent. L'air est pompé pour créer une pression négative tandis que l'eau froide circule sous la surface métallique, ramenant ainsi la chaleur vers un petit réservoir d'eau froide. Ce dispositif est basé sur la combinaison d'une pression négative et d'un dissipateur de chaleur pour augmenter l'échange de la chaleur entre le sang circulant et l'environnement externe (Amorim et al. 2010).

***Figure 16:** Machine de refroidissement de la main utilisée dans l'étude Amorim et al. 2010*

Grâce à ce dispositif, le sang refroidi est délivré directement au corps par le biais du retour veineux, permettant de réduire la température centrale et le stress thermique. De plus, certaines études menées dans une condition chaude ont montré que cette intervention permet d'améliorer les performances d'endurance (Hsu et al. 2005 ; Grahn et al. 2005).

Synthèse :

- La majorité des techniques du « per-cooling » décrites ci-dessus semblent être efficaces pour améliorer les performances physiques et le confort thermique dans un environnement chaud. Cependant, l'efficacité de l'intervention du « cooling » utilisée dépend du type d'exercice effectué et du degré de contrainte thermique.
- D'un point de vue pratique, la technique de refroidissement la plus efficace peut être considérée comme la technique la plus pratique, pas chère, facile à utiliser et légère. Néanmoins, aucune conclusion n'est claire à ce jour sur quelle est la technique la plus efficace pour lutter contre la contrainte thermique.

4. Effet du per-cooling sur la performance :

4.1. Per-cooling et Exercice d'endurance :

Il a récemment été souligné que l'utilisation du "per-cooling" lors d'exercices d'endurance semble être avantageux pour améliorer la performance (Bongers et al. 2015a). Pour évaluer cet effet lors d'un exercice prolongé, des épreuves de Tlim ont été utilisées. Ansley et al (Ansley et al. 2008) ont rapporté que le refroidissement de la tête, en utilisant un système de ventilation, lors d'un exercice de cyclisme augmente significativement le temps d'exercice de 51% jusqu'à l'épuisement. D'autant plus, d'autres stratégies de "per-cooling" telles que l'ingestion des boissons froides (Mündel et al. 2006), le port d'un collier de refroidissement du cou (Tyler et Sunderland 2011a), ou le port des vêtements de refroidissement (McFarlin et al. 2016), permettaient une amélioration de la performance allant de 9 à 18%.

Quelques études ont également évalué l'effet du "per-cooling" sur la capacité aérobie lors des exercices de longue durée. McFarlin et al (McFarlin et al. 2016), ont testé l'effet de deux pulls (pull de température ambiante et pull refroidi) sur la capacité d'effort, à un indice de contrainte physiologique de 7.5, durant 45 min de course intermittente dans un environnement chaud et humide (35 ± 1 ° C, 55 ± 6%), les auteurs ont observé que le pull refroidi a entraîné une amélioration (8%) de la capacité aérobie **(Figure 17).**

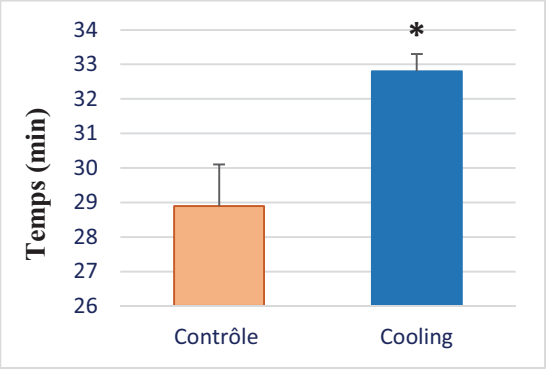


***Figure 17** : Temps d'exercice à une indice de contrainte physiologique de 7,5 (effort modéré-élevé) * indique que le Cooling est significativement différent de Contrôle (p <0,05) (McFarlin et al. 2016).*

Concernant les épreuves de CM, une amélioration de la performance a également été observée en utilisant des techniques de "per-cooling" comme la ventilation (Teunissen et al. 2013) ou le refroidissement de la main (Hsu et al. 2005).

La plupart des travaux testant l'effet du refroidissement du cou via un collier de refroidissement ont également montré une amélioration de la performance de 6 à 13% lors d'une épreuve CM de 15 min (Tyler et Sunderland 2011b; Tyler et al. 2010 ; Tyler et Sunderland 2011a ; Lee et al. 2014). Récemment, des méta-analyses ont confirmé cet effet bénéfique du per-cooling surtout lorsqu'il est appliqué pendant une épreuve CM (Ruddock et al. 2017 ; Best et al. 2018). Néanmoins, quelques techniques de "per-cooling" ont été inefficaces à cet égard notamment le port d'un gilet refroidissant dans une condition tempérée (25° C) (Eijsvogels et al. 2014) ou le menthol vaporisé sur les maillots des athlètes dans un environnement chaud (Barwood et al. 2015). Pour expliquer ces résultats, il a été suggéré qu'avec une intensité d'exercice plus importante et un stress thermique plus élevé, le per-cooling pourrait engendrer des effets bénéfiques plus marqués.

4.2. Per-cooling et Exercices intenses et brefs :

La capacité à effectuer un effort intense et bref est nécessaire dans de nombreux sports (Spencer et al. 2005). Néanmoins, la performance anaérobie peut être dégradée dans un environnement chaud (Girard et al. 2015). Le refroidissement du cou ou le port d'un gilet refroidissant lors des exercices de sprints répétés permet d'améliorer la capacité à répéter des sprints sans altérer les réponses physiologiques (Sunderland et al. 2015 ; Webborn et al. 2010). Une étude récente a testé l'effet du refroidissement des mains sur la performance pendant des exercices anaérobies (test de développé couché) (Kwon et al. 2015). Les auteurs ont comparé trois conditions consistant à : chauffer, refroidir ou garder la paume de la main avec une **température ambiante. Le refroidissement de la paume de la main a permis d'effectuer plus de** répétitions **(Figure 18).**

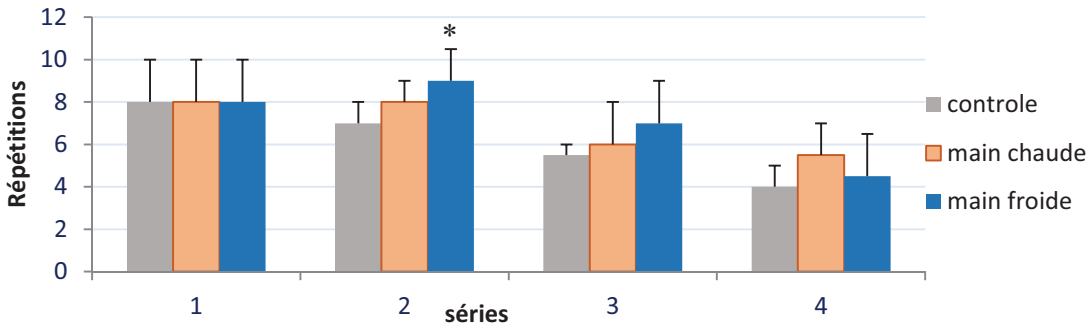


Figure 18 *: Nombre de répétitions lors d'un test de développé couché (4 séries à 85% de 1RM) pendant les conditions Contrôle, main chaude et main froide*: indique une différence significative entre main froide et contrôle (p<0.01) (Kwon et al. 2015).*

Néanmoins, d'autres techniques de refroidissement n'ont pas d'impact sur la performance lors des exercices brefs et intenses, à l'instar de l'ingestion de l'eau froide (LaFata et al. 2012) ou l'application des poches de glace sur la tête (Racinais et al .2008). Les auteurs ont expliqué l'absence d'effet positif du "per-cooling" par le fait que les températures centrales des participants n'atteignaient pas une température suffisamment élevée. En outre, il semble qu'il y ait un seuil de température corporelle à atteindre pour obtenir un bénéfice de performance suite à l'utilisation du "per-cooling" (Tyler et al .2010).

Synthèse :

"Per-cooling" et Exercice d'endurance :

- La majorité des techniques de "per-cooling" permet d'améliorer la performance dans les épreuves d'endurance.
- L'utilisation du per-cooling a plus d'impact sur la performance lors des épreuves de Tlim (9-51%) par rapport aux épreuves de CM (3-9%).
- Néanmoins les résultats restent contradictoires et aucun consensus n'existe à ce jour et ne permet de conclure sur l'efficacité du per-cooling sur la performance aérobie.

"Per-cooling" et Exercices anaérobies (brefs et intense) :

- L'effet du "per-cooling" sur les performances anaérobies dépend de la durée de l'intervention.
- Plus la température centrale est élevée, plus l'impact du "per-cooling" sur les performances anaérobies est important.
- Néanmoins, tout comme les résultats concernant les performances aérobies, les résultats restent contradictoires et aucun consensus n'existe à ce jour et ne permet de conclure sur l'efficacité du per-cooling sur la performance anaérobie.

5. L'efficacité du "per-cooling" selon la région du corps refroidie :

L'efficacité du "per-cooling" dépend du site d'application du froid étant donné que les tissus du corps humain n'ont pas tous la même perfusion sanguine. En ce sens, le refroidissement d'une région du corps de haute perfusion tissulaire s'avère avantageux pour réduire la température corporelle (Ruddock et al. 2017).

5.1. Corps entier ou plusieurs parties du corps :

Certes, plus la surface du corps refroidie est grande (le tronc et / ou les membres inférieurs), plus la dissipation de la chaleur est élevée (Gao et al .2010) et la performance est améliorée (Bongers et al .2017). En ce sens, il a été démontré que le refroidissement du corps entier induit une meilleure capacité de travail et une réduction plus importante du stress thermique que le refroidissement d'une seule partie du corps (Minett et al. 2011). Des anciennes études (Shvartz et al. 1971) comparant le refroidissement des différentes régions du corps, et ont montré que le refroidissement du corps entier permet une réduction significative de la température corporelle, tandis que le refroidissement d'une seule partie du corps comme le tronc (Strydom et al. 1972), les bras ou les jambes (Gold et Zornitzer 1968) ne réduit pas totalement le stress thermique. Par exemple chez des agriculteurs travaillant dans un environnement chaud, le refroidissement d'une large partie du corps (combinaison d'une veste de refroidissement, une écharpe et un chapeau), permet une dissipation optimale de la chaleur (Choi et al . 2008).

Néanmoins, le refroidissement du corps entier ou de plusieurs parties corporelles n'est pas toujours faisable chez les sportifs ou chez les travailleurs (Young et al. 1987). De ce fait, certains travaux ont examiné l'efficacité du refroidissement local. Shvartz et al (Shvartz et al .1971) ont rapporté que le refroidissement de 15 % de la surface corporelle totale permettrait

une dissipation totale de la chaleur chez les travailleurs dans un environnement chaud. En somme, si le refroidissement d'une seule partie du corps permet une réduction significative de la chaleur, un refroidissement du corps entier n'est pas nécessaire.

5.2. Refroidissement du tronc :

Le refroidissement du tronc se fait principalement à l'aide des gilets refroidissants. Bien que cette région ne représente que 3.3 % de la surface corporelle totale, son refroidissement est très efficace pour dissiper la chaleur dans un environnement chaud (Choi et al .2008). Cet effet bénéfique peut s'expliquer par la grande vascularisation de cette zone qui permet le refroidissement de grandes quantités de sang (Shvartz 1976). Des études menées dans des environnements extrêmes ont montré que le refroidissement de cette région améliore la performance en augmentant le temps d'exercice (Luomala et al. 2012).

Le tronc se caractérise également par une grande sensibilité au froid (Nishihara et al. 2002). De ce fait, son refroidissement assure une meilleure dissipation de la chaleur par rapport à d'autres parties du corps telles que le cou (Esar Shvartz 1975). Toutefois, le refroidissement combiné du tronc et d'une autre partie du corps (les bras) est plus efficace pour améliorer la vitesse de refroidissement et la performance (Toner et al. 1984).

5.3. Refroidissement de la tête et du cou :

Le refroidissement local de petites surfaces corporelles peut être suffisant pour assurer une dissipation optimale de la chaleur (Tyler et Sunderland 2011a). Bien que la tête et le cou (TC) ne représentent que 10% de la surface totale du corps (Du Bois et Du Bois 1989), le refroidissement de ces régions équivaut à un refroidissement d'environ 60% de la surface corporelle (Kissen et al .1971).

Le refroidissement de ces régions, séparément, a également un impact positif sur la température corporelle et la performance. D'une part, le refroidissement de la tête se fait généralement à l'aide de casques (eau ou air froid dans la partie intérieure du casque). Malheureusement, il existe très peu d'études qui examinent l'effet du refroidissement de cette région sur la température corporelle et/ou la performance lors d'un exercice physique (Hayashi et Tokura 2001). D'autre part, bien que le cou soit une région de petite surface corporelle, son refroidissement au cours de l'exercice physique assure une amélioration de la performance de 6 à 13 % grâce à un meilleur confort thermique (Minniti et al. 2011).

Ces deux régions corporelles sont généralement refroidies ensemble. Dans ce contexte, il a été rapporté que l'application du menthol sur la TC est plus efficace que celui du rinçage de la bouche (Cotter et Taylor 2005). Cela peut s'expliquer par le fait que la tête et le cou impliquent une plus grande densité de récepteurs thermiques sensibles au froid que la cavité oropharyngée. Le refroidissement de TC a été comparé à d'autres régions du corps (le torse, les bras ou les cuisses) (Shvartz 1970). Il a été démontré que le refroidissement de cette région (TC) assure une meilleure dissipation de la chaleur, un meilleur confort thermique et une augmentation de la performance. Cet effet bénéfique a été confirmé ultérieurement par des études examinant le refroidissement de la tête (Ansley et al. 2008) ou du cou (Sunderland et al. 2015).

5.4. Refroidissement de visage :

Le visage est très sensible à la chaleur en comparaison aux autres zones du corps. Néanmoins son refroidissement s'avère confortable (Nakamura et al. 2006, 2008). La sensation de confort est due à une grande densité de thermorécepteurs sensibles au froid au niveau du visage. En ce sens, il a été montré que le refroidissement de cette zone entraîne moins de transpiration et d'inconfort thermique (deux à cinq fois plus puissant) que le refroidissement d'une zone corporelle de taille équivalente (Cotter et Taylor 2005). Dans ce cadre, des études précédentes (Nunneley et al. 1971 ; Nunneley et al. 1982) ont montré que le refroidissement du visage favorise la sensation de confort thermique. Ces effets positifs peuvent expliquer, en partie, l'amélioration de la performance physique lors d'épreuves d'endurance en refroidissant le visage (Schlader et al. 2011b ; Stevens et al. 2017). De surcroît, le refroidissement du visage stimule probablement les nerfs trijumeaux, réduisant ainsi la fréquence cardiaque et le stress cardiovasculaire dans un environnement chaud (Williams et Kilgour 1993).

5.5. Refroidissement de la main :

Les vaisseaux sanguins, situés dans les extrémités (mains et pieds), se dilatent pour faciliter la dissipation de la chaleur dans un environnement chaud (Nakamura et al. 2013). En effet, le refroidissement de la main a déjà été utilisé pour réduire la température corporelle et l'inconfort thermique (N. A. Taylor et al. 2014).

Le refroidissement de la main a également un impact positif sur la performance aérobie (Goosey-Tolfrey et al. 2008), cette amélioration est associée à certains changements physiologiques tels que la réduction de la température tympanique et la concentration de lactate (Hsu et al. 2005). Cependant, le refroidissement de cette région a un effet limité sur le confort thermique, ceci peut s'expliquer par le fait que les extrémités sont les segments les moins thermosensibles du corps humain (Cotter et Taylor 2005). Il a été montré (Nakamura et al. 2013) que le refroidissement local de la main permettait l'amélioration du confort thermique local en condition chaude, alors que le confort thermique général (du corps entier) ne semble pas être affecté.

5.6. Refroidissement interne :

Le refroidissement interne (ingestion de boissons froides) est un complément ou une alternative aux méthodes de refroidissement externe (gilet de refroidissement, poches de glace...etc.). Le sentiment de fraîcheur dû à l'ingestion de boissons froides résulte probablement de la stimulation des récepteurs TRPM8 sensibles au froid et au menthol (Patel et al. 2007). De plus, le refroidissement interne peut être également associé à des sensations de plaisir vu que l'ingestion de boissons sucrées et froides génère de puissants effets sensoriels qui peuvent stimuler les centres du plaisir dans le cerveau (Rollo et al. 2008). Le refroidissement interne agit comme étant un dissipateur de la chaleur gastro-intestinale (Burdon et al. 2013) puisqu'il stimule la dissipation de la chaleur par conduction (Morris et Jay 2016). D'autant plus, certaines études récentes ont rapporté un effet positif de refroidissement interne sur la performance aérobie (Stevens et al. 2013 ; C. A. Burdon et al. 2013).

Ce type de refroidissement peut avoir plus d'impact que le refroidissement externe sur la performance aérobie dans un environnement chaud (Best et al. 2018). Prenons l'exemple du menthol (un rinçage de la bouche ou un additif à une boisson) qui semble avoir un impact positif sur la performance aérobie (C. J. Stevens et al. 2016). Néanmoins, d'autres travaux (De Carvalho et al. 2015 ; LaFata et al. 2012) n'ont pas rapporté d'effet positif du refroidissement interne sur la performance. Les auteurs expliquent ces résultats par un faible taux de sudation et d'évaporation (Bain et al. 2012) suite à la stimulation des thermorécepteurs situés dans la région abdominale (Morris et al. 2014).

Synthèse :

- Le refroidissement du corps entier ou d'une large surface corporelle permet une dissipation maximale de la chaleur. Or, le refroidissement d'une petite partie corporelle, impliquant une irrigation tissulaire élevée, peut suffire à dissiper totalement la chaleur.
- Le refroidissement du tronc assure une dissipation importante de la chaleur grâce à sa grande sensibilité au froid alors que son refroidissement combiné avec une autre partie (ex : les bras) peut être plus avantageux pour améliorer la performance.
- La tête et le cou se caractérisent par une grande sensibilité au froid, ce qui influence positivement la performance et le confort thermique dans une condition chaude.
- Quoi que la tête et le cou ne représentent que 10% de la surface corporelle, leur refroidissement est équivalent à celui de 60% de la surface corporelle.
- Le refroidissement du cou lors d'un exercice physique est recommandé pour des raisons pratiques car le cou est facilement accessible et pour des raisons anatomiques puisque le cou se situe à proximité du centre de thermorégulation.
- Le refroidissement du visage entraîne une réduction de la transpiration et de l'inconfort thermique 2 à 5 fois de plus que d'autres zones équivalentes en surface.
- Malgré le fait que les mains aient une faible sensibilité au froid, elles sont fortement impliquées dans la dissipation de la chaleur et l'amélioration de la performance.
- Néanmoins, bien que l'ensemble de ces résultats soit concluant, il est difficile d'avoir une vision claire sur quelles sont les régions à refroidir prioritairement pour optimiser les performances aérobies et anaérobies en condition chaude.

6. Les réponses physiologiques et perceptives au « per-cooling » :

Un exercice physique, effectué dans un environnement chaud, induit des altérations cardiovasculaires, thermiques, cérébrales et psychophysiologiques (Nybo et al. 2014). Il est probable que l'utilisation du « per-cooling » est une solution efficace pour éviter l'apparition de ces altérations et maintenir la performance de d'exercice.

6.1. Les réponses thermorégulatrices :

L'exposition au froid augmente le gradient de la température entre le centre du corps et la peau (chaleur transférée du noyau à la peau) au cours de l'exercice physique. Cela permet une meilleure dissipation de la chaleur (Adams et al. 2018) et empêche l'atteinte de la température à une valeur critique (40°C) (Bongers et al. 2017). En effet, le « per-cooling » pourrait être un moyen efficace pour atténuer l'augmentation de la température centrale (Stevens et al. 2013). De nombreuses études ont rapporté que le port d'un gilet refroidissant, au cours de l'exercice physique, ralentit l'augmentation de la température centrale en réduisant la production de la chaleur (Kenny et al. 2011 ; Tyler et Sunderland 2011).

De plus, l'utilisation du « per-cooling » réduit la température cutanée et les sensations thermiques grâce à une vasoconstriction périphérique et une augmentation du gradient de température entre la peau et l'environnement extérieur (Cheuvront et Haymes 2001). Cela permet une meilleure tolérance à la chaleur (Hasegawa et al. 2005) et une amélioration de la performance (Schlader et al. 2011a). Une méta-analyse récente (Bongers et al. 2015a) a montré que le « per-cooling » induit une diminution moyenne de la température cutanée de 0,8 °C accompagnée d'une réduction de la température centrale et une amélioration de la capacité d'effort. Cependant, le taux de sudation ne semble pas réduit par quelques techniques de per-cooling notamment l'ingestion des boissons froides (Stevens et al. 2017 ; Stevens et al. 2017).

Néanmoins, il est important de souligner qu'un refroidissement externe sévère peut ralentir l'initiation de la sudation et donc limiter la dissipation de la chaleur (Adams et al. 2018). De même, le refroidissement sévère des muscles réduit les processus enzymatiques et la conduction nerveuse, limitant à son tour le taux de développement de la force et de l'endurance musculaire (Drinkwater 2008).

6.2. Les réponses cardio-vasculaires :

Une activité physique, effectuée dans environnement chaud, s'accompagne d'une augmentation de l'activité métabolique (Parkin et al. 1999) et cardiovasculaire (González-Alonso et al. 2008). Par conséquent, le flux sanguin cutané augmente afin de faciliter l'évacuation de chaleur, ce qui peut éventuellement réduire le débit cardiaque (Sawka et al. 2012). En effet, le refroidissement de la peau, en utilisant le « per-cooling », induit une vasoconstriction périphérique et une redistribution du sang vers le centre du corps (Konishi et al. 2017). Cela assure une augmentation du volume sanguin central et par conséquent une réduction de la fréquence cardiaque (Olschewski et Brück 1988), une augmentation du volume d'éjection systolique (James et al. 2015) et un meilleur maintien du débit cardiaque (Johnson et al. 2014), en d'autres termes une meilleure réponse cardio-vasculaire (Yeung et al. 2016). En effet, le refroidissement de la peau, en utilisant les vêtements de refroidissement, diminue de manière significative la fréquence cardiaque (Butts et al. 2017) et augmente le retour veineux grâce à une vasoconstriction cutanée induite par le froid. D'autres travaux scientifiques ont confirmé cet effet bénéfique du « per-cooling » en utilisant diverses techniques au cours de l'exercice physique tel que la ventilation (Teunissen et al. 2013), le port de gilet refroidissant (Kenny et al. 2011) et l'ingestion de boissons froides (Lee et al. 2008).

Ces effets positifs du per-cooling sur les réponses cardio-vasculaires (une fréquence cardiaque réduite et un volume d'éjection systolique plus important) expliquent, en partie, l'optimisation de la performance grâce à une augmentation du flux sanguin et de l'apport d'oxygène vers les muscles actifs (Bongers et al. 2017). Néanmoins, certaines études ont rapporté une amélioration de performance même sans diminution de la fréquence cardiaque ou de la température centrale (Tyler et Sunderland 2011b; Ruddock et al. 2017). Bongers et al (Bongers et al. 2015b) n'ont pas rapporté dans leur travail de méta-analyse un impact positif du per-cooling sur la fréquence cardiaque. À ce jour, les réponses cardiovasculaires au cooling ne sont pas totalement connues.

6.3. Ajustements du système nerveux central :

Un exercice physique prolongé peut être accompagné d'une fatigue centrale. Celle-ci peut être induite par plusieurs facteurs tels que la réduction du débit sanguin cérébral (Wilson et al. 2006), l'inhibition de la commande motrice (Morrison et al .2004), et un faible rapport sérotonine: dopamine dans l'hypothalamus (Bridge et al. 2003). Toutefois, l'utilisation du froid peut lutter contre ces altérations. Plusieurs chercheurs ont souligné un effet positif du per-cooling sur les ajustements du système nerveux central (Stevens et al. 2017 ; Ansley et al. 2008 ; Mündel et Jones 2010).

La dopamine, la sérotonine et la noradrénaline sont des neurotransmetteurs importants qui régulent le système nerveux central dans un environnement chaud (Meeusen et Roelands 2010). De même, la prolactine a été proposée comme marqueur périphérique de la fatigue centrale dans un environnement chaud. Sa libération est inhibée par l'activité dopaminergique et stimulée par l'activité sérotoninergique (Freeman et al. 2000). Il a été montré que le refroidissement du visage réduit significativement la concentration sanguine de prolactine pendant l'exercice (Ansley et al. 2008 ; Mündel et al. 2007). De plus, il a été montré que d'autres techniques de refroidissement, tels que les colliers du cou (Sunderland et al. 2015) ou la combinaison de la pulvérisation d'eau et le rinçage de la bouche (menthol) (Stevens et al. 2017), réduisent la concentration de prolactine. En somme, la diminution de la concentration de prolactine due à l'utilisation du per-cooling peut suggérer une diminution de la fatigue centrale. Or à ce jour, l'effet du per-cooling sur les réponses cérébrales n'est pas clair voire connu.

6.4. Les réponses perceptives :

Le « per-cooling » améliore les réponses perceptives (le confort thermique, le bien-être, la perception de la température et la perception de la difficulté de l'effort: RPE) en réduisant la température cutanée (Bongers et al. 2015b) et en stimulant les récepteurs du froid localisés dans la peau (Schlader et al. 2011b) ou dans la cavité oropharyngée (Mündel et Jones 2010). En effet, une meilleure perception thermique fournit aux athlètes un sentiment de fraîcheur et une diminution de la perception générale de la fatigue (Smith et al. 2017), améliorant ainsi la performance de l'exercice (Ruddock et al. 2017). Dans cette perspective, il a été montré que le fait de se sentir plus frais, dans un environnement chaud, empêche la dégradation de la performance lors d'un exercice prolongé (Castle et al. 2012).

L'exposition au froid, dans un environnement chaud, favorise le confort thermique soit au repos (Nakamura et al. 2013) ou pendant l'exercice (Lee et al. 2014 ; Tyler et al 2010), ce

qui permet aux travailleurs de percevoir leurs tâches quotidiennes moins fatigantes (Butts et al. 2017). Cela permet d'effectuer une activité physique pour une plus longue durée avec une meilleure performance physique et cognitive (Schmit et al. 2016 ; Schulze et al. 2015). Lors d'épreuves d'endurance (Watson et al. 2005) ou de haute intensité (Webborn et al. 2010), le « per-cooling » améliore la capacité de travail et réduit la perception de la difficulté de l'effort, ce qui pourrait améliorer la performance de l'exercice.

Bien que certaines techniques de refroidissement n'induisent pas de changements physiologiques (par exemple sur la température corporelle), elles peuvent améliorer les réponses perceptives (confort thermique, perception de l'effort) (Best et al. 2018). De ce fait, en l'absence de changements physiologiques l'athlète doit faire attention aux fausses sensations thermiques qui peuvent conduire à prolonger son activité physique et l'exposer au risque de troubles liés à la chaleur (crampes musculaires, coup de chaleur).

Synthèse :

Les principales réponses physiologiques et perceptives au per-cooling sont présentées dans la figure suivante :

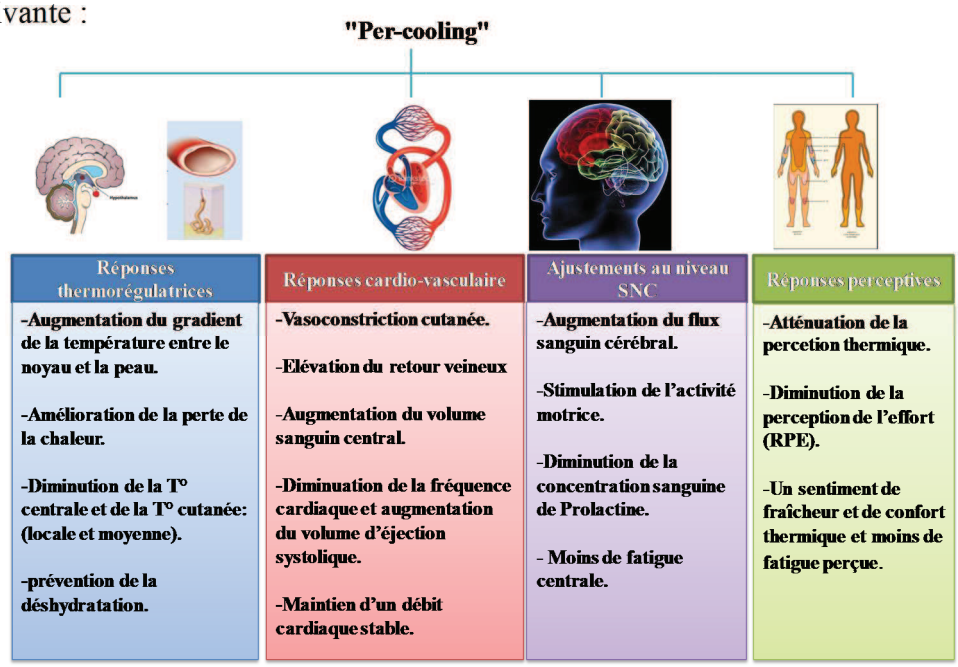


Figure 19 : *Résumé des réponses physiologiques et perceptives au "per-cooling*

7. Influence de la température ambiante sur l'efficacité de per-cooling :

L'efficacité du "per-cooling" peut dépendre du niveau de la température ambiante. Le taux de refroidissement du tronc (gilet de refroidissement) a été évalué dans une condition thermique non compensable (Kenny et al. 2011) et une condition compensable (Cuttell et al. 2016). Il a été conclu que plus le stress thermique est élevé, plus le refroidissement est optimal (D. Filingeri et al. 2015). De plus, il a récemment été démontré que plus la température et l'humidité relative augmentent, plus le taux de refroidissement de l'ingestion de l'eau froide est important chez les athlètes (cyclistes) (Jay et Morris 2018) **(Figure 20).** Par conséquent, il peut y avoir un seuil de température ambiante qui doit être atteint pour obtenir un avantage de refroidissement au cours de l'exercice (Tyler et al .2010).

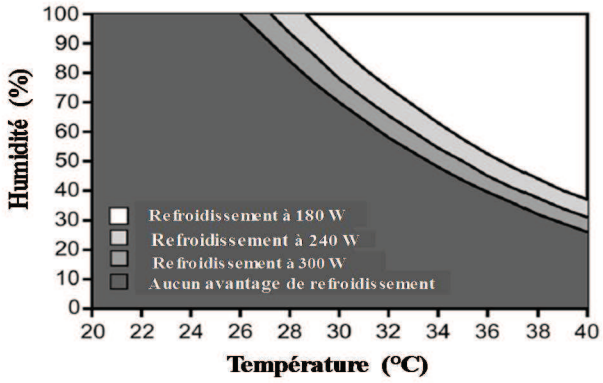


***Figure 20**: Estimation des conditions environnementales auxquelles l'ingestion de l'eau froide fournit un effet de refroidissement net pour le pédalage sur une surface plane à une puissance externe de 180, 240 et 300 W (Jay et Morris 2018).*

Par ailleurs, la plupart des études testant l'effet du refroidissement au cours de l'exercice ont été effectuées à des températures ambiantes de 30 ° C ou plus. Néanmoins, il y a un manque jusqu'à présent d'études qui examinent l'effet du per-cooling dans un environnement thermo-neutre dont la température ambiante est inférieure à 25 °C (Eijsvogels et al. 2014). De ce fait, les réponses physiologiques ou perceptives au per-cooling dans ce type d'environnement ne sont pas assez claires dans la littérature scientifique.

8. Les considérations pratiques du per-cooling :

Un questionnaire réalisé avant les championnats du monde de 2015 à Pékin montre qu'environ 52% des athlètes utilisent une technique de « pré-cooling » (avant l'exercice) convenue à l'avance, la technique la plus choisie était l'ingestion de boissons froides. En « post-cooling » (récupération), environ 47% des athlètes ont choisi l'immersion dans l'eau froide (Périard et al. 2016). Cependant, les athlètes n'ont pas utilisé le « per-cooling » (pendant l'exercice) tout au long du Championnat du Monde.

Dans les sports collectifs et les matchs de tennis, les athlètes peuvent utiliser des stratégies de « per-cooling » pendant les séances d'entraînement ou les pauses, à l'instar du refroidissement interne (ingestion de boissons froides) (Racinais et al. 2015), qui représente une technique très pratique et accessible chez les athlètes. Lors des épreuves de cyclisme, les athlètes utilisent des bouteilles en silicone avec une large buse qui permet l'accès aux boues de glace (Laursen 2016) ou par la pulvérisation d'eau froide (1°C) sur le corps (Morris et Jay 2016). D'autres interventions de refroidissement externe faciles et pratiques à mettre en place pendant l'exercice tel que le port des vêtements de refroidissement ou les colliers de refroidissement du cou (Tyler et Sunderland 2011a; Luomala et al. 2012). Les colliers de refroidissement du cou sont pratiques puisqu'ils ne limitent pas les mouvements du corps. De plus, l'utilisation des ventilateurs et des gilets refroidissants pourrait être efficace car ils assurent un refroidissement cutané sans altérer la température musculaire (Racinais et al. 2015).

Le per-cooling peut être utilisé pendant les séances d'entraînement et les mi-temps dans les sports collectifs tels que le football, le rugby et le hockey (Arngrïmsson et al. 2004). Au Football, lorsque les conditions environnementales dépassent 32°C, une pause de 5 min est ajoutée pendant la première et la deuxième partie des matchs pour permettre aux athlètes d'appliquer un refroidissement corporel et réduire le stress thermique (Adams et al. 2016). De plus, le per-cooling peut être appliqué facilement chez les sportifs de combat entre les tours (rounds) en utilisant des poches de glace, des boissons froides et des gilets refroidissants

(Carballeira et al. 2018). En somme, La technique de per-cooling utilisée lors d'un exercice physique doit disposer un équilibre entre le type de refroidissement, le poids et la mobilité pour assurer un effet optimal du « cooling » (Choi, Kim, et Lee 2008). Les règlements de chaque sport dictent le nombre de pauses, la durée des pauses, le nombre de remplacements pendant le jeu et l'équipement de protection porté (Adams et al. 2016). Logiquement, le moment et le type de la technique de refroidissement utilisée dépendent de ces facteurs. Adams et al (Adams et al. 2016) présentent les techniques du per-cooling qui se sont révélées faisables et optimales selon les sports pratiqués, ceci est détaillé dans le tableau présenté ci-dessous :

Tableau 2: les techniques optimales du per-cooling selon le sport pratiqué (Adams et al. 2016).

Sport	Moment	IE	IP	PE	SG	PG	SV	RT	RM	G	VR	H	IG
Triathlon	Vélo										□	●	□
	Course										□	●	□
Tennis	Entre sets				□	□					□	●	□
	Entre jeux				□	□					□	●	□
Course moteur	Course										□		
Lacrosse	Mi-temps		□		□	□		□	□		□	●	□
Hockey	Pauses				□	□		□	□		□	●	□
Football A	Mi-temps		□		□	□		□	□		□	●	□
Football	Mi-temps	●	●	○	□	□		□	□	□	□	●	□
Basketball	Mi-temps		○		□	□	□	□	□	□	□	●	□
Baseball	E-manches		□		□	□	□	□	□		□	●	□
Course	compétition			□							□	●	□
Cyclisme	compétition										□	●	□
Aviron	Compétition										□	●	□
Rugby	Mi-temps	○	○	○	□	□		□	□	□	□	●	□

Abréviations* : *IE *: immersion en eau froide du corps entier ;* ***IP*** *: immersion d'une partie du corps ;* ***PE*** *: pulvérisation d'eau ;* ***SG*** *: serviette de glace ;* ***PG*** *: poches de glace ;* ***SV*** *: système de ventilation ;* ***RT*** *: refroidissement de la tête ;* ***RM*** *: refroidissement de la main ;* ***G*** *: gilet de refroidissement ;* ***VR*** *: vêtement de refroidissement ;* ***H*** *: hydratation ;* ***IG*** *: ingestion des boues de glace ;* ***E-manches*** *: entre les manches.* ● *: un refroidissement optimal (avec preuve scientifique) ;* ○ *: un refroidissement optimal (sans preuve*

9. Limites d'utilisation du « per-cooling » :

Certaines stratégies de « per-cooling » peuvent avoir leurs propres limites, telles que le sentiment d'inconfort ou d'irritation. En effet, certains athlètes rapportent que le collier de refroidissement du cou est inconfortable ou irritant (Minniti et al .2011). De plus, l'efficacité de ces techniques peut être limitée par des facteurs techniques tels que le poids supplémentaire ajouté aux athlètes (par exemple: gilet refroidissant) (Luomala et al. 2012). Il a été montré que le port de vêtements lourds augmente la dépense énergétique. Dans ce cadre, une ancienne étude (Duggan 1988) a rapporté que le port des vêtements de 3 kg et 5 kg provoquent une augmentation de la dépense énergétique jusqu'à 5% et 9%, respectivement, cela peut affecter négativement la performance de l'exercice. En ce sens, il a été souligné que le poids additionnel au corps aboutit à la dégradation de la performance humaine de 2,4% à 3,5% par kilogramme (Larsen 2011).

D'autres techniques de « per-cooling », tels que le port des vêtements de refroidissement, restreignent les mouvements des athlètes pendant l'exercice (Lclboratory 1978). De plus, les vêtements faits à base de matériaux à changement de phase nécessitent de grandes quantités de liquide pour fournir un refroidissement prolongé, cela pourrait ralentir l'effet bénéfique de refroidissement (Kenny et al. 2011).

En ce qui concerne le refroidissement interne, l'ingestion des gros volumes de boues de glace (240 ml) ou d'eau froide (400 ml) induit des effets indésirables tels qu'une diminution de l'activité des glandes sudoripares et une limitation de la dissipation de la chaleur, entraînant ainsi une augmentation de la production de la chaleur et une température corporelle élevée (Ruddock et al. 2017).

Par ailleurs, un refroidissement sévère avec une diminution de 1.9 °C de température corporelle affectent négativement la performance aérobie (Bergh et Ekblom 1979) et réduit les processus enzymatiques et la conduction nerveuse, ce qui limite le développement de la force et de l'endurance musculaire (E. Drinkwater 2008).

10. Conclusion : (partie II) Résumé des facteurs influençant le Per-cooling et ses avantages en domaine sportif et industriel :

Un exercice physique effectué dans un environnement chaud provoque une fatigue précoce et une altération de la performance. Pour baisser la température corporelle, des techniques de refroidissement ont été utilisées dans le contexte de l'exercice physique, c'est ce qu'on appelle le "per-cooling". Ceci peut être appliqué, soit sous forme interne par l'ingestion de boissons froides ou sous forme externe en portant des gilets de refroidissement ou des colliers de refroidissement du cou...etc.

L'avantage principal du per-cooling est qu'il agit directement pour refroidir le corps lorsqu'il est déjà soumis à la chaleur, avec un impact immédiat sur la performance. En effet, les chercheurs recommandent l'utilisation du per-cooling chez les athlètes pendant les mi-temps ou les séances d'entraînement pour faciliter la dissipation de la chaleur et atténuer le risque des troubles liés à la chaleur, et également chez les travailleurs dans un environnement chaud tel que les pompiers ou les soldats pour améliorer les conditions de travail et réduire les

risques d'accident. Le per-cooling fournit un confort thermique qui sert à prolonger le temps de travail et la productivité dans le domaine industriel.

En ce qui concerne la performance, le per-cooling s'avère avantageux pour les exercices d'endurance. Or les gains de performance tendent à être meilleurs dans les épreuves de Tlim (9-51%) par rapport aux épreuves de CM (3-9%). D'autre part, l'efficacité de "per-cooling" dans les exercices anaérobies dépend de la durée de l'application du cooling et de la valeur de la température interne. Néanmoins les résultats restent contradictoires et aucun consensus n'existe à ce jour, ne permettant de conclure sur l'efficacité du per-cooling sur la performance aérobie et anaérobie.

L'efficacité du per-cooling dépend de plusieurs facteurs notamment la température ambiante, le volume de refroidissement et la partie du corps refroidie. En outre, le refroidissement du corps entier ou d'une large surface corporelle permet une dissipation maximale de la chaleur. Cependant, le refroidissement d'une seule partie corporelle, impliquant une irrigation tissulaire élevée, peut suffire à dissiper totalement la chaleur. Ces résultats contradictoires ne permettent pas de fournir une conclusion claire sur l'effet du per-cooling selon la partie du corps refroidie. Dans ce chapitre, nous avons détaillé l'effet de refroidissement de chaque partie du corps et les caractéristiques de chaque région corporelle notamment la tête, le cou, le tronc, le visage et les mains. Il est probable que l'utilisation du « per-cooling » atténue le stress thermique et optimise la performance à travers des ajustements cardio-vasculaires, thermorégulatrices, nerveuses et perceptifs.

D'un point de vue pratique, le « per-cooling » peut être utilisé pendant l'entraînement, les échauffements, et les mi-temps en appliquant un refroidissement interne ou externe, tel que l'application d'un gilet refroidissant ou d'autres techniques plus pratiques qui ne limitent pas les mouvements du corps comme un collier de refroidissement. Nous avons également signalé dans ce chapitre quelques limites de l'utilisation du per-cooling qui pourrait affecter négativement la performance ou la dissipation de la chaleur. Les facteurs influençant l'efficacité du per-cooling, les réponses physiologiques attendues ainsi que ses avantages dans les domaines sportif et industriel sont résumés dans la figure présentée ci-dessus :

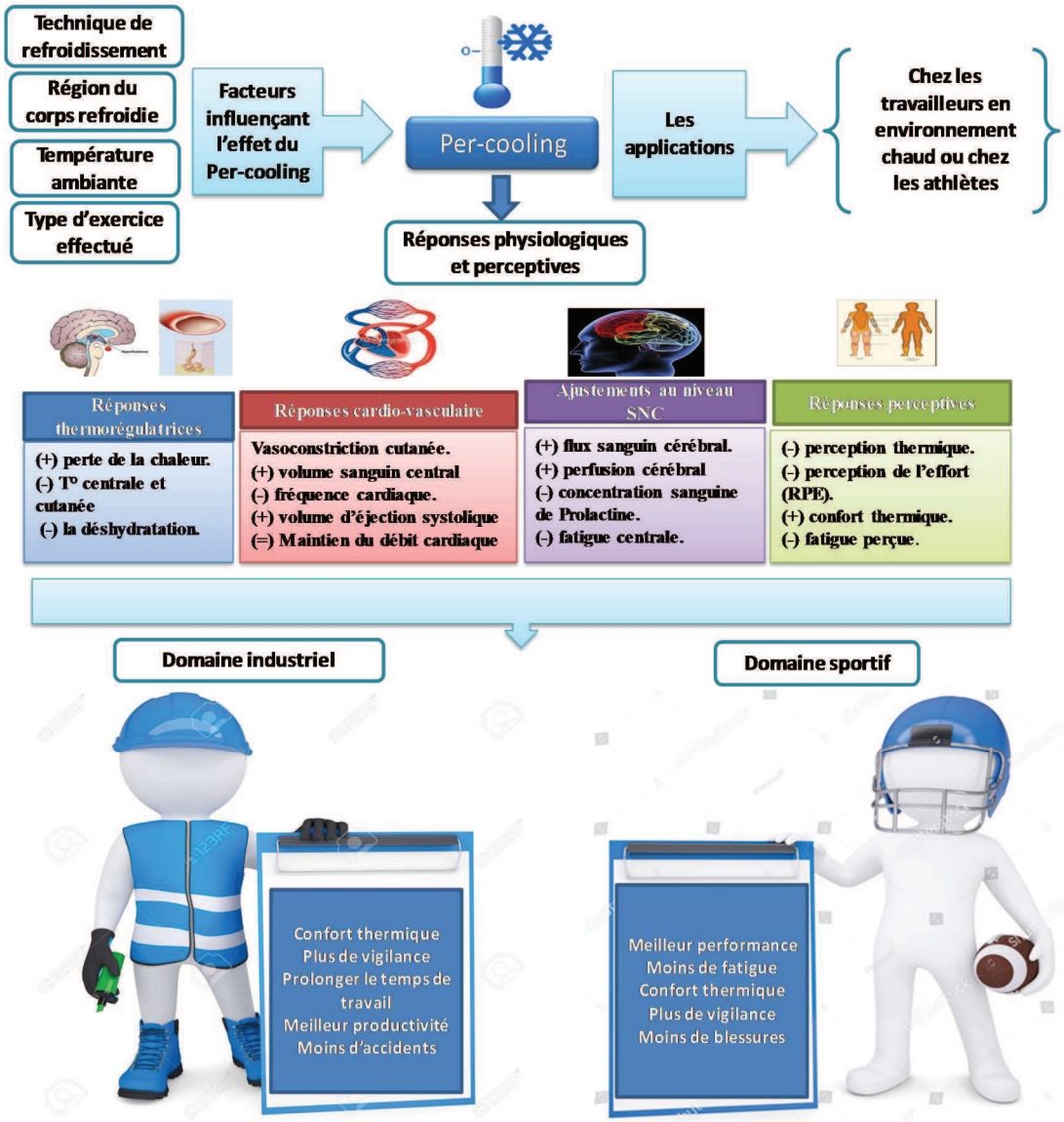


Figure 21 *: Résumé des facteurs influençant l'effet du per-cooling, ses effets sur les réponses physiologiques et ses avantages en domaines sportif et industriel.*

Chapitre 2

1. La Récupération après un exercice induisant des dommages musculaires (EIDM) :

1.1. Caractéristiques des exercices induisant des dommages musculaires :

Les athlètes entreprennent des séances d'entraînement de charge et d'intensité différentes afin de créer des adaptations physiologiques et optimiser leurs performances (Murray et Cardinale 2015). Néanmoins, un exercice physique inhabituel et / ou de haute intensité peut induire des lésions et des dommages musculaires (Bouzigon et al. 2016).

Les exercices physiques induisant des dommages musculaires (EIDM) sont généralement de type excentrique (Kwiecien et al. 2018). Un EIDM provoque la production de radicaux libres oxygénés (RLO) qui peuvent dénaturer les protéines, les acides nucléiques et les lipides, déstabilisant ainsi les cellules musculaires telles que le sarcolemme (Powers et Jackson 2008). Un sarcolemme déstabilisé rend les fibres musculaires plus perméables (Kendall et Eston 2002) et exposées à des micro déchirures, en particulier aux niveau des membranes cellulaires et du réticulum sarcoplasmique. De ce fait, des réactions inflammatoires sont déclenchées dans les tissus endommagés via la sécrétion de cytokines pro-inflammatoires par les neutrophiles, les lymphocytes et les monocytes (Peake et al. 2005; Paulsen et al. 2012). Les leucocytes, les cytokines pro-inflammatoires et les RLO induisent ensemble une dégradation intramusculaire qui contribue à accentuer les lésions musculaires initiales. Ces réactions provoquent l'augmentation de la concentration des enzymes musculaires (créatine kinase : CK, LDH) dans la circulation systémique 24 à 48 heures à l'issue de l'exercice (Ferreira-Junior et al. 2014).

Un EIDM peut être associé à des œdèmes musculaires qui empêche l'apport d'oxygène aux muscles (Yanagisawa et al. 2004). Ces dommages musculaires s'accompagnent également d'une réduction de la force musculaire, de l'apparition de douleurs musculaires (DOMS) et d'une réponse inflammatoire aiguë (Rose et al. 2017). Cependant, la sévérité des dommages musculaires induits par un EIDM dépend du mode, de la durée et de l'intensité de l'exercice effectué (Miles et Clarkson 1994).

Comme montré dans la figure présentée ci-dessous **(figure 22),** Ferreira-Junior et al (Ferreira-Junior et al. 2014) présentent le processus inflammatoire déclenché par un EIDM.

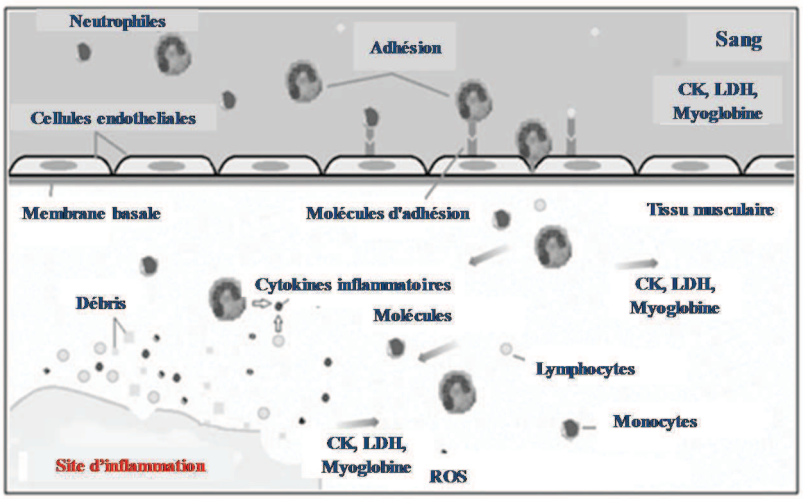


Figure 22 : *Processus inflammatoire aigu déclenché par un exercice induisant des dommages musculaires (EIMD) (Ferreira-Junior et al. 2014).*

Les dommages musculaires induits par un EIDM provoquent une sensation d'inconfort, de fatigue et de douleur musculaire. En effet, les performances musculaires peuvent être temporairement altérées pendant plusieurs minutes, plusieurs heures ou voire même plusieurs jours à l'issue d'un EIDM. Ces altérations sont probablement dues à un temps de réaction musculaire perturbé ou à une raideur musculaire persistante pendant plusieurs jours (Leeder et al. 2012; Paschalis et al. 2008). De plus, il existe un risque accru de blessure dans les groupes musculaires endommagés suite à un EIDM (Cheung et al. 2003).

1.2. La récupération :

Il est clairement admis qu'un exercice physique intense agit comme un facteur de stress sur le corps humain et en particulier sur le système musculo-squelettique (Ascensao et al. 2011). Plus le stress exercé est important, plus la réponse de l'organisme contre ce stress est importante. Cela s'appelle la relation « dose-réponse » (Matveev et Zdornyj 1981). Pendant la phase de retour à l'homéostasie, une adaptation physiologique est créée pour permettre à l'individu de résister de manière plus efficace à un stress de même nature, et donc atteindre un niveau supérieur à celui de l'état initial (Harre et al .2012). Cela correspond au phénomène de « surcompensation » (Joyce et Lewindon 2014) , or ce gain de performance peut être perdu suite à une récupération insuffisante. **(Figure 23)** (Gremion et Kuntzer 2014)**.**

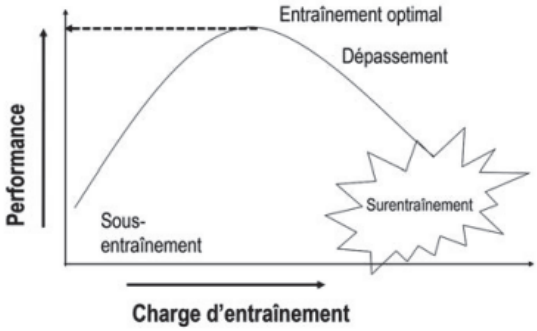


Figure 23**: Evolution de la performance en cas de récupération insuffisante (Gremion et Kuntzer 2014).**

Pour qu'un nouvel entraînement soit efficace, il doit y avoir une récupération suffisante et appropriée entre deux séances d'entraînement. La récupération est un principe établi en médecine, datant de 460 avant JC. Il signifie le maintien de l'homéostasie physiologique, c'est-à-dire le maintien de l'équilibre intérieur de l'organisme tel que le défini le physiologiste Claude Bernard (Brion et al. 2013). La récupération se base sur le principe selon lequel, le repos est essentiel à la guérison et autant à l'amélioration de la performance sportive (Howatson et al .2016). Elle permet aux athlètes de retourner facilement au repos suite aux changements physiologiques et perceptifs induits par l'exercice (Hausswirth et Le Meur 2011). Le temps requis pour retourner à l'homéostasie après un EIMD peut être lié à la récupération de cellules directement endommagées par l'exercice physique et de cellules voisines qui peuvent être endommagées en raison de la réponse inflammatoire induite par l'exercice (Pournot et al. 2011). Bref, '*la récupération est le temps nécessaire pour que divers paramètres physiologiques, modifiés par l'exercice, reviennent aux valeurs de repos, et d'un point de vue pratique elle correspond à l'ensemble des processus qui permettent à l'athlète de*

renouveler sa capacité afin d'atteindre ou dépasser une performance précédente' (Hausswirth et Mujika 2013).

En effet, pour organiser un programme d'entraînement efficace, il est nécessaire de confronter l'athlète non seulement à des périodes d'entraînement bien planifiées mais aussi à une récupération appropriée pour faciliter les adaptations et développer les qualités physiques de l'athlète (Murray et Cardinale 2015). Pour ce faire, de nombreuses techniques de récupération sont mises au point pour assurer une récupération optimale, réduire le temps entre deux sessions d'entraînement et préparer la prochaine session d'entraînement dans de bonnes conditions.

Les techniques de récupération les plus utilisées, après un exercice physique, comprennent des modalités de compression telles que : le massage (Kargarfard et al. 2016) ; les vêtements compressifs (Hill et al. 2014), l'étirement (West et al. 2014), l'immersion dans l'eau (9-15°C) (Versey et al .2013), l'électrostimulation (Warren et al .2015), des interventions anti-inflammatoires reposantes sur l'exposition au froid tels que la cryothérapie/cryostimulation (Krüger et al. 2015) ou l'immersion en eau froide (Poppendieck et al. 2013) ; et la récupération active (Roberts et al. 2015). Malgré le fait que la récupération soit reconnue comme la clé du succès de tout entraînement bien organisé, il n'existe pas de conclusion claire sur la modalité de récupération la plus optimale en fonction des objectifs de l'entraînement.

Synthèse :

- Un exercice physique inhabituel et / ou de haute intensité peut induire des lésions musculaires, des douleurs musculaires et une altération de la performance. D'où l'intérêt d'une récupération appropriée pour pallier ces problèmes et optimiser la performance.

2. Définition de "post-cooling" :

Le post-cooling correspond à l'utilisation du froid comme moyen de récupération après une activité physique. Il a été montré que le post-cooling facilite le processus de récupération en diminuant la température corporelle (centrale, cutanée et / ou musculaire), la douleur musculaire et la réponse inflammatoire induite par l'exercice et en optimisant la performance de l'activité physique subséquente (Bongers et al. 2017; Rose et al. 2017). Aujourd'hui, le froid est fortement utilisé dans les domaines médicaux et sportifs, à travers diverses stratégies telles que l'exposition du corps humain à l'air très froid (cryothérapie corps entier ou partiel) (Krüger et al. 2015), l'immersion en eau froide (Versey et al .2013) et d'autres techniques de refroidissement local (poches de glace) (Pointon et al. 2011).

Le post-cooling est de plus en plus utilisé par les sportifs à la fin des compétitions, à la mi-temps et entre des séances d'entraînement consécutives. Dans une revue récente, Adams et al (Adams et al. 2018) ont proposé une définition du post-cooling et quelques exemples d'utilisation (Tableau 4).

***Tableau 3**: Définition du post-cooling et quelques exemples des sports employant le post-cooling (Adams et al. 2018)* :

Type de refroidissement	Définition de refroidissement	Moment de refroidissement	Exemples de sports	Exemples des techniques
Post-cooling	Un refroidissement du corps après la fin de l'exercice ou de la compétition.	**c)** Entre les séries ou les mi-temps.	Tennis, natation, Football.	Poches de glace, cryothérapie, boissons froides.
		d) Après la fin de l'exercice.	Football, Rugby, lacrosse	Immersion en eau froide

3. Les techniques de "post-cooling" :

Immersion en eau froide :

Les premiers travaux, utilisant l'immersion en eau froide, ont été menées par Daily et Harrison (Daily et al.1948) et par Ferris et al (Ferris Jr et al. 1938). L'immersion en eau froide (CWI), est une technique de récupération qui consiste à immerger des segments corporels dans l'eau à des températures inférieures à 15°C (Almeida et al. 2016). L'eau réduit efficacement la température corporelle grâce à sa grande conductivité de la chaleur, 25 fois plus grande que celle d'air (Wakabayashi et al. 2008). Dans les 30 premières secondes d'immersion, un "choc thermique" se produit. Ce phénomène se caractérise par une hyperventilation, une hypocapnie, une tachycardie et une hypertension (Tipton 1989), les personnes s'adaptant généralement après environ 3 minutes (Datta et Tipton 2006). Dans le contexte de la récupération, la température de CWI varie de 5 à 20 °C avec un temps d'immersion total allant de 3 à 20 minutes et une profondeur allant de la taille à la hauteur des épaules. L'intervention peut être réalisée en une seule session (5-20 min) ou plusieurs sessions courtes (1-5 min) séparées par une pause hors de l'eau (1 à 2,5 min). Cette technique est très pratique puisque les athlètes peuvent utiliser un bain ou une piscine portable, surtout lorsqu'ils voyagent pour une compétition. Selon une enquête récente (Crowther et al. 2017), 331 athlètes interrogés ont déclaré que l'immersion en eau froide est la deuxième technique de récupération la plus efficace (la première est l'étirement).

L'efficacité de l'immersion en eau froide provient de son rôle essentiel dans la relaxation et l'atténuation de la fatigue et de la douleur (Ihsan et al. 2016). La réduction de la douleur musculaire est bien confirmée dans la littérature scientifique examinant l'utilisation du CWI (Fonseca et al. 2016). D'autre part, l'efficacité de cette intervention peut résulter également de l'effet combiné de la pression hydrostatique (les forces de compression exercées par l'eau sur le corps pendant l'immersion dans l'eau) et la vasoconstriction induite par le froid. Ces deux facteurs limitent la formation des œdèmes et des lésions musculaires, et améliorent l'oxygénation musculaire et la fonction contractile (Wilcock et al .2006). L'Association Nationale des Formateurs d'Athlétisme recommandent l'utilisation de l'immersion en eau glacée (Binkley et al. 2002) pour la prise en charge des patients souffrant

d'un coup de chaleur. Cette intervention est également utilisée chez les athlètes après les séances d'entraînement ou les compétitions **(Figure 24)**

Figure 24 *: Membres de l'équipe féminine de basketball britannique prennent un bain de glace après l'entraînement. Les Jeux Olympiques de Londres 2012.*

Cryothérapie/Cryostimulation :

La cryothérapie/cryostimulation est une courte exposition (2 à 4 min) à l'air très froid d'une température allant de -110 à -195°C dans des pièces spéciales (chambres de cryothérapie ou Cryo-cabines) **(Figure 25)** (Vieira et al. 2015). Pendant ces expositions, les personnes portent le minimum de vêtements: des gants, un bandeau en laine couvrant les oreilles, un masque couvrant le nez et la bouche, et des chaussures et chaussettes sèches pour réduire le risque de blessure lié au froid (Bleakley et al. 2014). La cryothérapie a été utilisée pour la première fois par Toshiro Yamauchi pour traiter les patients atteints de polyarthrite rhumatoïde à la fin de l'année 1970 (Rymaszewska et al. 2003). Récemment, la cryothérapie est utilisée pour traiter un large éventail de maladies telles que: la polyarthrite rhumatoïde (Gizińska et al. 2015); la fibromyalgie (Bettoni et al. 2013); la spondylarthrite ankylosante (Stanek et al. 2015); la sclérose en plaques (Miller et al. 2016) et même le traitement des symptômes de l'anxiété et de la dépression (Rymaszewska et Ramsey 2008). Cette modalité de froid a été classée comme une intervention sécurisée puisqu'elle n'affecte ni la fonction cardiaque ni la fonction immunologique chez les sujets sains (Banfi et al. 2010).

Par ailleurs, la cryothérapie/cryostimulation est de plus en plus utilisée par les athlètes comme moyen de récupération pour accélérer le traitement des blessures musculaires et faciliter la récupération entre les séances d'entraînement (Banfi et al. 2010). Les effets bénéfiques de cette intervention impliquent également la diminution de la douleur ressentie et la réduction de la réponse inflammatoire et du stress oxydatif induits par l'exercice (Bleakley et al. 2014). En ce sens, l'exposition à la cryothérapie peut contribuer à l'accélération de la récupération. Il s'avère que cette intervention réduit les dommages musculaires initiaux grâce à la diminution de certaines enzymes musculaires telles que la créatine kinase et le lactate déshydrogénase (Banfi et al. 2009; Wozniak et al. 2007). En outre, de nombreuses études scientifiques ont recommandé l'utilisation de la cryothérapie pour réduire l'inflammation secondaire grâce à une réduction du métabolisme musculaire, de la sensibilité des récepteurs et de la vitesse de la conduction nerveuse (Joseph T. Costello et al. 2015; Algafly et George 2007).

Figure 25 : *Cabine de cryothérapie (à gauche) et chambre de Cryothérapie corps entier (à droite) (Centre de Cryothérapie à Aix en Provence, France).*

Poches de glace :

Les poches de glace s'appliquent généralement sur les principales artères pour refroidir le corps entier (Wexler 2002). Le but de celles-ci est de refroidir le sang circulant dans les artères carotides, fémorales et axillaires en les plaçant sur le cou, l'aine et les aisselles (McDermott et al. 2009). Les poches de glace sont souvent utilisées pour traiter les sujets souffrant de troubles liés à la chaleur (crampe de chaleur, coup de chaleur...). Cependant, le refroidissement du corps entier d'un patient peut prendre une longue durée (environ 110 minutes) (Kielblock et al . 1986). Ceci s'explique par le faible taux de refroidissement de cette modalité qui ne représente que 0,03°C/ min (Kielblock et al . 1986).

De plus, les sportifs utilisent les poches de glace pour faciliter la récupération après un exercice induisant des dommages musculaires **(Figure 26)**. Il a été montré que le refroidissement local réduit significativement la douleur perçue 48 heures après la récupération à l'issue d'un exercice intense (Pointon et al. 2011). Cette diminution de la douleur peut s'expliquer par l'inhibition de la réponse des nocicepteurs (les récepteurs de la douleur) (Petrofsky et al. 2015).

Figure 26 : *Des joueurs américain, LeBron James (R) et Dwyane Wade (L), utilisent des poches de glace à l'issue d'une séance d'entraînement pendant le championnat du monde de basketball 2006 à Séoul, le 12 août 2006.*

4. Les modalités optimales de Post-cooling :

4.1. Immersion en eau froide :

a) La température d'immersion :

Aucune recommandation claire n'a été donnée concernant un protocole optimal pour l'immersion en eau froide. Les premières études se sont intéressées à l'étude de la température optimale du CWI. Dans un premier temps, des études sur l'animal (Magazanik et al. 1980) ont été mises en place pour comparer le taux de refroidissement de différentes températures d'immersion chez un modèle des chiens atteints d'un coup de chaleur. Les résultats de cette étude montrent un taux de refroidissement similaire en utilisant l'eau du robinet à 15-16°C (vitesse du transfert de chaleur : 0,23°C/min), l'eau froide à 10-11°C (vitesse du transfert de chaleur : 0,23°C / min) ou l'eau glacée à 1-3°C (vitesse du transfert de chaleur : 0,21°C/min). Néanmoins, cette étude (sur l'animal) ne peut pas être appliquée sur l'humain pour plusieurs raisons : telles que l'incapacité des chiens à perdre de la chaleur par évaporation (excepté par les voies aériennes et la langue), la présence d'une fourrure et un rapport de la surface cutanée/masse corporelle différent de ceux des humains.

Des études sur l'humain ont ensuite été mises en place pour évaluer le taux de refroidissement du CWI à diverses températures mais les résultats semblent controversés. Il a été montré que l'utilisation d'une CWI à une température très basse (2°C) dans un environnement chaud induit un refroidissement plus important que des CWI avec des

températures allant de 8 à 20°C (Proulx et al. 2003). Cependant, une autre étude a rapporté un taux de refroidissement similaire pour une CWI à une température de 5°C ou de 14°C (Clements et al. 2002). L'immersion en eau froide semble préférable à l'immersion en eau glacée, puisqu'elle est plus confortable pour les patients ou les athlètes. Quelques études viennent appuyer cette idée en signalant que les températures d'immersion allant de 12 °C à 15 °C sont suffisantes pour induire des effets positifs sur les marqueurs de récupération (Poppendieck et al. 2013). En effet, une température très basse (0-2°C) ne semble pas nécessaire pour faciliter la récupération. En somme, la température du CWI varie généralement de 9 à 15°C lorsqu'elle est utilisée à des fins de récupération et inférieure à 10°C pour la prise en charge des patients atteints d'un coup de chaleur (Nye et al. 2016).

b) La durée d'immersion :

La recherche d'un protocole optimal de CWI, en termes de durée et température, suscite récemment l'attention de plusieurs chercheurs. La durée moyenne du CWI dans la littérature scientifique est de 12,5 ± 5,6 min (Kwiecien et al. 2018), mais il n'y a pas de consensus sur la durée optimale du CWI dans le contexte de la récupération. La réactivation parasympathique est l'un des marqueurs de récupération les plus étudiés après l'utilisation du CWI. Dans ce cadre, l'effet des différents protocoles d'immersion, en terme de durée et de température, a été examiné (Almeida et al. 2016). Ces auteurs ont trouvé que 15 minutes de CWI à une température de 14°C est le meilleur protocole pour assurer une bonne restauration de l'activité nerveuse parasympathique.

Si le but de la récupération est de réduire la douleur musculaire, Machado et al. (Machado et al. 2016) stipulent que la durée optimale du CWI s'étend de 11 à 15 minutes avec une température d'immersion allant de 11 à 15°C. Glasgow et al. (Glasgow et al .2014) proposent néanmoins qu'une CWI de 10 minutes à 6°C est le protocole le plus efficace pour réduire les niveaux de la douleur musculaire au cours des premières 96 heures après l'exercice. D'autre part, si le but du CWI est de traiter des patients atteints de coup de chaleur, une durée de 10 minutes serait suffisante (Nye et al. 2016).

c) Le niveau d'immersion :

La CWI diffère selon la partie du corps à immerger, soit par une immersion du corps entier (Rowsell et al. 2011), soit d'une seule partie du corps (des jambes) (Crystal et al. 2013). Il a été montré que le temps nécessaire pour refroidir le corps est plus court en immergeant une grande partie du corps dans l'eau froide (Proulx et al .2003). D'autant plus, l'immersion d'une seule partie du corps (habituellement les jambes) ne refroidit pas le corps aussi efficacement que l'immersion du corps entier (Dermott et al. 2009). Cela peut s'expliquer par le fait que la pression hydrostatique augmente avec la profondeur d'immersion. Elle est donc plus importante avec l'immersion du corps entier et la zone de transfert thermique est également plus importante (Poppendieck et al. 2013). Dans ce cadre, une récente méta-analyse (Zhang et al. 2015) a examiné différents protocoles de CWI. Les auteurs ont conclu que la CWI avec une grande surface corporelle immergée à une température inférieure à 10°C fournit le taux de refroidissement le plus élevé dans un environnement chaud.

3.2. La cryothérapie :

a) Durée et température d'exposition à la cryothérapie :

Il existe une ambiguïté quant au protocole optimal de cryothérapie en termes de durée et de température. Très peu d'études ont comparé différentes durées d'exposition à la cryothérapie. Selfe et al (Selfe et al. 2014) ont montré que les meilleurs changements physiologiques (inflammation et oxygénation tissulaire) et perceptifs (confort thermique) ont été observé après 2 minutes d'exposition à la cryothérapie corps entier (CE) à -135 °C. Ces effets étaient supérieurs à ceux obtenus après une seule minute ou 3 minutes d'exposition. Il s'avère qu'une exposition de 3 minutes peut induire un inconfort thermique (Fonda et al .2014). Néanmoins cet inconfort semble disparaître après plusieurs expositions grâce à une adaptation à long terme (Smolander et al. 2004). D'autre part, les praticiens et les cliniciens utilisant une cryo-cabine (-130 à -170°C) n'ont pas besoin d'effectuer des séances de plus de 150 secondes car une durée plus longue n'influence pas plus les réponses physiologiques (Savic et al .2013), mais augmente l'inconfort thermique (Fonda et al .2014).

En ce qui concerne la température de l'exposition à la cryothérapie, actuellement, aucune chambre n'a la capacité de moduler la température d'exposition. Pour comparer les températures d'exposition, plusieurs chambres de cryothérapie/cryostimulation doivent être utilisées, ce qui n'est pas possible dans la plupart des études. Par contre, il est relativement simple d'examiner l'impact des durées d'exposition.

b) Type d'exposition : corps entier ou partiel

La cryothérapie corps entier (CE) et la cryothérapie à corps partiel (CP) sont les deux types d'exposition à la cryothérapie. Le CP est une exposition à l'air très froid dans une cabine (cryo-cabine) où la tête n'est pas exposée, elle est généralement utilisée chez les équipes sportives. La CE est souvent utilisé dans les centres de rééducation, où le sujet est entièrement exposé dans des chambres divisées en deux ou trois compartiments de températures différentes, généralement -10°C, -60°C et -110°C à -160°C (Bouzigon et al. 2016).

À notre connaissance, il n'y a qu'une seule étude qui compare les deux types d'exposition. Hausswirth et al (Hausswirth et al. 2013) ont montré que les deux types d'expositions réduisent la température cutanée, mais la CE induit une plus grande diminution par rapport à la CP. Cela a été expliqué par l'ouverture de la cryo-cabine à la température ambiante. Quant à la température tympanique, elle n'a été réduite qu'après la session de CE. De plus, la stimulation parasympathique était plus importante après la CE, ce qui n'était pas surprenant puisque cette réactivation est due en partie, soit à la diminution de la température tympanique enregistrée avec la CE , soit à la stimulation des récepteurs du froid localisés dans le visage. D'un point de vue pratique, l'utilisation de la CE permet d'exposer plusieurs personnes en même temps, ce qui réduit le temps d'attente des athlètes.

c) Nombre de sessions de cryothérapie :

Dans le domaine médical, les sessions de cryothérapie (CE et CP) impliquent au moins dix expositions de 3 minutes, une par jour pour induire un effet positif sur les paramètres physiques et psychologiques chez les patients atteints de polyarthrite rhumatoïde, de fibromyalgie, de spondylarthrite ankylosante ou de sclérose en plaques (Romain Bouzigon et al. 2016). Dans le domaine sportif, certains marqueurs de récupération sont positivement

influencés même à partir d'une seule exposition à la cryothérapie comme l'activité du système nerveux autonome (Hausswirth et al. 2013), la douleur perçue (Ferreira-Junior et al. 2015), la qualité du sommeil (Bouzigon et al. 2014) et le stress oxydatif (Lubkowska et al. 2008, 2009). Néanmoins, une récupération hématologique et immunologique complète ne peut être observée qu'à partir de 30 sessions de cryothérapie (Szygula et al. 2014).

Synthèse :

Immersion en eau froide :

- Des températures d'immersion allant de 9 °C à 15 °C sont suffisantes pour induire un impact positif sur les marqueurs de récupération.
- La durée moyenne de CWI dans la littérature est 12,5 ± 5,6 min.
- Une CWI de 11 à 15 minutes à une température allant de 11 à 15 °C facilite la gestion des douleurs musculaires.
- Une CWI de 10 minutes à 6 °C peut réduire la douleur musculaire au cours des premiers 96 h après l'exercice.
- Une CWI de 15 minutes à 14 °C ou une CWI de 5 minutes à 9 °C sont les protocoles les plus optimaux pour faciliter la réactivation de la fonction parasympathique.
- Le protocole le plus optimal de CWI pour traiter les personnes atteintes de coup de chaleur est une immersion moins de 10 minutes à moins de 10°C avec une large surface du corps immergée.
- L'immersion du corps entier assure un refroidissement plus rapide qu'une immersion partielle (seule partie du corps).

Cryothérapie/Cryostimulation

- Une exposition de deux minutes de CE à -135 °C induisent de meilleures réponses physiologiques et perceptives par rapport à d'autres expositions d'une minute ou trois minutes.
- Il n'y a pas besoin d'effectuer des expositions de plus de 150 s dans des cryo-cabines (-130 à -170 °C) pour améliorer les réponses thermiques et cardiovasculaires.
- La stimulation parasympathique est plus importante après la CE qu'après la CP.
- La CE réduit la température centrale et cutanée plus que la CP.
- Le protocole optimal chez les patients doit inclure au moins 10 expositions de CE de 3 minutes, une par jour.
- Une seule exposition à la CE ou la CP peut être suffisante pour induire un impact positif sur l'activité du système nerveux autonome, la douleur perçue, la qualité du sommeil et le stress oxydatif à l'issue d'un exercice physique.

5. L'effet de post-cooling sur les paramètres perceptifs :

De nombreuses études ont examiné l'effet du post-cooling sur des variables d'ordre subjectif et perceptif, tels que les DOMS, la fatigue perçue et la qualité du sommeil. Ces mesures donnent généralement des indications sur le ressenti de la personne et sa qualité de récupération.

5.1. Douleurs musculaires à apparition retardée (DOMS) :

La douleur est définie par l'Association internationale de l'étude de la douleur (IASP) comme « une expérience sensorielle et émotionnelle désagréable associée à une lésion tissulaire réelle ou potentielle ou décrite dans ces termes" (Merskey et Spear 1967). Un EIDM induit une rupture des fibres musculaires et une perturbation des structures musculaires intracellulaires et extracellulaires. Toutes ces altérations entraînent des douleurs musculaires à apparition retardée (DOMS) (Pearcey et al. 2015). Ces douleurs perçues créent une sensation d'inconfort qui augmente avec le temps avec un pic entre 24 à 72 heures après un exercice physique ou un entraînement. Ces douleurs diminuent ensuite (s'il n'y a pas un autre exercice ou entraînement) au cours des 5-7 jours suivants (Howatson et Van Someren 2008).

La perception des DOMS est probablement due à l'activation des afférences nociceptives des groupes musculaires III et IV (Ebbeling et Clarkson 1989). L'exposition au froid stimule le récepteur au froid et au menthol (TRPM8) localisés dans les fibres C et Aδ, qui sont les équivalents cutanés des afférences musculaires des groupes III et IV respectivement (Knowlton et al. 2013). Une fois activé, le TRPM8 intervient dans l'inhibition des sensations de douleurs (Knowlton et al. 2013). L'application du froid semble avoir un impact analgésique direct grâce à la production de noradrénaline (Leppäluoto et al. 2008) et à la réduction de la vitesse de conduction nerveuse sensorielle et motrice (Herrera et al. 2010), conduisant ainsi à la réduction de la sensation de douleur (Algafly et George 2007).

Il a été bien confirmé dans la littérature scientifique que le post-cooling appliqué directement après l'exercice améliore la récupération grâce à une réduction des DOMS de 24 à 96 heures après l'exercice physique (Hohenauer et al. 2015). Il a été montré que la CWI réduit la sévérité des DOMS jusqu'à 96 heures après un EIDM (Bleakley et al. 2012). Ce résultat positif a été expliqué par la capacité de la CWI à réduire les œdèmes musculaires induits par l'exercice (Wilcock et al . 2006).

L'effet de la cryothérapie sur la gestion des DOMS est controversé dans la littérature à cause d'une grande hétérogénéité des méthodes de cryostimulation utilisées. En effet, l'exposition peut être : dans une chambre froide ou dans une cryo-cabine où la tête n'est pas exposée ; juste ou 24 heures après l'exercice ; d'une température pouvant aller de -30 ° à -195 ° C; différente selon le nombre des expositions après l'effort. De plus, une grande hétérogénéité existe dans les protocoles des exercices choisis pour induire les DOMS. Certaines études examinant l'effet du CE (Vieira et al. 2015 ; Costello et al. 2015) ou du refroidissement local (Guilhem et al. 2013) sur la douleur musculaire n'ont rapporté aucun effet bénéfique sur la douleur musculaire.

Néanmoins, 80% des études scientifiques montrent que la douleur musculaire diminue suite à une seule exposition à la cryothérapie (Rose et al. 2017). En outre, la cryothérapie avec ses deux formes, CE (3 min à -140°C et -195 ° C pendant 6 jours consécutifs) (Fonda et Sarabon 2013) ou CP (une exposition de 3 minutes à -110 ° C) (Ferreira-Junior et al. 2015), réduit la douleur musculaire après un EIDM jusqu'à 72 heures après la récupération. En fait, la réduction des DOMS peut apparaitre dès la première exposition au froid, tandis qu'elle peut prendre 24 heures avec une récupération passive (Hausswirth et al. 2011). De nombreux travaux de synthèse ont récemment confirmé ce rôle bénéfique du post-cooling (Lombardi et

al. 2017; Dupuy et al. 2018). D'un point de vue pratique, la diminution de la douleur musculaire (induite par un EIDM) est obtenue à partir de 1 à 6 expositions de 3 minutes de CP ou CE à des températures allant de -110 °C à -195 °C. Néanmoins, ces expositions doivent être effectuées moins de 24 heures après la fin de l'exercice (Bouzigon et al. 2016).

5.2. La fatigue perçue:

Un état de fatigue peut s'installer à l'issue d'un exercice physique. Les niveaux de fatigue perçue peuvent être évalués à l'aide des échelles visuelles analogiques (Delextrat et al. 2013) ou des questionnaires (Carcano et al. 2010). Le post-cooling semble efficace pour réduire la perception de la fatigue dans les premières 24 heures de récupération (Hohenauer et al. 2015).

Très peu d'études ont évalué l'effet de la cryothérapie sur la fatigue perçue. Il a été montré qu'une exposition de 3 min à la CE (-110 °C) à l'issue d'un EIDM réduit la fatigue perçue (Hausswirth et al. 2011; Krüger et al. 2015). Néanmoins, le refroidissement local avec des poches de glace que ce soit après un EIDM (Tseng et al. 2013) ou un exercice de pliométrie intense (Hohenauer et al. 2016) augmente la sensation de la fatigue perçue lors de la période de récupération. Un refroidissement sévère peut induire une sensation d'inconfort et expliquer de cette manière une augmentation de la perception de la fatigue.

5.3. La qualité de sommeil :

a) Rôle du sommeil dans le processus de la récupération :

Le sommeil est une composante essentielle de la récupération grâce à ses effets réparateurs physiologiques et psychologiques (Pejovic et al. 2013; Dinges et al. 1997) et à son rôle indispensable dans la récupération mentale et physique de l'athlète. En effet, il existe un consensus général sur l'importance du sommeil pour le bien-être des athlètes et la diminution de la fatigue (Fullagar et al. 2015). Un sommeil de bonne qualité facilite le processus de récupération car le corps humain bénéficie de la régénération des tissus et de la synthèse des protéines grâce à la sécrétion de l'hormone de croissance et à l'élimination des déchets neurotoxiques pendant les différentes phases du sommeil (Adam et Oswald 1983). De plus, le sommeil favorise la récupération des fonctions cognitives liées à la concentration et à la mémoire (Martin et al. 2017). Ces rôles réparateurs du sommeil aident l'athlète à améliorer son sentiment de bien-être, sa performance et à réduire les risques de blessure. (HAUSSWIRTH 2013). En effet, l'athlète sera capable de maintenir sa lucidité, sa concentration, sa réactivité à un stimulus externe et une haute motivation durant les séances d'entraînement et les compétitions. Une diminution des fonctions psychomotrices a été rapportée après une seule nuit de sommeil réduit (Reilly et Edwards 2007). Il a également été montré qu'une restriction partielle du sommeil la veille d'une activité, induira une sécrétion des cytokines pro-inflammatoires après un exercice de sprints répétés effectué le lendemain (Abedelmalek et al. 2013). Egalement, une mauvaise qualité de sommeil peut être un indicateur possible de surentraînement (Lastella et al. 2018).

b) Evaluation de la qualité du sommeil :

Le sommeil peut être évalué de manière subjective et/ou objective.

Evaluation subjective :

De nombreux questionnaires ont été utilisés pour évaluer la qualité subjective de sommeil chez des patients (généralement ceux présentant un trouble psychiatrique ou respiratoire) ou des sujets sains. Parmi ces questionnaires d'auto-évaluation, on peut trouver celui de Spiegel (Spiegel 1982) qui consiste à accorder des scores (allant de 0 à 5) à 6 composantes en lien avec le délai d'endormissement, qualité de sommeil, durée de sommeil, réveils nocturnes, rêves et état de forme du matin.

Evaluation objective :

La polysomnographie est l'examen le plus robuste et complet pour quantifier et qualifier le sommeil. Il s'applique une nuit entière et consiste à enregistrer continuellement l'activité électrique cardiaque (ECG), cérébrale (EEC), musculaire (EMG) et d'autres mesures respiratoires et oculaires durant les cycles veille-sommeil (Battu 2013). Or, cette technique est très couteuse. Pour ce faire, l'actimétrie est une alternative fortement utilisée récemment dans les études visant à étudier le sommeil. L'accéléromètre fait référence à des dispositifs de type montre-informatisée basée sur un capteur d'accélération miniaturisé (Sadeh et al. 1995) qui traduit le mouvement physique (sur deux ou trois axes) en une représentation numérique. Ces valeurs numériques sont ensuite échantillonnées sur un intervalle prédéfini ("epoch": 1 minute) et stockées dans la mémoire interne (Sadeh et Acebo 2002). Les scores bruts d'activité (par exemple, dans des intervalles de 1 min) sont convertis en scores sommeil-éveil à l'aide d'algorithmes informatisés (Sadeh 2011). Le seuil moyen de 40 coups par intervalle a été utilisé pour faire la distinction entre les états de veille et de sommeil (Darwent et al. 2008). Les intervalles ('epoch') avec des scores inférieurs à ce seuil ont été classées en sommeil. Le début du sommeil a été déterminée par une période d'immobilité de 10 minutes consécutives (Vincent et al. 2016). Ce dispositif peut être attaché au poignet (ou à la cheville) d'un individu pour fournir en continue des données sur l'activité. Ce dispositif est un outil valide et fiable pour mesurer et qualifier le sommeil (Cole et al. 1992).

c) Effet du post-cooling sur la qualité du sommeil :

Généralement, les athlètes se couchent tard pendant les périodes des compétitions à cause de leurs calendriers chargés qui regroupent des entraînements, des réunions, des déplacements, des vols, la compétition elle-même, la récupération et les repas. De plus, le fait de voyager ou s'entraîner la nuit peut perturber les cycles normaux de sommeil-éveil des athlètes (Fullagar et al. 2015) et ainsi altérer la quantité et la qualité du sommeil. Les athlètes professionnels ont souvent des problèmes de sommeil qui nuisent à leur récupération et aussi à leurs performances. Ainsi, le maintien d'une bonne qualité de sommeil préoccupe les acteurs du domaine sportif.

Par ailleurs, le post-cooling semble bénéfique pour améliorer la qualité du sommeil (Schaal et al. 2015) et aider les athlètes à mieux supporter les charges d'entraînement. Il a été montré que l'exposition au froid peut améliorer la qualité du sommeil, en particulier pendant les phases d'augmentation de la charge de travail (Schaal et al. 2015). Dans ce cadre, il a été montré qu'une seule exposition de CP de 3 min (à -130°C) chez des joueurs professionnels de basket-ball assure une amélioration de 15% de la qualité du sommeil (Bouzigon et al.

2014). De même, des expositions répétées à la CE (14 expositions, une par jour) de 3 minutes à -110 ° C, chez des sportifs de haut niveau pendant une période d'entraînement intense associée à des symptômes de surentraînement (incluant une altération des réponses cardiaques et métaboliques et une détérioration de la quantité et de la qualité du sommeil), assure une bonne qualité de sommeil en préservant la quantité de sommeil et en limitant la latence du sommeil (estimée à l'aide d'accéléromètres tridimensionnels). De plus, la CWI quotidienne durant une semaine après l'entraînement chez des nageurs de très haut niveau améliore la qualité du sommeil (Haddad et al .2012).

Il manque jusqu'à présent des informations sur le lien entre l'exposition au froid (après l'exercice) et la qualité du sommeil. En se basant sur les travaux portant sur ce thème, nous pouvons conclure que le post-cooling favorise une bonne qualité et quantité de sommeil (un sommeil plus profond et plus calme) mais les mécanismes responsables de cette amélioration ne sont pas clairs à l'heure actuelle.

Synthèse :

DOMS:

- La CWI diminue les DOMS jusqu'à 96 heures après l'exercice. Ces effets positifs proviennent de l'effet combiné de la pression hydrostatique et de la vasoconstriction tissulaire induite par le froid.
- Les effets de la cryothérapie sur la gestion des DOMS sont controversés dans la littérature. Mais il est recommandé d'utiliser 1 à 6 expositions de 3 minutes de CP ou CE à des températures d'exposition allant de -110°C à -195 °C pour faciliter la gestion des DOMS, cet effet positif peut persister jusqu'à 72h après l'exercice. Cet effet analgésique de cryothérapie s'est expliqué par une stimulation de la sécrétion de la noradrénaline et par la réduction de la vitesse de conduction nerveuse sensorielle et motrice à l'issue d'une exposition au froid.

Fatigue perçue:

- La CWI et la CE semble efficace pour réduire la fatigue perçue jusqu'à 24 heures après l'exercice physique.
- Le refroidissement local (poches de glace) ne réduit pas la fatigue perçue.

Qualité du sommeil:

- Un sommeil de bonne qualité procure une sensation de bien-être chez l'athlète, améliorant ainsi sa performance et limitant le risque de blessure.
- Le post-cooling favorise une bonne qualité de sommeil en utilisant la CP (3 min à -135 °C), la CE (14 expositions de 3 minutes à -110°C une par jour) ou la CWI (5 min à 15 °C, une par jour pendant une semaine). Les mécanismes responsables à ces améliorations demeurent ambigus dans la littérature scientifique.

6. L'effet du post cooling sur les marqueurs des dommages musculaires et d'inflammation :

L'effet du refroidissement a également été étudié sur des variables d'ordre objectif tels que les marqueurs des dommages musculaires (créatine kinase et lactate déshydrogénase) et de l'inflammation (cytokines pro et anti-inflammatoires).

6.1. Marqueurs des lésions musculaires (paramètres biochimiques) : La créatine kinase (CK) et le lactate déshydrogénase (LDH) :

La créatine kinase (CK) et le lactate déshydrogénase (LDH) sont des enzymes sarcoplasmiques intracellulaires. La rupture des fibres musculaires induit une fuite de ces enzymes dans le sang, témoignant d'une lésion musculaire (Brancaccio et al. 2007; Banfi et al. 2010).

L'effet du post-cooling sur ces marqueurs de dommages musculaires n'est pas consistant dans la littérature scientifique. De nombreuses études ont montré que les différentes techniques de post-cooling telles que la CE (Russell et al. 2017 ; Ziemann et al. 2014), le refroidissement local (Pointon et al. 2011) et la CWI (Goodall et Howatson 2008) n'induisent pas de changements dans les marqueurs de dommages musculaires (CK, LDH) après un EIMD. Cela a été confirmé par deux méta-analyses examinant l'effet du post-cooling sur les marqueurs des dommages musculaires après un exercice physique intense (Hohenauer et al. 2015 ; Bleakley et al. 2012). Néanmoins, d'autres études ont rapporté une réduction des taux de CK et LDH chez des athlètes de haut niveau suite à l'utilisation du post-cooling. Une diminution de 35 à 40 % de CK et LDH a été observé chez des athlètes de très haut niveau après une exposition répétée de CE (Banfi et al. 2009 ; Wozniak et al. 2007). En se basant sur ces études, le post-cooling pourrait être un moyen efficace pour faciliter la récupération après une blessure musculaire et / ou des dommages associés à un entraînement physique intense. En fait, la réduction des dommages musculaires suite à l'application du post-cooling peut être expliquée par la capacité du froid à réduire le métabolisme cellulaire (Merrick et al. 1999) et la perméabilité des vaisseaux sanguins et lymphatiques (Leeder et al. 2012).

6.2. Marqueurs inflammatoires :

L'augmentation de la charge de travail pendant des phases d'entraînement intense provoque des lésions musculaires et une inflammation subséquente. Cet état inflammatoire se manifeste par une libération de cytokines pro-inflammatoires [facteur de nécrose tumorale (TNF)-α, interleukine (IL)-1β, interleukine (IL)-2 et interleukine (IL)-8] et de la protéine C-réactive (CRP). En réponse à ce phénomène, une libération des cytokines anti-inflammatoires se produit [l'antagoniste des récepteurs de l'interleukine-1 (IL-1ra) et cytokine anti-inflammatoire (IL-10)] (Chatzinikolaou et al. 2010).

Il s'avère que l'exposition au froid à l'issue d'un EIDM réduit les réactions inflammatoires, les spasmes musculaires et la douleur ressentie par le biais d'une vasoconstriction périphérique induite par le froid et une diminution relative du débit sanguin (Vaile et al. 2011). En outre, il a été rapporté que la CWI permet de réduire la réponse inflammatoire après un EIMD grâce à la vasoconstriction locale et la réduction de la perméabilité des vaisseaux sanguins, conduisant ainsi à une diminution de l'inflammation

aiguë (Murray et Cardinale 2015). Dans ce cadre, une étude récente a montré que 10 min de CWI à 10°C après un entraînement de résistance, réduit le nombre de cellules satellites et l'activité de la "kinase". Ces changements physiologiques se traduisent pratiquement par une diminution des gains de performance (force musculaire) (Roberts et al. 2015).

Dans la littérature scientifique, le CE a été souvent prescrit pour réduire la réponse inflammatoire dans le domaine médical ou sportif (Bouzigon et al. 2016). De nombreuses études utilisant cette intervention en tant que technique de récupération chez des athlètes de haut niveau après un exercice physique intense, montrent néanmoins qu'elle permet de limiter la réponse inflammatoire en réduisant le taux de sécrétion des cytokines pro-inflammatoires (IL-8, IL-2, IL-1beta) et en augmentant la production des cytokines anti-inflammatoires (IL-10, IL-1ra) (Ziemann et al. 2012 ; Pournot et al. 2011; Banfi et al. 2009). Ces auteurs constatent que l'exposition au froid après un EIDM facilite la récupération en réduisant la réponse inflammatoire. De plus, une exposition répétée au froid (jusqu'à 20 sessions de cryothérapie) induit des effets positifs sur les paramètres inflammatoires pouvant durer jusqu'à deux semaines (Lubkowska et al. 2011). En somme, le post-cooling pourrait être efficace pour réduire la réponse inflammatoire d'où sa prescription pour soulager la douleur et réduire l'inflammation chez les personnes ayant des problèmes musculo-squelettiques (Bouzigon et al. 2016).

7. Effet du post-cooling sur la performance :

L'effet du post-cooling sur la performance n'est pas clair en raison de la grande hétérogénéité des protocoles d'exercices utilisés et de la grande variété de tests entre les études.

7.1. Effet de la cryothérapie sur la récupération de la performance :

La plupart des études évaluant l'effet de la cryothérapie sur la récupération de la performance se concentrent sur les mesures de force. Prenons l'exemple d'une étude (Hausswirth et al. 2011) comparant l'effet de trois techniques de récupération (CE, Infrarouge Lointain : IL, et récupération passive : PAS) sur la récupération de la force maximale isométrique du quadriceps (MVC) chez des coureurs très entrainés. Les auteurs ont montré que les sessions de CE facilitent la récupération de la force maximale isométrique du quadriceps (MVC) après la première session de CE, alors que ce retour à la force maximale est plus lent avec les autres types de récupération **(Figure 27).**

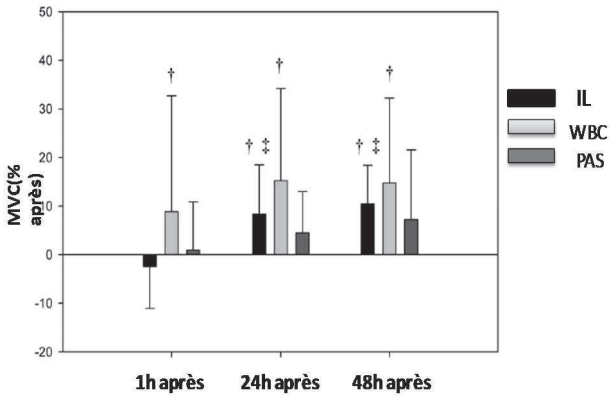


Figure 27 : *Force maximale volontaire (MVC) évaluée après les trois techniques de récupération (après 1h, après 24h, après 48h). † significativement différent de la valeur immédiatement après la récupération (p<0,05), ‡ significativement différent de après 1h (p<0.05), (Hausswirth et al. 2011).*

D'autres études plus récentes (Costello et al. 2015 ; Bongers et al .2017) rapportent une amélioration de la force maximale après utilisation de la cryothérapie, qui peut durer jusqu'à 120 heures. Dans le même contexte, une seule session de CP (3 minutes à - 110°C) améliore la récupération de la force musculaire excentrique entre 2 séances de musculation (Ferreira-Junior et al. 2014).

L'effet de la cryothérapie sur la récupération de la performance d'endurance est très peu étudié dans la littérature. Il a été observé qu'une seule session de CP (3 min à -110 °C), est suffisante pour améliorer le Tlim avec une durée d'environ 15 minutes (Krüger et al. 2015). Les améliorations observées peuvent s'expliquer par une meilleure oxygénation des muscles actifs (Hornery et al. 2005) et une réduction de la contrainte cardiovasculaire (fréquence cardiaque inférieure et volume d'éjection plus élevé) (Zalewski et al. 2014).

Cependant, il s'avère que l'exposition à la CE immédiatement après l'exercice physique ne facilite pas la récupération de la performance, peut-être à cause d'une diminution importante de la température musculaire (Vieira et al. 2015). De même, il a été montré que l'exposition au froid 24 heures après l'activité physique n'apporte aucun effet bénéfique sur la récupération de la performance (force maximale volontaire) (Costello et al. 2012).

7.2. Effet de la CWI sur la récupération de la performance :

De nombreuses études ont examiné l'effet de CWI sur la récupération de la performance, la plupart d'entre elles montrent que cette technique facilite la récupération de la performance (Peiffer et al. 2010 ; Rowsell et al. 2011).

L'utilisation de CWI à très basses températures n'est pas nécessaire pour faciliter la récupération de la performance. Il a été montré que l'immersion à une température de 14°C améliore la performance d'endurance (Yeargin et al. 2006). Cet effet bénéfique a été observé indépendamment du type d'immersion (intermittent: 5 min à 10, 15 et 20°C ou continue :15 min à 20 °C (Vaile et al. 2008). En ce qui concerne la récupération de la force, la CWI n'était pas efficace à cet égard mais des petites amélioration ont été signalées pour la restauration de la puissance musculaire (Leeder et al. 2012; Bleakley et al. 2012).

D'un point de vue pratique, 5 à 15 minutes d'immersion à une température de **10 à 15°C** a un impact positif sur la restauration de la performance (Versey et al. 2013). La récupération de la performance peut être également influencée par le **"timing"** de la CWI, la plupart des études mettent en place cette intervention dans les 30 minutes qui suivent l'exercice. À notre connaissance, une seule étude (Brophy-Williams et al .2011) a examiné l'influence du moment de l'administration de la CWI sur la récupération de la performance (immédiatement et 3h après l'exercice), les auteurs n'ont pas signalé d'effet positif sur la récupération de la performance lorsque l'immersion est administrée immédiatement après l'exercice. En ce qui concerne le nombre des sessions, il a été rapporté que les sessions répétées de la CWI sont plus efficaces qu'une seule session sur la récupération de la performance, peut-être en raison de la fatigue accumulée lors de multiples exercices (Rowsell et al. 2011).

Les effets positifs de CWI sur la récupération de la performance ont été rapportés pour des épreuves de cyclisme, de course, d'escalade, de saut vertical et de force (Versey et

al.2013), et peuvent durer de quelques minutes à quelques jours. Un travail de synthèse (méta-analyse) (Poppendieck et al. 2013) a montré que la CWI (2,9%, g = 0,34) et l'exposition à la cryothérapie (3,8%, g = 0,25) ont un impact positif sur la récupération de la performance. Cependant, cette étude a suggéré un effet important du post-cooling sur la capacité à conserver la performance du sprint mais des effets beaucoup plus faibles pour des performances d'endurance ou de force.

Synthèse :

Marqueurs de dommages musculaires

- Les effets du post-cooling sur les marqueurs des lésions musculaires (CK, LDH) ne sont pas consistants dans la littérature scientifique.

Marqueurs inflammatoires

- L'exposition répétée à la WBC (1 à 2 expositions / jour, pendant 4 à 5 jours) réduit l'inflammation induite par l'EIMD en augmentant les cytokines anti-inflammatoires (IL1-ra, IL-10) et en diminuant les cytokines pro-inflammatoire (TNF-a, IL-lß, IL-2, IL-8) et CRP.
- Les effets positifs de WBC sur la réponse inflammatoire peuvent apparaitre dès la première heure de l'exposition et durer jusqu'à 2 semaines (après 20 sessions de WBC).
- Le CWI réduit la réponse inflammatoire aiguë grâce à l'effet combiné de la vasoconstriction locale et de la pression hydrostatique.
- Le post-cooling réduit les niveaux de CRP jusqu'à 48h après l'exercice physique.

La performance

Cryothérapie

En conclusion concernant l'effet de la cryothérapie sur la récupération de la performance, les résultats sont contrastés :

- Un certain nombre de travaux indiquent que l'exposition à la cryothérapie immédiatement après l'exercice physique est inefficace pour récupérer au niveau de la performance. De même, une exposition 24 heures après l'exercice ne semble pas efficace pour restaurer la force
- Une autre série de travaux indiquent que l'exposition à la cryothérapie permet de restaurer la force musculaire, il a été montré que ces effets positifs peuvent persister jusqu'à 120h après l'exposition. De même, la cryothérapie améliorerait la performance d'endurance grâce à une meilleure oxygénation musculaire et une réduction du stress cardiovasculaire.

Immersion en eau froide

- L'immersion en eau froide facilite la restauration des performances lors des exercices de cyclisme, de course, d'escalade, de saut vertical et de force. Ces avantages peuvent durer de quelques minutes à quelques jours.
- Une CWI, d'une durée allant de 5 à 15 minutes à une température de 10 à 15°C, administrée 30 minutes après l'exercice physique, induit une récupération optimale de la performance.
- Une série de CWI après un exercice semblerait néanmoins apporter des bénéfices supplémentaires sur la restauration de la performance qu'une seule CWI.

8. Les réponses physiologiques au "Post-cooling"

8.1. Les réponses cardiovasculaires :

L'exposition au froid induit une vasoconstriction périphérique, qui à son tour entraîne une augmentation du volume sanguin central (Costello et al. 2015). Cela favorise la régulation de la fonction cardio-vasculaire, à l'issue de l'exercice physique, grâce à une augmentation du volume du retour veineux, de la pré-charge cardiaque et du volume d'éjection systolique (Maw et al . 2000). Le post-cooling permet également une diminution de la fréquence cardiaque (immersion en eau froide) (Roberts, Muthalib, et al. 2015). De surcroît, l'augmentation du volume sanguin central grâce au post-cooling améliorerait la capacité de l'athlète à éliminer les déchets métaboliques après un exercice physique intense, facilitant ainsi sa récupération post-effort (Bongers et al. 2017).

La vasoconstriction périphérique induite par le froid et l'augmentation du volume sanguin central permet ensemble une meilleure perfusion musculaire, d'où une meilleure oxygénation musculaire (Roberts et al. 2015). Une étude récente a montré que le volume sanguin musculaire et le temps de ré-oxygénation musculaire augmentent de manière significative après une session de CWI (Roberts et al. 2015).

En somme, le post-cooling induit une réduction de FS cutanée et une augmentation du volume sanguin central (VSC), conduisant ainsi à une réduction de stress cardiovasculaire (diminution de la fréquence cardiaque et augmentation de volume d'éjection systolique (VES) et un meilleur apport d'oxygène et du substrat aux muscles (Ihsan et al. 2016).

8.2. Les réponses métaboliques :

Le EIDM induit un stress métabolique (augmentation de la demande d'énergie pour réparer les dommages causés par l'exercice physique) (White et Wells 2013) et une production accrue d'énergie mitochondriale, contribuant ainsi de manière significative à la production de RLO (Debold 2012). Il s'avère que l'exposition au froid après l'exercice physique entraîne une diminution de la température musculaire, qui pourrait réduire le métabolisme musculaire et la production d'énergie mitochondriale. En effet, ces changements peuvent limiter la production de RLO et limiter ainsi le stress oxydatif et les lésions musculaires (White et Wells 2013).

En outre, certains travaux ont investigué l'effet du post-cooling sur le stress oxydatif. Il a été rapporté que le CE (Mila-Kierzenkowska et al. 2009) ou le refroidissement local (Yanagisawa et al. 2003) atténue significativement le stress oxydatif chez les sportifs de haut niveau après un exercice intense. L'effet antioxydant du post-cooling a été expliqué par la grande capacité du froid à stimuler l'activité des enzymes antioxydantes telles que la superoxyde dismutase et la catalase (Dugué et al. 2005; Lubkowska et al. 2008; Lubkowska et al. 2012). D'autres réponses métaboliques de l'exposition au froid après l'exercice physique ont été mises en évidence telle que la stimulation de thermogenèse (ex. une exposition CE stimule la sécrétion de l'irisine, une myokine qui agit au niveau des tissus adipeux et stimule la thermogenèse (Lombardi et al. 2017).

En ce qui concerne l'accumulation des métabolites à l'issue d'un exercice physique intense, il a été montré que le post-cooling facilite le transport de ces métabolites musculaires

vers la circulation sanguine grâce à la vasoconstriction cutanée induite par le froid (Ihsan et al. 2016). Le transfert de fluides des espaces intracellulaires aux espaces extracellulaires provoque l'augmentation du gradient osmotique (intracellulaire-extracellulaire), facilitant ainsi l'efflux des métabolites de l'espace intracellulaire vers la circulation périphérique (Stocks et al. 2004). En ce sens, le post-cooling facilite la récupération en stimulant l'efflux des déchets métaboliques (Bongers et al . 2017).

8.3. Les réponses du système nerveux autonome

Les exercices physiques intenses entraînent généralement une augmentation de l'activité sympathique qui se manifeste par une augmentation de la fréquence cardiaque et une diminution de la variabilité de la fréquence cardiaque. La réactivation parasympathique est actuellement considérée comme un indicateur important de la récupération (Bieuzen et al. 2015). En effet, les mesures de la variabilité de la fréquence cardiaque (VFC) ont été souvent utilisées pour caractériser la balance du système nerveux autonome à la suite d'un exercice physique (Stanley et al. 2014).

L'exposition au froid permet d'augmenter le VSC grâce à la vasoconstriction périphérique induite par le froid et la redirection du sang de la périphérie vers le centre du corps (Mourot et al. 2008). Cette augmentation du VSC entraine une élévation du débit cardiaque et de la pression artérielle et ainsi une stimulation de l'activité des barorécepteurs artériels et cardio-pulmonaires (Zalewski et al. 2014). Cette série d'évènements provoque une réduction de l'activité nerveuse sympathique et une augmentation de l'activité parasympathique (Pump et al. 2001; Zalewski et al. 2013).

L'effet du post-cooling sur l'activité du système nerveux autonome est généralement examiné à travers l'évolution des paramètres de la VFC. Les techniques du post-cooling telles que la CWI (5min à 9-15°C) (Stanley et al. 2012; Choo et al. 2018) ou l'exposition à la cryothérapie (Hausswirth et al. 2013; Schaal et al. 2012) augmente significativement l'activité parasympathique à travers une augmentation des indices de VFC (principalement les valeurs de racine carrée des différences moyennes de l'intervalle RR (RMSSD) et l'énergie spectrale des hautes fréquences (HF). En outre, il a été souligné qu'une seule session de cryothérapie de 2 ou 3 min à -110 °C, après une séance d'entraînement chez des sujets entrainés (Schaal et al. 2012) ou non entrainés (Westerlund et al. 2006), est suffisante pour augmenter les indices de VFC (RMSSD : +78% ; HF : +296%), reflétant ainsi une meilleure activation parasympathique. Cependant, l'exposition répétée au froid (plus de 3 mois avec 3 expositions de CE par semaine) provoque une diminution de l'activité parasympathique, peut-être en raison d'une adaptation qui se met en place (Westerlund et al. 2006).

8.4. Les réponses immunitaires :

La vasoconstriction induite par le post-cooling et la diminution de la température musculaire réduisent ensemble la perméabilité cellulaire, lymphatique et capillaire, diminuant ainsi la diffusion du liquide dans l'espace interstitiel et la formation des œdèmes (Leeder et al. 2012; Ascensao et al. 2011), expliquant en partie, l'atténuation de la réponse inflammatoire aiguë (White et Wells 2013; Ihsan et al. 2013).

De plus, la réduction de l'inflammation contribue à la diminution des douleurs musculaires à apparition retardée (DOMS) (Cheung et al. 2003). L'aspect anti-inflammatoire du post-cooling s'explique dans la littérature par une augmentation des cytokines anti-inflammatoires et une diminution des cytokines pro-inflammatoires (Banfi et al. 2010). Il a été suggéré que les effets anti-inflammatoires de la CE peuvent être liés à la stabilisation de la membrane lysosomale avec une inhibition conséquente des enzymes libérées (Stanek et al. 2010). Cependant, cet effet a été observé après plusieurs expositions répétées de CE et non après une seule exposition (Dugué et al. 2005; Lubkowska et al. 2009).

En somme, le post-cooling réduit l'inflammation induite par l'exercice grâce à la réduction du métabolisme musculaire, de l'activité enzymatique, de la sensibilité des récepteurs et de la vitesse de conduction nerveuse (Algafly et George 2007) . Ce rôle anti-inflammatoire du post-cooling facilite la récupération en limitant les dommages musculaires induits par l'exercice.

Synthèse :

Les principales réponses physiologiques au post-cooling sont résumées dans la figure présentée ci-dessous :

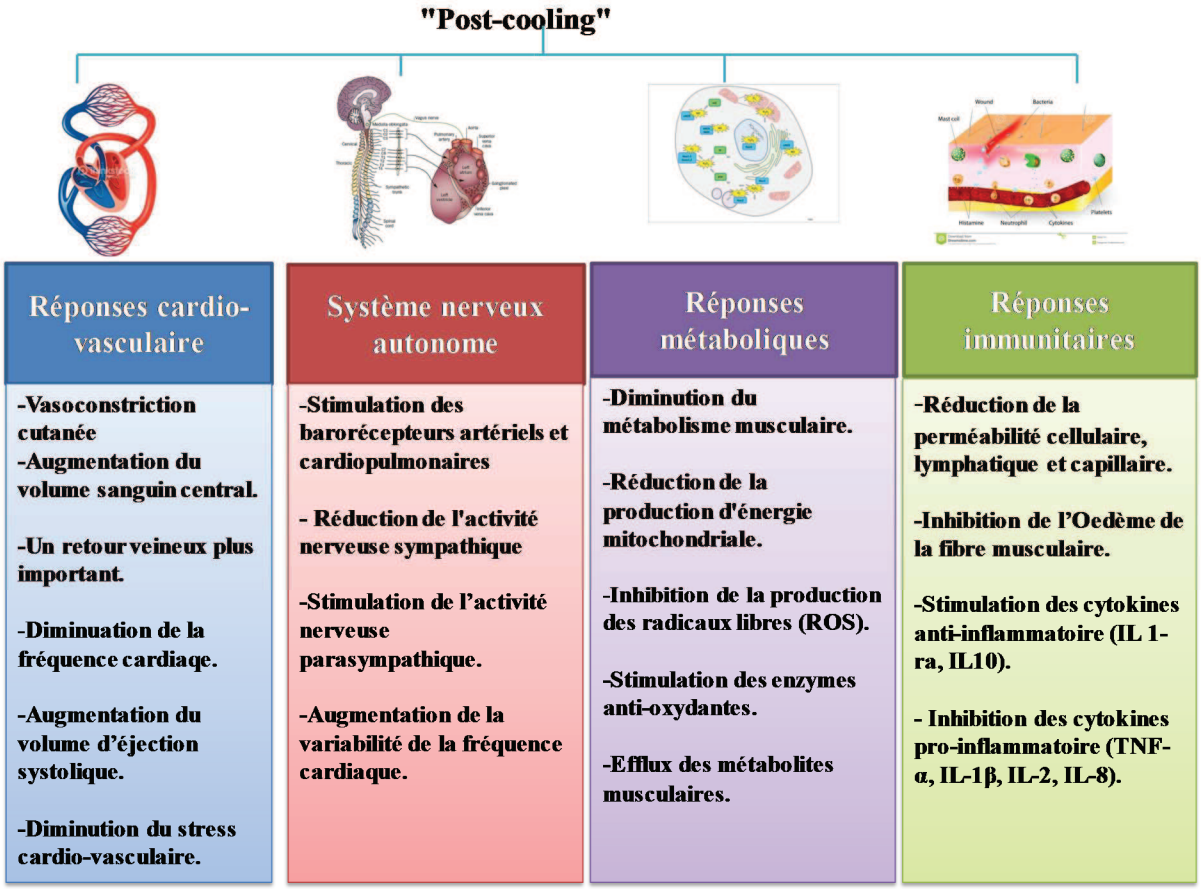


Figure 28 : *Résumé des réponses physiologiques au "Post-cooling"*

9. Les considérations pratiques du post-cooling :

Les contraintes psychologiques et physiques sont élevées chez l'athlète professionnel tels que les compétitions, les médias, les spectateurs et les exigences de performance (de l'équipe et des sponsors). En effet, une récupération appropriée est indispensable pour optimiser sa performance et réussir son entraînement. L'immersion dans l'eau froide est l'une des interventions de post-cooling les plus utilisées dans les jours qui suivent un exercice intermittent ou un match de football (Nédélec et al. 2013). Une enquête sur les stratégies de récupération les plus utilisées chez les équipes de football professionnelles a révélé que l'immersion en eau froide est utilisée par 88% des équipes de football professionnelles françaises (Nédélec et al. 2013).

Le post-cooling semble utile pour retrouver, le plus rapidement possible, le niveau de performance initial et réduire le processus inflammatoire induit par un exercice physique intense. Il a été montré que 5 à 15 min de CWI à une température de 10 à 15°C, administrée 30 minutes après l'exercice, est le protocole optimal pour faciliter la récupération (Versey et al. 2013).

Certains marqueurs de récupération sont positivement influencés par une seule exposition de CE, comme l'activité du système nerveux autonome (Hausswirth et al. 2013), la douleur perçue (J. B. Ferreira-Junior et al. 2015), la qualité du sommeil (Bouzigon et al. 2014) et le stress oxydatif (Lubkowska et al. 2008, 2009).

10. Les limites de l'utilisation du "post-cooling"

L'utilisation du post-cooling peut induire certains effets indésirables. Par exemple, la CWI réduit le flux sanguin musculaire, ce qui peut ralentir la resynthèse du glycogène musculaire après l'exercice physique (Cheng et al. 2017). De plus, une immersion à une très basse température (< 0°C) peut provoquer, dans certains cas, une arythmie cardiaque ou une perte de conscience et/ ou une hyperventilation (Mantoni et al. 2006). Il est donc conseillé de ne pas immerger le corps humain à très basses températures en particulier pour ceux qui ne sont pas habitués au CWI (Bleakley et Davison 2009).

Par ailleurs, l'immersion régulière dans l'eau froide peut réduire les adaptations induites par l'exercice. Dans ce cadre, une étude (Yamane et al. 2006) a comparé les effets de l'entraînement, entre une jambe et un bras de sujets immergés dans l'eau froide tandis que l'autre jambe et l'autre bras servant de témoin, après chaque séance d'entraînement (entraînement d'endurance et de musculation 3 à 4 fois par semaine pendant 4 à 6 semaines). Les effets d'entraînement étaient trois fois plus élevés dans le groupe témoin par rapport au groupe de CWI, y compris des augmentations du diamètre de l'artère fémorale dans le groupe témoin, mais pas dans le groupe froid. L'immersion régulière en eau froide peut réduire aussi les performances dans les tests de sprints répétés chez des joueurs de rugby (Higgins et al. 2011).

En effet, il semble clair que nous devons périodiser et programmer l'utilisation du froid en fonction des objectifs de l'entraînement. C'est-à-dire que dans une période où nous cherchons à créer des adaptations à court ou à long terme pour les athlètes, l'utilisation du 'cooling' ne semble pas être la technique optimale de récupération. Néanmoins, au moment

où les athlètes font face à plusieurs compétitions ou entraînements dans la semaine comme la période des championnats du monde, l'utilisation du froid est bénéfique pour réduire les dommages musculaires grâce à son effet analgésique et anti-inflammatoire.

L'utilisation de la cryothérapie/cryostimulation peut avoir certaines limites incontournables. Ce type d'intervention n'est pas recommandé chez les personnes ayant une hypertension artérielle en raison de l'augmentation de la pression artérielle systolique après l'exposition à la cryothérapie (Lubkowska et Szygu\la 2010). Elle n'est pas recommandée aussi chez les patients présentant une maladie coronarienne, une arythmie cardiaque, des troubles circulatoires, un phénomène de Raynaud (doigts blancs), des allergies au froid ou une maladie pulmonaire (Westerlund 2009; C. M. Bleakley et al. 2014). Ces contre-indications doivent être considérées avant l'exposition au froid pour protéger la santé des athlètes ou des patients participants à cette intervention. Dans cette perspective, deux études de cas récentes, rapportent que la CE ne représente pas un traitement sans risque. La première étude a montré qu'un homme de 63 ans souffrait d'une amnésie globale transitoire, qui a duré jusqu'à 24 heures, après une session de CE (Carrard et al. 2017). La deuxième étude (Cámara-Lemarroy et al. 2017) a présenté le cas d'un patient de 56 ans ayant développé une dissection aortique abdominale après 15 sessions de CE (3 minutes par séance, -150 à -160 ° C). Ce patient a souffert d'une douleur abdominale à chaque exposition au froid. Il s'ajoute à cela d'autres limites de sécurité et de coût, en particulier pour la CP, car les sujets sont en contact direct avec l'azote qui est un gaz dangereux et cher (Bouzigon et al. 2016).

Le post-cooling peut perturber transitoirement les performances musculaires de quelques minutes à quelques heures après l'exposition au froid (Vieira et al. 2013; Crowe et al. 2007). Par exemple, Vieira et al (Vieira et al. 2013) ont observé que le refroidissement affecte différemment la production de la force isométrique et isocinétique. Ils ont trouvé une amélioration de la force isométrique, mais une diminution de la force isocinétique (concentrique). De plus, Dewhurst et al. (Dewhurst et al. 2010) ont constaté une diminution de la force isocinétique immédiatement après un refroidissement local des muscles. En ce sens, si l'exercice est effectué immédiatement après l'application du froid (on n'est plus dans le cadre du post cooling !), les performances physiques peuvent être diminuées, en particulier dans les exercices de haute intensité (Vieira et al. 2015). En effet, le sujet doit laisser suffisamment du temps pour réchauffer les tissus musculaires avant d'entamer l'exercice physique suivant.

D'autres limites du post-cooling peuvent être signalées telles que les contraintes logistiques (transport des bains d'eau et l'accessibilité des sources d'eau, accès à une CE ou CP) ou l'inconfort thermique exprimé par certains athlètes face à une exposition au froid (Clifford et al. 2017).

11. Conclusion : (chapitre 2) résumé des facteurs influençant le Post-cooling et de ses effets sur les paramètres subjectifs et objectifs :

Un exercice physique inhabituel et/ou de haute intensité induit des dommages musculaires qui peuvent causer des douleurs musculaires et altérer la performance physique. Programmer une récupération appropriée pour pallier à ces problèmes et faciliter les adaptations physiologiques semble pertinent. L'utilisation du froid pendant la récupération, correspond au "post-cooling", et constitue l'une des techniques de récupération les plus souvent utilisées telles que l'immersion en eau froide, l'exposition à l'air très froid (la cryostimulation/ cryothérapie) et le refroidissement local (poches de glace).

Une recommandation claire concernant les protocoles optimaux de post-cooling (l'immersion en eau froide ou la cryostimulation) ne peut être donnée jusqu'à présent au regard du vaste panel des protocoles utilisés en termes de température, durée ou nombre d'exposition. Dans ce chapitre, nous avons détaillé les protocoles optimaux du post-cooling présentés dans la littérature scientifique. Il a été souligné que le post-cooling a un impact positif sur les paramètres d'ordre subjectif tel que la perception de la douleur, de la fatigue musculaire et de la qualité du sommeil, probablement grâce à l'effet analgésique du froid et son rôle prépondérant dans la réduction des dommages musculaires. De plus, il s'avère que le post-cooling a un impact positif sur les paramètres inflammatoires (cytokines pro et anti-inflammatoires), tandis que son effet sur d'autres marqueurs de dommages musculaires tels que la CK et le LDH n'est pas clair. En ce qui concerne la performance physique, très peu d'études on examiné l'efficacité du post-cooling sur ce paramètre mais un effet significatif du post-cooling sur la capacité à conserver la performance a été souligné.

Les réponses physiologiques au post-cooling, impliquant les réponses cardio-vasculaires, cérébrales, métaboliques et immunitaires, expliquent en partie les avantages du post-cooling. D'un point de vue pratique, le post-cooling semble utile pour retrouver le plus rapidement possible le niveau de performance initial et réduire la réponse inflammatoire induite par un exercice physique intense. Néanmoins, une utilisation excessive du post-cooling peut réduire les adaptations physiologiques induites par l'exercice. Il s'ajoute à cela d'autres limites telles que le manque de sécurité lorsque les sujets se trouvent en contact direct avec l'azote dans une cabine de cryostimulation/cryothérapie. Les facteurs influençant l'efficacité du post-cooling, les réponses physiologiques et ses effets sur les paramètres objectifs et subjectifs sont résumés dans la figure présentée ci-dessous :

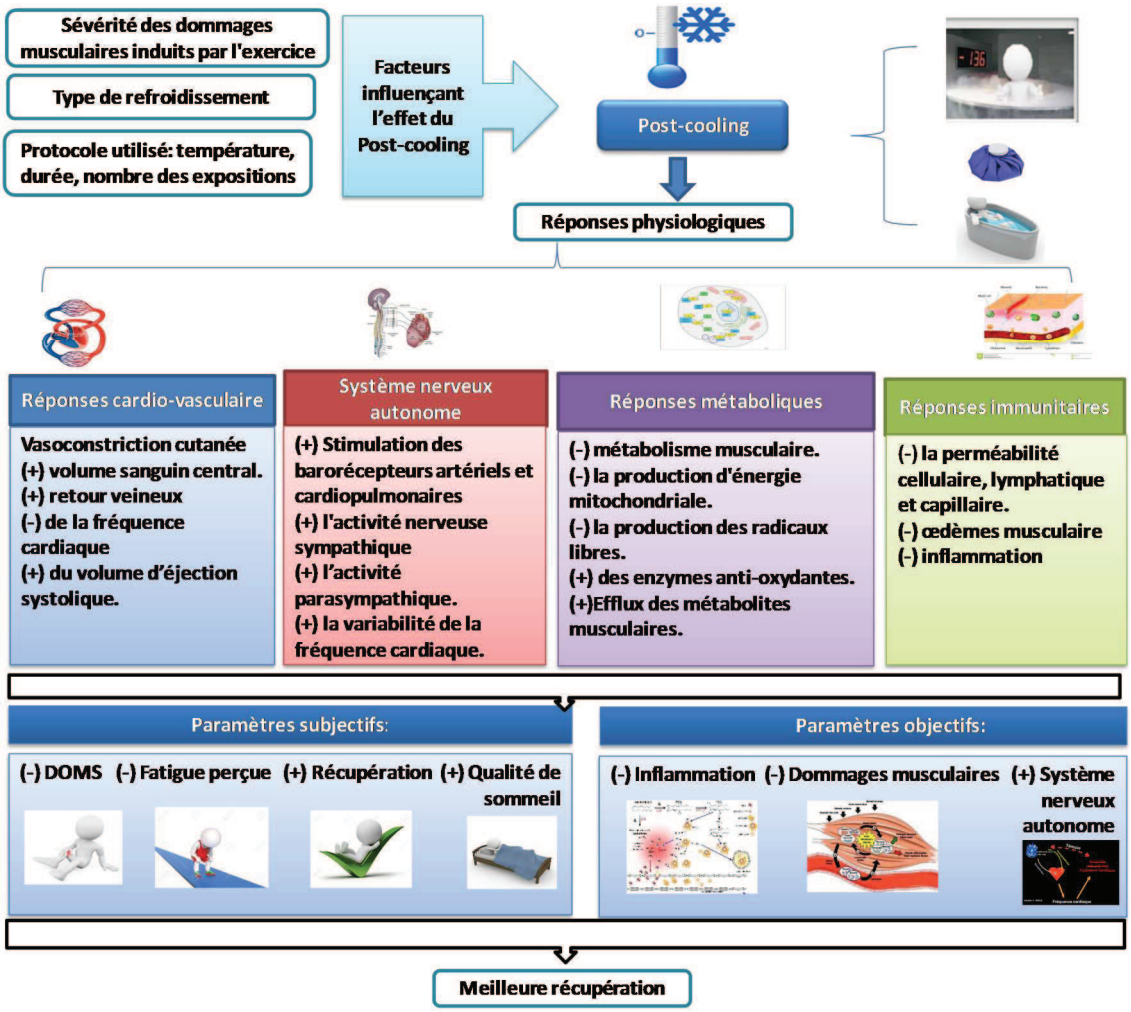


Figure 29 *: Résumé des facteurs influençant l'efficacité du post-cooling, ses effets sur les réponses physiologiques et sur les paramètres objectifs et subjectifs.*

Chapitre 3

La présentation des travaux de thèse s'inscrit dans le format de présentation « thèse par articles ». Après les objectifs et les hypothèses, nous présenterons les méthodes utilisées. Les études sont ensuite présentées en résumé en français puis in extenso soit avec la copie de l'article publié, soit avec le manuscrit de l'article en anglais.

1. Objectif et Hypothèses :

1.1. Objectifs :

Cette thèse vise à étudier l'impact de l'exposition au froid dans le contexte de l'exercice physique (per-cooling) et de la récupération (post-cooling) sur des variables physiologiques, physiques et perceptives. Les objectifs de ce travail sont les suivants :

Le Per-cooling (Etude 1, 2 et 3)

✓ Etudier l'effet du per-cooling sur la performance physique (aérobie et anaérobie) et investiguer l'impact de la technique utilisée et /ou la partie du corps refroidie sur la performance. Ce travail est une revue systématique accompagnée de méta-analyses.

✓ Examiner l'effet du port d'un nouveau système de refroidissement, lors d'un exercice sous-maximal, sur les réponses physiologique (fréquence cardiaque, échanges gazeux, température cutanée et oxygénation cérébrale et musculaire) et perceptives dans une condition thermo-neutre (22°C, 25 % d'humidité) et dans une condition chaude et humide (30°C, 60 % d'humidité). Ce travail est un travail expérimental.

Le Post-cooling (Etude 4,5 et 6)

✓ Comparer l'effet des différentes techniques de récupération y compris le post-cooling sur la gestion des DOMS, de la fatigue perçue et des marqueurs de dommages musculaires et d'inflammation. Ce travail est une revue systématique accompagnée de méta-analyses.

✓ Examiner l'effet de la cryostimulation corps partiel sur la qualité de sommeil de joueurs de football professionnels et d'identifier le protocole optimal en termes de durée d'exposition. Ce travail est un travail expérimental.

✓ Etudier l'effet de la cryothérapie corps entier (3 min à -50°C avec un système de ventilation) effectué proche de l'heure de coucher, sur la qualité de sommeil et l'activité du système nerveux autonome cardiaque après un exercice physique vigoureux chez des sujets sains et actifs. Ce travail est un travail expérimental.

1.2. Hypothèses :

✓ L'utilisation du per-cooling permettrait d'améliorer la performance quel que soit le type d'exercice effectué, mais les gains de performance devraient être plus importants lorsque le refroidissement est appliqué sur une grande surface du corps.

✓ Le port du gilet refroidissant permettrait un meilleur confort thermique et une baisse du stress physiologique (les réponses cardiaques, ventilatoires et métaboliques moins contraignantes).

✓ Le post-cooling accélérerait la gestion des DOMS, de la fatigue perçue et de l'inflammation.

✓ 3 minutes d'exposition à la cryothérapie permettraient une meilleure qualité de sommeil et une stimulation plus importante de la fonction parasympathique cardiaque.

2. Méthodes et Mesures :

2.1. Méthodologie des travaux de méta-analyse :

Pour étudier les effets du « cooling » dans le contexte de l'exercice physique et de la récupération, il était intéressant de synthétiser les résultats existant dans la littérature scientifique à travers deux travaux de méta-analyse. La première porte sur l'effet du per-cooling sur la performance physique (aérobie et anaérobie) et la deuxième vise à comparer l'effet des différentes techniques de récupération y compris le froid (post-cooling) sur la gestion des DOMS, de la fatigue perçue, des dommages musculaires et de l'inflammation. La méthode des deux méta-analyses est la même, elle comprend les étapes suivantes :

a) Recherche bibliographique :

La recherche bibliographique a été effectuée à l'aide de mots-clés liés au thème de chaque étude.

❖ **Etude du per-cooling** :

Mots-clés utilisés: ("Cooling" or "Cooling during exercise" or "per-cooling" or "body cooling" or "mid cooling" or "whole body cooling" or "face cooling" or "head cooling" or "hand cooling" or "neck cooling" or "internal cooling") and ("exercise" or "aerobic performance" or "endurance" or "time trial" or "time to exhaustion" or "power output" or "anaerobic performance" or "sprint" or "speed" or "distance" or "jump" or "maximal voluntary contraction" or "strength").

❖ **Etude du post-cooling:**

Mots-clés utilisés: ("recovery" or "active recovery" or "cooling" or "massage" or "compression garment" or "electrostimulation" or "stretching" or "immersion" or "cryotherapy") and ("Delayed Onset Muscle Soreness (DOMS)" or "perceived fatigue" or "Creatine Kinase (CK)" or "C-Reactive Protein (CRP)" or "Interleukin-6 (IL6)") and ("After exercise" or post exercise").

b) Les critères d'inclusion et d'exclusion :

Après avoir identifié les études dans les bases de données (PubMed, Embase, Web of Science) et supprimé les doublons, une sélection a été faite en se basant sur les titres et les résumés des publications. Ensuite, l'admissibilité de l'étude a été évalué sur le texte intégral. Si d'autres études apparaissent dans la liste des références et répondaient bien aux critères d'inclusion, elles peuvent également être incluses. Si ce n'est pas le cas elle sera exclue.

❖ **Etude du per-cooling** :

Les études incluses sont des travaux randomisés, contrôlés et menés chez l'humain, mettant en place un exercice physique avec des détails suffisants sur le type, la durée et l'intensité. Ces études doivent également fournir des mesures valables de performance ; une intervention de refroidissement appliquée au cours de l'exercice et des détails sur la technique et le site d'application du froid. Les critères d'exclusion sont détaillés dans un organigramme présenté ci-dessous :

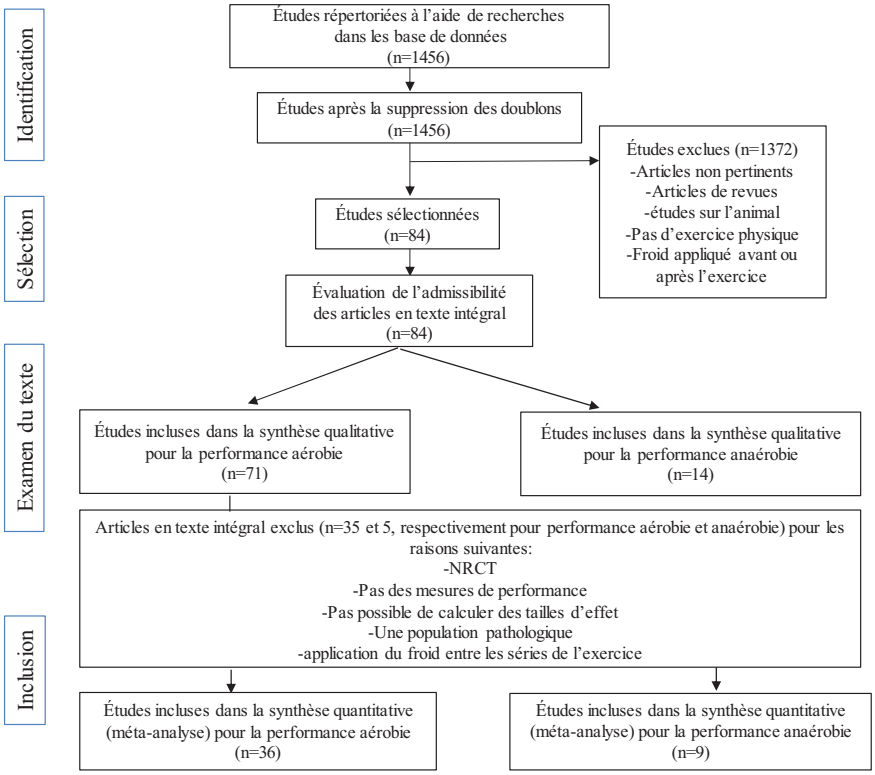


Figure 30 : *Organigramme du processus d'inclusion des études du per-cooling. NRCT : les études qui comprennent pas un groupe contrôle*

❖ **Etude du Post-cooling** :

Les études incluses sont des travaux randomisés contrôlés et menées chez l'humain. Ils mettent en place un exercice physique suivi d'une récupération avec des détails sur la durée et l'intensité de l'exercice ainsi que la modalité et le moment de l'utilisation de la récupération. Les études doivent comporter des mesures valides de DOMS, de fatigue et des marqueurs des dommages musculaires et d'inflammation. Elles fournissent également le nombre de participants et toutes les données nécessaires pour calculer les tailles d'effets. Les critères d'exclusion sont détaillés dans un organigramme présenté ci-dessous :

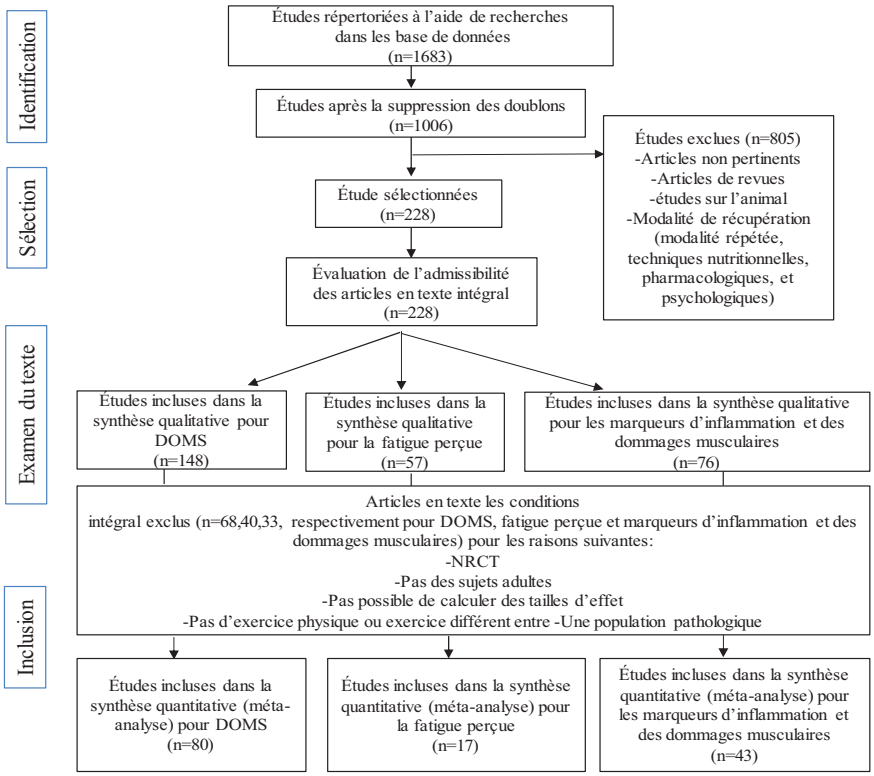


Figure 31 : *Organigramme du processus d'inclusion des études du post-cooling. NRCT : les études qui comprennent pas un groupe contrôle.*

c) Codage des études :

❖ **Etude du per-cooling :**

Nous avons accordé à chaque étude :

-Un identifiant, l'auteur et l'année.

-Des codes (numéros) pour les variables indépendantes : technique du per-cooling et de la partie du corps refroidie.

-Les valeurs de performance sous forme moyenne ± écart type pour le groupe expérimental et contrôle.

-Des codes (numéros) pour les variables modératrices telles que les caractéristiques des sujets (le sexe et le niveau d'entraînement) et la température ambiante (tempéré ou chaud).

❖ **Etude du post-cooling** :

Nous avons accordé à chaque étude :

-Un identifiant, l'auteur et l'année.

-Des codes (numéro) pour les variables indépendantes : technique de la récupération.

-Les valeurs de DOMS, fatigue, marqueurs d'inflammation et des dommages musculaires sous forme moyenne ± écart type pour le groupe expérimental et contrôle.

-Des codes pour les variables modératrices telles que les caractéristiques des sujets (le sexe et le niveau d'entraînement), les caractéristiques de la technique de récupération, type et intensité d'exercice.

d) Evaluation de la qualité méthodologique des études :

La qualité des articles a été évaluée pour limiter les biais méthodologiques. Pour ce faire, deux échelles ont été utilisées :

Echelle Van Tulder **:** est une échelle permettant d'évaluer la qualité méthodologique d'une étude pour limiter le risque des biais méthodologiques. Elle s'appuie sur les 11 items suivants (van Tulder et al. 2003) :

- ✓ « La méthode de randomisation était-elle adéquate ? ».
- ✓ « La répartition du traitement était-elle randomisée ? ».
- ✓ « Les groupes avaient-ils des valeurs de base similaires au regard des indicateurs pronostiques les plus importants ? ».
- ✓ « Les patients étaient-ils « en aveugle ? ».
- ✓ « Les thérapeutes étaient-ils « en aveugle ? ».
- ✓ « Les évaluateurs étaient-ils « en aveugle ? ».
- ✓ « Les co-interventions étaient-elles évitées ou similaires ? ».
- ✓ « La compliance de chaque groupe était-elle acceptable ? ».
- ✓ « Le taux d'abandon des sujets était-il décrit et acceptable ? ».
- ✓ « Le timing des mesures des variables était-il le même pour tous les groupes ?».
- ✓ « L'analyse inclue-t-elle une analyse en ''intention à traiter''.

L'échelle Pedro : est une échelle permettant également d'évaluer la qualité méthodologique d'une étude. Elle se base sur 10 items qui évaluent la validité interne de l'étude, et permet de s'assurer si le résultat de l'étude reflète bien la réalité et n'est pas dû à un biais méthodologique. Elle s'appuie sur les 10 items suivants :

- ✓ « Les sujets sont répartis aléatoirement dans les groupes ». Cela correspond à la randomisation de l'étude.
- ✓ « La répartition a respecté une assignation secrète ». Cela signifie que la personne qui détermine l'inclusion du sujet ne sait pas dans quel groupe le sujet est admis.
- ✓ « Les groupes étaient similaires au début de l'étude au regard des indicateurs pronostiques les plus importants ». Cela signifie que les caractéristiques des groupes doivent être similaires.
- ✓ « Tous les sujets étaient « en aveugle ». Cela signifie que les sujets ne savent pas à quel groupe ils appartiennent.
- ✓ « Tous les thérapeutes ayant administré le traitement étaient "en aveugle" ». Cela signifie que les thérapeutes ne savent pas à quel groupe appartiennent les sujets.
- ✓ « Tous les examinateurs étaient "en aveugle" pour au moins un des critères de jugement essentiels ».
- ✓ « Les mesures, pour au moins un des critères de jugement essentiels, ont été obtenues pour plus de 85% des sujets initialement répartis dans les groupes ».
- ✓ « Tous les sujets pour lesquels les résultats étaient disponibles ont reçu le traitement ou ont suivi l'intervention contrôle conformément à leur répartition ou, quand cela n'a pas été le cas, les données d'au moins un des critères de jugement essentiels ont été analysées 'en intention de traiter' »
- ✓ « Les résultats des comparaisons statistiques intergroupes sont indiqués pour au moins un des critères de jugement essentiels »
- ✓ « Pour au moins un des critères de jugement essentiels, l'étude indique à la fois l'estimation des effets et l'estimation de leur variabilité ».

2.2. Méthodes et mesures des études expérimentales :

a) Sujets :

Pour l'ensemble de la thèse, 69 sujets masculins ont participé à l'ensemble des études expérimentales. Leurs caractéristiques sont résumées dans le tableau suivant :

Tableau 4 *: Caractéristiques des participants dans les études expérimentales*

Etudes	Effectif	Age (ans)	Taille (cm)	Poids (kg)	Niveau physique
Étude 1	20	23.7 ± 4.2	175,2 ± 5.8	71.7 ± 7.0	Actifs*
Étude 2	20	26.7 ± 4.3	180.0 ± 0.1	77.6 ± 7.3	Actifs*
Étude 3	7	24.8 ± 5.5	184.0 ± 0.1	76.7 ± 7.3	Haut niveau
Étude 4	22	28.5 ± 7.3	176.1 ± 6.1	71.7 ± 12.4	Actifs*

** : 3 à 6 heures d'activité physique par semaine.*

Étude 1 : vise à étudier l'impact du port d'un nouveau système de refroidissement proposé par l'entreprise Mawashi (Canada) sur les réponses physiologiques et perceptives dans un environnement thermo-neutre (22°C, 25% d'humidité)

Étude 2 : fait l'objet d'une continuité de la première étude mais les expérimentations se déroulent dans un environnement chaud et humide (30°C, 60% d'humidité) afin de valider un

système de refroidissement plus évolué que le système de Mawashi et évaluer son impact sur les réponses physiologiques et perceptives.
Étude 3 : son objectif est de comparer l'effet des différentes durées d'exposition (3 min, 1min 30s et 1min 30s x2) à la cryothérapie sur la qualité de sommeil de footballeurs professionnels après une séance d'entraînement.
Étude 4 : vise à examiner l'effet d'une seule session de cryothérapie corps entier, (3 min à -50°C) sur la qualité de sommeil et sur l'activité parasympathique cardiaque d'hommes physiquement actifs (VMA≥ 15 km/h) après une séance d'entraînement standardisée.

b) Protocole général :

Études 1 et 2 :

Les participants ont effectué trois visites dans la première (environnement thermo-neutre : 22°C, 25 % d'humidité) et la deuxième étude (environnement chaud et humide : 30 °C, 60 % d'humidité). Le détail des visites est le suivant :

La première visite :

Après le calcul de la fréquence cardiaque maximale théorique (220-age), le sujet commence à pédaler à 30 watts avec une incrémentation de 30 watts toutes les deux minutes jusqu'à ce que le participant atteigne 70% de sa fréquence cardiaque maximale théorique. La puissance atteinte permet de déterminer une puissance de travail pour les visites suivantes (2ème et 3ème visite). Un palier de vérification d'une durée de 6 minutes, à la puissance « cible », nous permet de vérifier l'atteinte la fréquence cardiaque requise.

La deuxième et la troisième visite :

Les sujets sont mis aléatoirement dans deux configurations de visites différentes, une avec gilet activé (gilet on) et l'autre avec gilet désactivé (gilet off). Les deux conditions ont été séparées par un intervalle d'une semaine, et ont été réalisées à la même heure de la journée. Après un repos de 10 minutes, les sujets ont effectué un échauffement de 5 minutes suivi de 30 minutes d'exercice à une puissance de travail fixée pendant la première visite (correspondant à 70% de Fc max théorique) et enfin une récupération de 5 minutes ; dont 2 minutes de récupération active (50% de l'intensité de l'exercice précédent) et 3 minutes de récupération passive. Les sujets ont porté un gilet de refroidissement en fonctionnement (gilet on) pendant l'exercice et la récupération dans la condition expérimentale, cependant, le gilet n'a pas été activé (gilet off) dans la condition contrôle.

Études 3 et 4 :

Le protocole des études 3 et 4 sont respectivement présentés dans **les figures n°32** et **n°33.**
L'expérience de l'étude 3 a été organisée pendant un mois. Chaque session a été réalisée une fois par semaine, le même jour de la semaine et à la même heure de la journée. Après une séance d'entraînement standardisée de 90 minutes, chaque joueur participe à des sessions de cryothérapie de différentes durées à -180 ° C dans une Cryo cabine (Cryotechno®, Castelnau le Lez, France) dans un ordre aléatoire (pas de cryostimulation, Cryo1 : 180s d'exposition, Cryo2 : deux fois 90s exposition séparée par un repos de 5 minutes à température ambiante, Cryo3 : exposition de 90s).

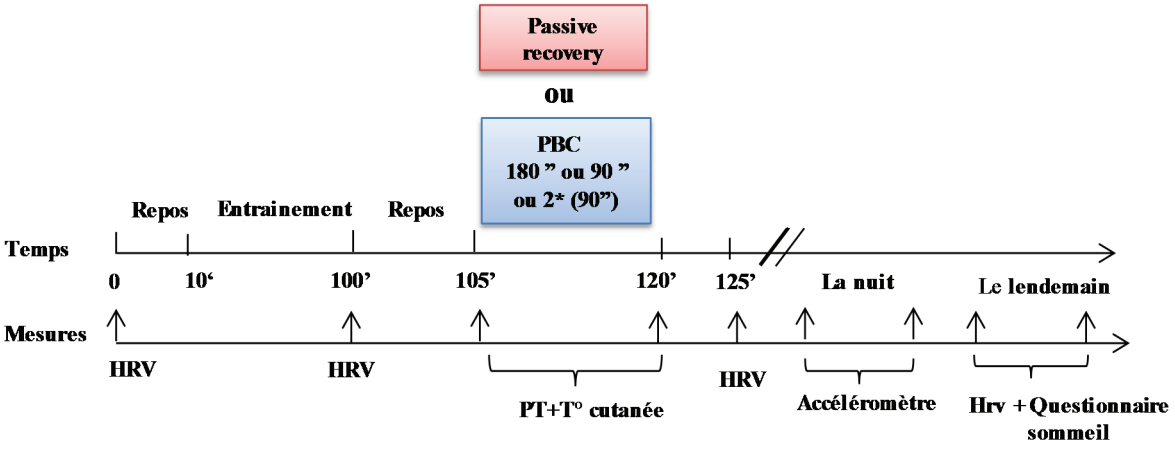


Figure 32 : Protocole de la première étude du post-cooling. PBC : cryothérapie corps partiel ; T° (température cutanée de quadriceps) ; HRV : variabilité de la fréquence cardiaque ; PT : perception de la température.

L'expérience de l'étude 4 a été organisée pendant deux semaines. Chaque session a été réalisée une fois par semaine le même jour de la semaine et à la même heure de la journée. Après une séance d'entraînement standardisée et intense, chaque joueur participe aléatoirement à une session de cryothérapie de de 3 min à -40 ° C dans une chambre corps entier mobile (AURORE® CONCEPT, Paris, France) ou à une récupération passive. La nuit qui suit la récupération (cryothérapie ou passive), les sujets portent des accéléromètres et des moniteurs de fréquence cardiaque toute la nuit en mentionnant l'heure du coucher et l'heure de réveil sur un carnet de bord.

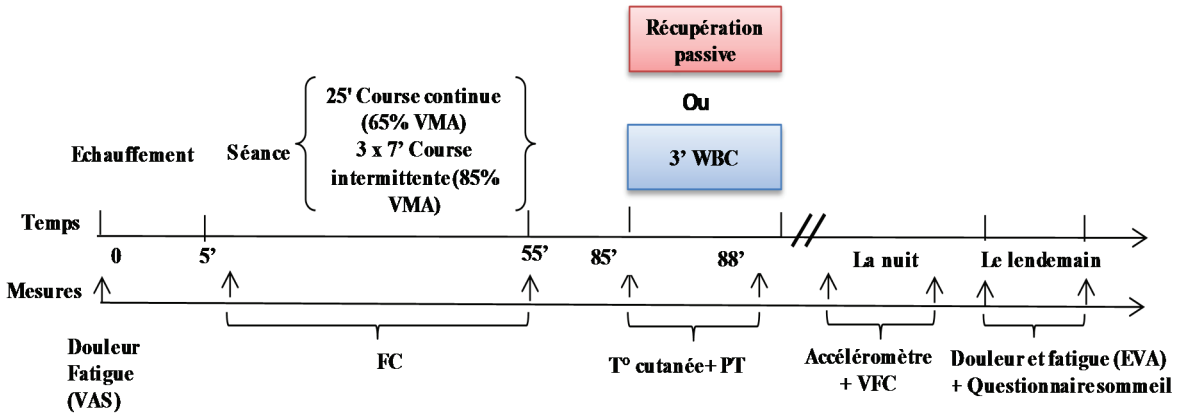


Figure 33 : Protocol de la deuxième étude du post-cooling. WBC : cryothérapie corps entier ; T° (température cutanée du tronc, abdomen et cuisses) ; PT : perception de la température ; VFC : variabilité de la fréquence cardiaque ; FC : fréquence cardiaque ; EVA : échelle visuelle analogique ; Remarque : les mesures commencent à 19h.

c) Evaluations physiques et entraînements :

Étude 3 :

La session d'entraînement standardisée dure 90 minutes. Le détail de la séance d'entraînement est le suivant : un échauffement standardisé de 10 minutes, puis un travail technico-tactique de 30 minutes. Ensuite, une séance intermittente de 30 minutes type 15/15 à 95% de la vitesse

maximale aérobie (VMA) a été effectué ainsi qu'un travail de pliométrie de 20 minutes. La séance d'entraînement est la même pour chaque visite et sous le contrôle de l'entraîneur et du préparateur physique du club. La charge d'entraînement a été quantifiée par l'enregistrement de la fréquence cardiaque ainsi que leur vitesse de déplacement en utilisant un GPS. Une échelle de fatigue a également été utilisée à la fin de la séance pour évaluer l'état de fatigue des joueurs et la comparer entre les quatre visites.

Étude 4 :

La séance d'entraînement est divisée en 4 parties :

- Un échauffement.
- Un travail continu consiste à 20 minutes de course à 65 % VMA.
- Une course intermittente comprend 3séries de 7 min à 85 % VMA séparées d'une récupération active de 2 min à 60 % VMA.

d) Les mesures :

Mesures physiques :

Puissance moyenne : (Étude 1 et 2)

Un vélo ergomètre Monark (Monark LC6 Novo, Vansbro, Suède) (**Figure 34)** a permis aux participants de simuler un effort correspondant à des charges de travail faible, modéré ou intense. Cet appareil a également mesuré avec précision la puissance moyenne fournie par les participants.

***Figure 34** : Vélo ergomètre Monark*

Mesures de mouvements pendant le sommeil : (Étude 3 et 4)

Toutes les nuits après l'exposition à la cryothérapie ou à la récupération passive, les sujets portent au poignet, un accéléromètre triaxial **(figure 35)** (moniteur WGT3X-BT, Pensacola, États-Unis) pour enregistrer les mouvements pendant le sommeil. Ce moniteur est équipé d'un récepteur qui capte les mouvements (des accélérations) qui sont convertis à l'aide d'un algorithme à un nombre de mouvements (counts/minutes). Le temps d'enregistrement a été réglé par défaut de 20 h à 8 h le lendemain matin en utilisant le logiciel actiLife 6.11.0 (Powerful Data Analysis Platform). Les sujets portent l'ActiGraph du moment du coucher au réveil le lendemain matin. Ils notent dans un carnet de bord, les heures auxquelles ils se couchent et se lèvent.

***Figure 35** : ActiGraph GT3X*

Mesures physiologiques :

Fréquence cardiaque : (Études 1, 2, 3 et 4).

La fréquence cardiaque (FC) a été enregistrée en continu au moyen d'un moniteur de fréquence cardiaque (Polar RS800CX, Finlande) **(Figure 36 A)**. La fréquence cardiaque au niveau de la poitrine a été mesurée grâce à une ceinture munie de deux électrodes. Le signal a été transmis à une montre réceptrice installée au poignet et analysé ensuite sur un ordinateur.

Variabilité de la fréquence cardiaque (VFC): (Étude 3 et 4)

Les intervalles R-R ont été enregistrés avec un moniteur de fréquence cardiaque (montre de sport GPS Polar V800, Finlande, 2014) **(Figure 36 A).** Les fichiers de VFC ont été analysés à l'aide du logiciel Kubios. Ce logiciel nous permet d'obtenir des informations à la fois dans le domaine temporel et fréquentiel de l'analyse de la VFC. Nous pouvions ainsi obtenir des informations du domaine temporel comme la fréquence cardiaque moyenne (HRmean), l'intervalle RR (RRI), l'écart type de l'intervalle RR (SDNN), la racine carrée des différences moyennes de RRI (RMSSD). Mais aussi des mesures issues de l'analyse spectrale (domaine fréquentiel) telles que la puissance des bandes de basse fréquence (LFnu) et de haute frequence (HFnu), ainsi le rapport LF / HF.

Pertes hydriques : (Étude 1)

Les pertes hydriques ont été mesurées à l'aide d'un pèse-personne numérique (Tanita BC 418 MA -Tokyo, Japon) **(Figure 36 B).**

Température cutanée : (Études 1, 3 et 4)

Dans la première étude, les températures cutanées de la tête, du tronc et des bras ont été mesurées à l'aide d'une caméra thermique infrarouge Fluke TIS (Mississauga, Canada) **(Figure 36 C).** Dans la troisième étude, la température cutanée du quadriceps a été mesurée à l'aide d'un thermomètre infrarouge **(figure 36 D).** Dans la quatrième étude, la chambre de cryothérapie est munie de trois sondes pour mesurer la température cutanée au niveau du tronc, abdomen et cuisses. Toutes ces valeurs sont communiquées à l'aide d'un écran de commande depuis lequel nous pouvons démarrer ou arrêter les mesures.

Température interne : (Étude 2)
La température interne a été mesurée à l'aide d'un thermomètre auriculaire **(Figure 36 E).**

Echanges gazeux : (Étude 1)

Les échanges gazeux ont été enregistrés à l'aide d'un analyseur de gaz (METAMAX® 3B, Cortex biophysik gmbh Leipzig, Allemagne) **(Figure 36 F).** Cet analyseur a été calibré avant chaque utilisation (calibration de la pression, des gaz et des volumes). Il a permis d'enregistrer en continu la consommation d'oxygène, la fréquence respiratoire, le quotient respiratoire, le débit ventilatoire, le volume courant.

Oxygénation cérébrale et musculaire : (Étude 1)

L'oxygénation cérébrale et musculaire ont été mesurées en continu (repos, exercice et récupération) par la spectroscopie proche infrarouge (NIRS) **(Figure 36 G)** (Oxymon Mk III, Zetten, Pays-Bas). La NIRS est une technique d'imagerie optique non invasive qui mesure les

changements de concentrations des chromophores (Hémoglobine oxygénée et désoxygénée) en se basant sur le principe de l'absorption de la lumière infrarouge de l'hémoglobine à différentes longueurs d'ondes (780 à 2500 nm). En effet, les changements des concentrations de l'hémoglobine oxygénée (O2Hb) et l'hémoglobine désoxygénée (HHb) peuvent être calculées soit au niveau cérébral ou musculaire. Pour mesurer l'oxygénation cérébrale, des optodes transmettant et recevant la lumière ont été placées sur la partie gauche du front (région entre Fp1 et Fp3 sur système 10/20). Pour l'oxygénation musculaire, les optodes ont été positionnées longitudinalement sur l'axe médial du vastus lateralis ~ 10 cm au-dessus de l'articulation du genou. Pour éviter le mouvement et les sources externes de lumière qui peuvent perturber le signal, un bandage élastique de couleur sombre a été enroulé autour des optodes. Aux niveaux cérébral et musculaire, la NIRS permet d'enregistrer des changements de concentration (Δμmol) en hémoglobine oxygénée (O2Hb), désoxygénée (HHb), totale (THb) et la différence entre O2Hb et HHb (diffHb) ainsi que l'indice de saturation de l'oxygénation tissulaire (TSI (%)).

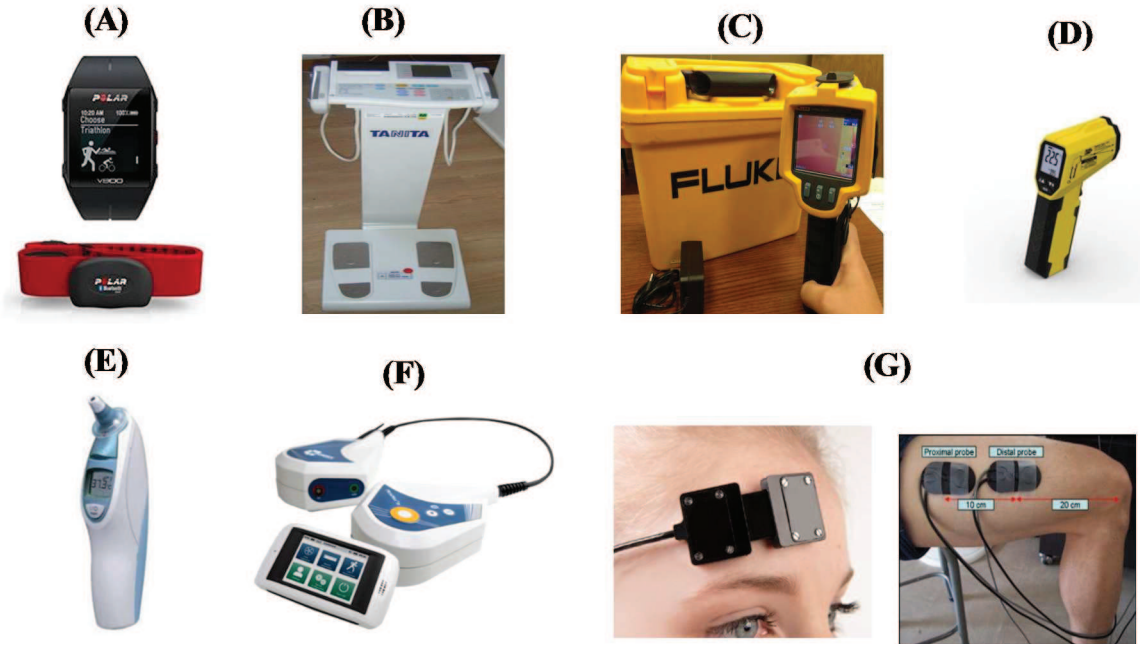


***Figure 36** : Appareils utilisés pour les mesures physiologique. A : Polar GPS v800, B : Tanita (BC 418 MA -Tokyo, Japon), C : Caméra thermique Infrarouge, D : Thermomètre infrarouge, E : Thermomètre auriculaire, F : METAMAX® 3B, G : la spectroscopie proche infrarouge (NIRS) (Oxymon Mk III, Zetten, Pays-Bas).*

Mesures perceptives :

Perception de la difficulté de l'effort (RPE) : (Études 1 et 2)

La RPE a été évaluée toutes les 10 minutes de l'exercice en utilisant l'échelle de BORG (Borg 1982) de 10 points où 0 correspond au repos (« aucun effort ») et 10 à l'effort maximal.

Perception de température, d'humidité et de bien-être : (Études 1 et 2)

Les participants sont interrogés sur leurs perceptions à l'aide d'échelles. Les scores attribués à la perception de la température variaient entre -6 : très froid et 4 : chaud, pour le bien-être de -6 : très inconfortable à 4 : confortable et l'humidité de -6 : humide à 4 : sec (Davide Filingeri et al. 2014).

Perception de froid : (Études 3 et 4)

Les participants ont évalué leurs perceptions de froid en se positionnant sur l'échelle de Lundergen (Lundgren et al. 2014) graduée de 0 « Neutre » à 10 « Froid insupportable ».

Perception de la douleur et de la fatigue : (Étude 3 et 4)

La douleur et la fatigue perçues ont été évaluées avant l'entraînement et le lendemain en utilisant une échelle visuelle analogique (VAS : Visual analog scale) graduée de 0 à 10 où 0 correspond à aucune douleur ou fatigue perçue et 10 correspond à une douleur ou fatigue extrême.

e) Les gilets refroidissants et les chambres de cryothérapie :

Étude 1 :

Le gilet refroidissant, utilisé dans la condition expérimentale « gilet on » et contrôle « gilet off », est un système avancé de thermorégulation personnelle Mawashi (APTS-P5, Canada) **(Figure 37)**. Ce système utilise une combinaison de deux systèmes de refroidissement intelligents. Le premier est un système de refroidissement basé sur l'effet Peltier accompagné d'un système de ventilation qui facilite l'évaporation de la sueur et évacue la chaleur excessive et le deuxième est un système thermoélectrique qui transmet la chaleur ou le froid par conduction, en fonction des préférences de l'utilisateur.

***Figure 37** : Système avancé de thermorégulation personnelle Mawashi (APTS-P5, Canada)*

Étude 2 :

Le gilet de refroidissement est basé sur une technologie hybride combinant une détente gazeuse et de la ventilation. Il est composé principalement de deux cylindres de dioxyde de carbone (CO_2) reliés à une boite de mélange et un système de ventilation **(Figure 38).** La distribution de l'air refroidi se fait par l'intermédiaire de tubes flexibles percés et disposés sur les zones du corps humain les plus sensibles au refroidissement (torse et dos).

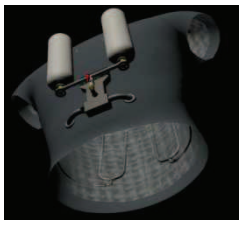
a) b) 

***Figure 38** : Prototype de gilet refroidissant a) vu de dos et b) vu à l'intérieur*

Étude 3 :

Dans la troisième étude, une cryo-cabine **(Figure 39)** a été utilisé. La tête du participant n'est pas exposée. Lors de l'exposition, les participants portent des sous-vêtements avec des gants

et chaussons. Le sujet est exposé à une température de -180 °C indépendamment de la durée d'exposition.

Figure 39 *: Cryo-cabine*

Étude 4 :

Dans la quatrième étude, une chambre de cryothérapie corps entier a été utilisée. La technologie de refroidissement de cette chambre est basée sur la convection forcée par la ventilation d'air froid. Le modèle utilisé de la chambre de cryothérapie est logé dans une remorque d'un camion (une version mobile). Cette version mobile est composée de deux compartiments **(figure 40)**, le sujet passe 30 secondes dans la première chambre à une température de -25 °C puis 3 minutes dans la deuxième chambre à une température d'exposition de -40°C. Le sujet porte, pendant l'exposition, un bandeau sur les oreilles, un masque sur le nez, des sous-vêtements, des gants, des chaussettes et des chaussons.

Figure 40 *: Chambre de cryothérapie corps entier*

3. Les études de thèse (Articles) :
3.1. Études 1: (per-cooling)
a) Résumé:

Cooling during exercise enhances aerobic and anaerobic exercise performances, but the cooled body areas matter: A systematic review with meta-analyses.
Douzi W, Dugué B, Vinches L, Sayed C, Hallé S, Bosquet L, Dupuy O

❖ Objectif

Les objectifs de ce travail étaient d'examiner l'effet du per-cooling sur les performances aérobies et anaérobies et déterminer si cet effet dépend de la partie du corps refroidie et de la technique de refroidissement utilisée.

❖ Méthodes

Après recherche bibliographique, les études incluses sont des études randomisées contrôlées chez l'humain et qui ont mis en place 1) un exercice physique et une intervention de refroidissement appliquée au cours de l'exercice 2) des mesures valables de performance. Après une évaluation de la qualité méthodologique des études, deux examinateurs ont lu et codé chacun des modérateurs suivants pour chaque étude : sexe, niveau d'entraînement, techniques de refroidissement et zone corporelle refroidie.

❖ Résultats

Résultats globaux et qualité méthodologique :

La recherche bibliographique a permis l'identification de 1456 études potentielles à être incluses dont 45 répondaient à tous les critères d'inclusion (36 pour les performances aérobies, 9 pour les performances anaérobies). 10 études avaient un score de 5 sur l'échelle de PEDRO et 35 études obtenaient des scores égaux ou supérieurs à 6 et cela correspond à une haute qualité méthodologique (Chan et al. 2015).

Effet de per-cooling sur la performance aérobie :

Le per-cooling a un effet positif de taille modérée sur la performance aérobie selon le SMD global [SMD (IC 95%) = 0,60 (0,43 à 0,77), I2 = 36,5%]. La ventilation, le gilet de refroidissement et les vêtements de refroidissement (liquide, à changement de phase, par évaporation) sont les techniques les plus efficaces pour améliorer la performance aérobie avec un large effet (0.92<SMD<1.82). En ce qui concerne le site d'application du froid, un effet positif du refroidissement interne ainsi qu'un refroidissement externe du cou, du visage et du tronc ont été observés avec un petit à large taille d'effet (0.46 <SMD <1.24).

Effet de per-cooling sur la performance anaérobie :

Nous avons observé un petit effet positif de per-cooling sur la performance anaérobie [SMD (IC 95%) = 0,27 (0,04 à 0,50), I2 = 31,73%]. Contrairement à la performance aérobie, le port des vêtements de refroidissement dans le corps entier a un effet positif sur la performance anaérobie [SMD (IC 95%) = 0,39 (0,12 à 0,66)].

❖ Discussion

Le per-cooling permet d'améliorer la performance aérobie et anaérobie. L'effet bénéfique du per-cooling sur la performance peut s'expliquer par une meilleure réponse cardiovasculaire, thermique et perceptive (Stevens et al. 2017 ; Tyler et al. 2015). Le per-cooling permet d'améliorer la performance des exercices aérobies et anaérobies mais avec un plus grand impact pour les exercices aérobies. Les vêtements de refroidissement (type liquide, à changement de phase, par évaporation), les gilets de refroidissement et les systèmes de ventilation sont les techniques les plus efficaces pour améliorer la performance aérobie. En ce qui concerne la partie du corps refroidie, le refroidissement interne (ingestion des boissons froides et glacées) et le refroidissement externe du visage, cou et tronc, assurent les meilleurs gains de performance aérobie. Le port des vêtements de refroidissement sur l'ensemble du corps est le seul moyen permettant une amélioration de la performance anaérobie. En résumé, l'efficacité du per-cooling dépend de la technique de refroidissement utilisée et de site d'application du froid.

- Le per-cooling permet d'améliorer la performance aérobie et anaérobie en particulier pour les exercices aérobies.
- Les systèmes de ventilation, les vêtements de refroidissement et les gilets refroidissants sont les techniques les plus efficaces pour améliorer la performance aérobie.
- Les sites assurant les meilleurs gains de performance aérobie sont : le refroidissement interne (ingestion des boissons froides et de boue de glace), le refroidissement externe du visage, du cou et du tronc.
- Le port des vêtements de refroidissement sur l'ensemble du corps est le seul moyen permettant l'amélioration de la performance anaérobie.

b) Article :

Cooling during exercise enhances aerobic and anaerobic exercise performances, but the cooled body areas matter: A systematic review with meta-analyses.

Douzi W[1], Dugué B[1], Vinches L[2], AL Sayed C[2], Hallé S[2], Bosquet L[1], Dupuy O[1]

1- University of Poitiers, Laboratoire Mobilité Vieillissement Exercice (MOVE)-EA6314, Faculty of Sport Sciences, 8 allée Jean Monnet, 86000, Poitiers, France
2- Department of Mechanical Engineering - Ecole de Technologie Supérieure, 1100, rue Notre-Dame Ouest, Montréal (Qc) Canada, H3C 1K3

(Article soumis et en révision dans Sports Medicine)

Running heading: Cooling during exercise enhances exercise performances

Corresponding author :
Benoit Dugué, PhD
Université de Poitiers et Laboratoire « Mobilité, Vieillissement, Exercice » ; 8 allée Jean Monnet, 86000, Poitiers, France.
Tel : +33549454040
E-mail : benoit.dugue@univ-poitiers.fr
ORCID number: 0000-0003-2660-8244

Abstract
Introduction: Hyperthermia during exercise induces central and peripheral fatigue and impairs aerobic and anaerobic physical performance. To facilitate heat loss and optimize performance, athletes can implement cooling interventions to hasten body cooling. However, it is unclear whether the effect of per-cooling is the same on aerobic and anaerobic performance and whether the body area that is cooled makes a difference.

Methods*:* A literature search led to the identification of 1456 potential studies for inclusion in this analysis. Included studies should implement physical exercise with sufficient details on the type, duration, intensity, and provide valid performance measures and a cooling intervention administered during exercise with sufficient details on the type and site of application.

Results*:* Forty-five studies met our inclusion criteria. Per-cooling provided a performance benefit during aerobic (standardized mean difference (SMD) of 0.60, $p<0.001$) and anaerobic exercises (SMD = 0.27, $p<0.02$). However, we observed a greater per-cooling benefit in performance during aerobic exercise than during anaerobic exercise *($p<0.01$)*. Internal cooling and external cooling of the face, neck and torso provided the greatest performance benefits in aerobic performance with a moderate to large effect ($0.46<SMD<1.24$). For anaerobic exercises, wearing a whole-body cooling garment is the best way to enhance anaerobic exercise performance (SMD = 0.39, $p<0.01$).

Conclusion: Per-cooling improves aerobic and anaerobic exercise performance with a better benefit for aerobic exercise. The positive effect depends on the type and site of the cooling application.

1 Introduction:

Some major sports competitions or several working places exist in hot climates, which can lead to physiological and psychological disturbances that increase the risk of illness and injury. Indeed, performing physical exercise in thermally challenging environments induces hyperthermia, in which endogenous heat production surpasses the capacity for heat to be released to the surrounding environment and may lead to premature fatigue and affect physical exercise performance [1]. Therefore, exposure to hot conditions impairs aerobic performance, demonstrated either by a shorter time to exhaustion given the inability to maintain a desired work output over time [2] or a longer time trial completion time through an early modification of work output [3]. Moreover, undertaking exercise in hot conditions may alter anaerobic performance such as repeated sprint performance or maximal voluntary contractions [4]. The physiological mechanisms involved with hyperthermia-induced fatigue appear to involve the central nervous system (central fatigue) and cardiovascular function such as cardiac output and arterial oxygen delivery. All these alterations may reduce the contribution to anaerobic energy, thereby accelerating the decline in Adenosine triphosphate (ATP) and Phosphocreatine (PCr) levels and inducing peripheral fatigue.

To facilitate heat loss and optimize performance, athletes can implement some cooling techniques such as cooling vests and other cooling interventions (e.g., ice packs, ice ingestion, cold-water immersion, etc.). Cooling strategies have attracted special attention from the scientific community, and several narrative reviews have studied the impact of cooling on physical performance [5,6]. One of the techniques used is *pre-cooling*, which consists of reducing the body temperature before exercise conducted in a hot environment. This technique seems to improve performance during exercise since it induces a reduction of thermal strain experienced during exercise [7]. However, the required effects induced by *pre-cooling*, such as lowering the internal body temperature and improved perception of thermal strain and performance, are often lost during exercise [8]. Other techniques

used in the field include cooling during exercise (*per-cooling*). However, this topic has received less research attention because of practical aspects such as sporting rules and the heavy weight of cooling systems [9]. Nonetheless, recent works in this area have suggested that *per-cooling* may be more beneficial than *pre-cooling* strategies [10,11]. This is not surprising because *per-cooling* ensures an efficient cooling for the body when it is directly exposed to the heat with a prompt effect on performance [12]. Furthermore, the higher thermal strain experienced during exercise compared to resting or warming up conditions may explain the greater advantage of *per-cooling* compared to *pre-cooling* [13]. A recent study [11] supported this evidence, showing a better effect of *per-cooling* on performance exercise through an improvement of cardiovascular, thermoregulatory and thermal strain compared to *pre-cooling* strategies.

The effect of cooling on physical performance is of continuing interest in recent studies [14,15]. It appears that this effect depends on the exercise types. A recent work reported that *pre-cooling* has a positive effect on intermittent and prolonged exercise performance but a negative effect on sprint performance. Nevertheless, these authors did not report a clear conclusion about a *per-cooling* strategy. Indeed, we cannot draw a clear conclusion about the effects of *per-cooling* on exercise performance involving aerobic or anaerobic performance because of the lack of research in this area. Conversely, the effect of cooling may depend on the body area being cooled since body tissues do not dispose the same perfusion. Cooling at a site with high tissue perfusion seems an ideal method for attenuating increases in body temperature [16]. Therefore, the efficacy of the cooling method depends on the body site at which cooling was applied. To the best of our knowledge, there is no study in the literature that has directly compared the effects of cooling body sites on exercise performance. There are a variety of *per-cooling* methods and sites of application;

thus, several questions must be examined concerning the effect of *per-cooling* on the performance type (aerobic anaerobic) and whether this effect on performance depends on the cooled body area.

The aims of this meta-analysis were (1) to verify and compare the effects of *per-cooling* on aerobic and anaerobic performance, (2) to assess the effect of the cooling techniques on exercise performance and (3) to investigate whether the cooled body area made a difference.

2 Methods

2.1 Literature search

Three databases (PubMed (1949 to 2018), Embase (1974 to 2018), and Web-of-Science (1945 to 2018)) were searched using the following terms: "Cooling" or "Cooling during exercise" or "*per-cooling*" or "body cooling" or "mid cooling" or "whole body cooling" or "face cooling" or "head cooling" or "hand cooling" or "neck cooling" or "internal cooling" AND "exercise" or "aerobic performance" or "endurance" or "time trial" or "time to exhaustion" or "power output" or "anaerobic performance" or "sprint" or "speed" or "distance" or "jump" or "maximal voluntary contraction" or "strength" for “English” or “French-language” randomized controlled trials studies. In addition, a manual search was conducted to add studies that were not found electronically after an examination of the obtained reference lists of the articles, but no other potential studies were eligible to be included in the analysis (Figure 1).

2.2 Selection Criteria

Studies were included if: they implemented (1) a cooling intervention applied during the exercise with details about the cooling technique and the cooling application site, (2) an exercise intervention with relevant details about the type, duration, and intensity of the exercise, (3) the paper provided clear and valid measures of performance and all the necessary data to calculate the effect size. Studies were excluded if: (1) the intervention was implemented with patients or animals, (2) the cooling intervention was applied before, after or between exercise bouts, (3) there were no clear performance measures and (4) the study was a review article. Our study protocol was conducted in accordance with the Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses (PRISMA) statement [17].

2.3 Coding for the studies and quality assessment

One reviewer who was blind to authors, affiliations and publishing journal [18] read and coded all included studies using the following moderators: sex (male, female, both), training status (competitive athletes, recreational athletes or sedentary subjects), cooling intervention (cold water ingestion, ice slurry ingestion, cooling garment, cooling vest, ice vest, ventilated vest, fan and water spray, hand cooling device, cold water immersion, menthol cooling, cold packs, ventilated strategies) and cooled body area (whole-body cooling, torso cooling, face cooling, head cooling, hand cooling, neck cooling, internal cooling, mouth rinse). A nominal scale was used to code the moderators. He also assessed the quality of included studies using the Physiotherapy Evidence Database (PEDro) scale [19]. Then, the reviewer coded the studies and took into account.

2.4 Statistical analysis

Hedges’ g [20] was used to calculate standardized mean differences (SMDs) for each experimental group. We used a random effects model since the effect of a cooling intervention may differ according to training status, sex or other moderators. The SMDs were weighted by the inverse of the variance to calculate an overall effect and its 95% confidence interval. Cohen’s classification of effect size magnitude was used with the following interpretations: SMD <|0.50|: small; SMD from |0.50| to |0.80|: moderate; and SMD >|0.80|: large [21]. The percentage of variability between studies was assessed using the I^2 statistic, which represents statistical heterogeneity [22]. I^2 values of 25%, 50% and 75% represent low, medium and high heterogeneity, respectively. According to Higgins et al. [23], a medium or high heterogeneity is sufficient to analyse the subgroups of the moderator variables even if the overall effect is not significant. A funnel plot was produced to evaluate possible publication bias. A Q-test based on the analysis of variance was performed to test the null hypothesis that

the effect of cooling was similar between the categories of a moderator variable [22]. When the null hypothesis was rejected, pairwise comparisons were performed with a Z test. The statistical significance level was set at P = 0.05. All calculations were performed with a spreadsheet (Excel) and Comprehensive Meta-analysis software (www.meta-analysis.com).

3 Results

3.1 Overall results

We identified 1456 potentially relevant articles published from 1987 to 2018. Forty-five of them met our inclusion criteria, with 36 studies that assessed the effect of *per-cooling* on aerobic performance (51 experimental groups and 325 participants), and 9 studies that assessed anaerobic performance (20 experimental groups and 139 participants). Characteristics of included studies are presented in **Tables 1 and 2** for aerobic and anaerobic performance, respectively. Exclusion criteria are detailed in **Figure 1**. As presented in **Figure 2**, most of included studies were distributed symmetrically about the mean effect size, thus suggesting that sampling error was random, Ten studies had a PEDRO scale of 5, and 34 studies had scores equal to or greater than 6, which was regarded as high-quality [24].

3.2 Effect of per-cooling on aerobic performance

Overall SMD shows that *per-cooling* has a positive effect of moderate magnitude on aerobic performance [SMD (95% CI) = 0.60 (0.43 to 0.77), I^2 = 36.5%, p<0.001]. When examining population characteristics, a positive effect of *per-cooling* on aerobic performance was observed regardless of sex or training status (0.43 < SMD < 1.33). Regarding cooling techniques, as presented in **Figure 3A, a** neck cooled collar, air ventilation, cold fluid ingestion, ice vest and cooling garments induced a small to large increases in aerobic performance (0.46 < SMD < 1.82). When assessing the effect of the cooled body area on aerobic performance, a positive effect of internal and external cooling of the neck, face and torso was observed with a small to large SMD (0.46 < SMD < 1.24) (**Figure 4A)**. Conversely, cooling the entire body or other areas of the body such as the hand or mouth did not induce any effect. External temperature during exercise does not appear to modulate the effect of *per-cooling*, since performance benefits were significant both in temperate [<28 °C; n=3 studies with a mean temperature of 23.4 ± 2.4°C; SMD (95% CI) = 0.57 (0.40 to 0.75), I^2 = 36.53, p<0.05) or hot conditions (>28 °C; n=32 with a mean temperature of 33.4 ± 3.5 °C ; SMD (95% CI) = 0.86 (0.20 to 1.52), I^2 =38.65, p<0.001].

3.3 Effect of per-cooling on anaerobic performance

According to the overall SMD, *per-cooling* has a positive effect of small magnitude on anaerobic performance [SMD (95% CI) = 0.27 (0.04 to 0.50), I^2 = 31.73%, p<0.05]. The effect of *per-cooling* on anaerobic performance was not different according the population characteristics (sex and training status). Unlike aerobic performance, only cooling garments seemed to have a positive effect of small magnitude on anaerobic performance [SMD (95% CI) = 0.39 (0.12 to 0.66), I^2 = 0.18, p<0.05]. Nonetheless, other cooling techniques had no significant effect on anaerobic performance (**Figure 3B**). Likewise, regarding cooled body area only whole-body cooling induced a small positive effect [SMD (95% CI) = 0.39 (0.12 to 0.66), I^2 = 0.00, p<0.05] (**Figure 4B**). The effect of *per-cooling* on anaerobic performance was different according the external temperature, we observed a positive effect in hot conditions [SMD (95% CI) = 0.38 (-0.02 to 0.78), I^2 = 25.98, p<0.05] whereas no significant effect of *per-cooling* was observed in temperate conditions [SMD (95% CI) = 0.09 (-0.1 to 0.28), I^2 = 15.14].

When comparing the effect of *per-cooling* on aerobic performance to its effect on anaerobic performance, we observed a greater benefit on aerobic performance than on anaerobic performance (0.27 < Hedge's g for the difference < 0.64, Z = 2.54, p<0.01).

4 Discussion

The aims of this meta-analysis were (1) to verify and compare the effect of *per-cooling* on aerobic and anaerobic performance, (2) to assess the effect of the cooling techniques on exercise performance and (3) to investigate whether the cooled body area made a difference. The results showed that *per-cooling* significantly enhanced aerobic and anaerobic exercise performance with a greater benefit in aerobic exercises. However, the performance improvement is dependent on the cooling application site and the ambient temperature.

4.1 The effect of per-cooling on aerobic exercise performance:

- ***Overall effect of per-cooling on aerobic performance***

The current work indicates that *per-cooling* significantly improves aerobic performance with an overall moderate positive effect [SMD (95% CI) = 0.60 (0.43 to 0.77), I2 = 36.5%, p<0.001]. Despite the paucity of research in this area, the present finding agreed with a recent meta-analysis [16]. Another review conducted on the effect of *per-cooling* on endurance performance was consonant with the present finding; it indicated that cooling during exercise improves endurance exercise capacity and performance, and they added that the performance improvements from the per-cooling interventions tended to be better within time to exhaustion tasks (9–51%) compared to time trials (3–9 %) [25]. These results may be explained by the fact that participants in time to exhaustion cannot freely choose external intensity and thus *per-cooling* may have a more beneficial effect on this type of exercise. In the present data analysis, we observed an improvement in aerobic performance regardless of the exercise protocol and intensity pacing.

- ***Effect of cooling techniques***

The literature showed that a range of cooling techniques were more effective and practical than other cooling techniques [8,16,25,26]. In the present work, we found that using cooling garments [SMD (95% CI) = 1.82 (0.17 to 3.47), I^2 = 1.76, p<0.05], ice vests [SMD (95% CI) = 1.18 (0.34 to 2.02), I^2 = 0.00, p<0.05], and air ventilation [SMD (95% CI) = 0.92 (0.35 to 1.50), I^2 = 13.89, p<0.05] appeared to be the most effective strategies with a large positive effect in enhancing aerobic exercise performance. Previous meta-analyses agreed with this finding. Tyler et al. [8] and Bongers et al. [26] have found that ice vests had the greatest effect on performance. The ice vest represents an *aggressive* cooling strategy that affects a relatively large body surface area [15]. Furthermore, ice possesses a significantly greater capacity to absorb heat than liquid water [27,28]. Thus, cooling techniques with a temperature below zero demonstrate a larger effect on changing Tc and/or exercise performance. In regard to **cooling garments**, a recent meta-analysis review [24] indicated that cooling garments can improve human performance and reduce body heat strain in a stressful thermal environment by lowering core temperature and sweating rate. Similarly, **air ventilation** appeared to be an effective cooling intervention during prolonged exercise. In this line, Bongers's meta-analyses [7] reported a moderate positive effect (18.5%, ES = 0.54) of facial wind application on performance. Therefore, wind cooling has been shown to improve exercise endurance time; for example, head and whole-body ventilation have been reported to improve cycling time to fatigue by 50% [29,30]. The enhanced performance may be explained by the fact that wind provides a sensation of coolness and effectively lowers thermal strain and improves thermal perception [31,32].

Moreover, two other cooling techniques induce **small to moderate positive effects** on aerobic performance: cold fluid ingestion [SMD (95% CI) = 0.57 (0.28 to 0.87), I^2 = 0.00, p<0.001] and neck cooled collars [SMD (95% CI) = 0.46 (0.20 to 0.71), I^2 = 0.00, p<0.001]. Previous works corroborate the present finding. In a recent study, Bongers and co-workers [7] concluded that *per-cooling* using **cold fluid ingestion** appeared to be the most effective strategy to enhance exercise performance (5.7%, ES = 0.88). Drinking cold water can significantly mediate and delay the increase in

core body temperature [33,34] and thus results in an enhanced endurance performance [34–36]. A recent meta-analysis [16] reported a positive effect of applying a **neck cooled collar** on endurance performance. These authors suggested that the neck collar is a practical cooling intervention. Its beneficial effect could be ascribed to the improved thermal perception and perceived exertion. Neck cooling collars worn during exercise have been shown to enhance 15-min preloaded treadmill time trial performance by 6-13% [12,37–39] in hot environmental conditions (temperature: 30–32 °C; relative humidity (rh): 50–70%).

Nevertheless, in the present work, other techniques seem to be ineffective at enhancing aerobic exercise performance such as the ventilated vest, hand cooling device (RTx), water spray and menthol cooling, which may be related to the cooling power of those interventions. For example, an **ventilated cooling vest** (10°C) [40] may be insufficient to elicit a performance benefit due to its limited cooling capacity [41]. Further, **spraying a menthol solution** on exercise clothing at a concentration of 0.05% resulted in no improvements in 40-km cycling time trial performance [42] or 5-km running time trial performance [43] despite significantly cooler thermal sensation and improved thermal comfort in both instances. The effect of palm cooling using a **hand-cooling device** on aerobic performance was not consistent in the literature. A negative effect of palm cooling was reported when participants completed two exhaustion runs at 75% of VO_2 max with and without palm cooling at an ambient temperature of 30°C. The authors observed that time to exhaustion was 5.5 min longer in the control conditions compared to the palm cooling condition [44]. Conversely, using a hand cooling device was shown to provide an endurance performance benefit in thermally stressful conditions [45,46]. The absence of the effect of this cooling technique in the present meta-analysis may be caused by these controversial results of the effect of hand cooling devices.

- ***Effect of body area cooled on aerobic performance***

To the best of our knowledge, the present work is the first study that compared the effects of different cooled body areas. The data analysis concerning the cooled body area indicated that the effect of *per-cooling* on aerobic performance depends on the cooling application site. Internal cooling [SMD (95% CI) = 0.55 (0.29 to 0.82), I^2 = 1.57, p<0.001] and cooling the face [SMD (95% CI) = 1.24 (0.53 to 1.94), I^2 = 0.00, p<0.001], neck [SMD (95% CI) = 0.46 (0.20 to 0.71), I^2 = 0.00, p<0.001] and torso [SMD (95% CI) = 1.00 (0.47 to 1.54), I^2 = 59.9, p<0.001] provided the greatest performance benefit in aerobic exercise performance. Internal cooling involved cold water and ice slurry ingestion [47,48]. The effectiveness of **internal cooling** in enhancing performance likely originates in the significant reduction of central temperature [33,34] by acting as a gastrointestinal heat sink [36], thus reducing the negative effect of the thermal strain experienced. Therefore, internal cooling through the ingestion of a cold carbohydrate solution is associated with strong sensory effects that potentially stimulate reward/pleasure centres in the brain [49]. A previous work using functional magnetic resonance imaging (fMRI) demonstrated that some of the same areas of the brain that detect pleasant taste are also involved in detecting temperature in the mouth [50], causing increased central drive or motivation for exercise [51] and thus improving performance. In addition, **face cooling** may be effective in improving exercise performance. An explanation for this enhancement may be that the face region is more sensitive to cooling than other parts of the body due to a greater sudomotor (autonomic) and alliesthesial thermosensitivity to cooling. Thus, cooling the face resulted in a two- to five-fold more powerful suppression of sweating and thermal discomfort than did cooling an equivalent area [52]. Hence, facial cooling can be used to optimally reduce thermal discomfort, as suggested previously [53–55]. Previous works have reported that **neck cooling** during exercise has been shown to enhance 15-min preloaded

treadmill time trial performance by 6-13% [12,37–39] in hot environmental conditions (30–32 °C; 50–70% rh). Cooling the neck may be advantageous because of both its proximity to large blood vessels (heat removal) [56] and its production of a definite feeling of comfort [57]. Therefore, cooling the neck is strongly recommended during exercise given practical considerations (the neck is readily accessible compared to other body areas) and anatomical and perceptual considerations (e.g., the neck is in close proximity to the thermoregulatory centre and is a region of high alliesthesial thermosensitivity) [52]. Furthermore, **the torso** was reported to be an effective region to be cooled to enhance performance thanks to its large vascularization, thereby cooling substantial quantities of blood [56]. In addition, a previous study [58] tested the effect of chest cooling on performance in severe heat and showed an improved tolerance time that increased from 35 to 120 min. Further, cooling the entire chest is more effective in the alleviation of heat strain than neck cooling [59,60]. This result may be explained by the fact that the trunk has a high sensitivity to cold due to more cold spots [61].

Nevertheless, cooling the entire body or hand cooling did not induce a change in performance exercise. As discussed above, we could not draw a conclusive result concerning the effect of **hand cooling** on exercise performance. This result may be explained by its weak sensitivity to cooling. A previous study has demonstrated that the extremities are the least thermo-sensitive segments [52]. This finding was confirmed later by Nakamura's study: even when hand cooling produced a strong effect on local thermal comfort, the magnitude of changes in whole-body thermal comfort was not great [57]. However, studies that reported a positive effect of hand cooling on performance explained that despite its weak sensitivity to cooling, the heat exchange through extremities when in a warm environment is enhanced due to arteriovenous anastomoses, which are mainly located in the distal part of the extremities and stimulate heat loss by supplying blood to the upper parts of the skin [62]. Similarly, cooling **the entire body** did not induce a performance benefit, which was an unexpected result because the larger the surface area covered by the cooling technique, the greater the heat exchange [63]. However, cooling 15% of the body surface area resulted in a complete elimination of heat strain in men working in hot environments [64], and a later study [65] found that whole-body cooling during agricultural work in fields was not doable. Hence, if cooling only part of the body surface ensures an effective reduction of heat strain, whole-body cooling is not necessary.

Concerning the effect of ambient temperature on the efficacy of *per-cooling*, we inferred that *per-cooling* induced a performance benefit in both hot [SMD (95% CI) = 0.63 (0.44 to 0.82), I^2 = 38.65, p<0.001] and temperate conditions [SMD (95% CI) = 0.86 (0.20 to 1.52), I^2 = 36.53, p<0.05]. We expected a greater performance benefit in hot conditions since it has been reported that the higher the heat load, the more beneficial the cooling [66].

4.2 The effect of per-cooling on anaerobic exercise performance

- ***Overall effect of per-cooling on anaerobic performance***

To the best of our knowledge, the present meta-analysis is the first to compare studies using *per-cooling* during anaerobic exercises. Regarding the overall effect, we identified a small positive effect [SMD (95% CI) = 0.27 (0.04 to 0.50), I2 = 31, 73%] of *per-cooling* on anaerobic exercise performance. Most of the studies involving anaerobic exercise have focused on cooling before exercise bouts [67], They found small or no significant effects of cooling on anaerobic exercise performance [68–70]. For example, Duffield's study [71] involving an anaerobic protocol by intermittent cycling sprints to investigate the effect of an ice vest before exercise and between bouts found no improvement in performance measurements.

- ***Effect of cooling techniques***

Regarding cooling techniques, only a **cooling garment** was shown to enhance anaerobic exercise performance with a small effect [SMD

(95% CI) = 0.39 (0.12 to 0.66), I^2 = 0.18, p<0.05]. The included studies used either liquid or phase change cooling garments [72–74]. Liquid cooling garments are based on conductive cooling [75], and phase change garments often include a cooling source such as phase change materials that absorb heat from the wearer when the materials change from a solid to a liquid state [71]. A recent meta-analysis review [24] indicated that cooling garments can improve human performance and reduce body heat strain in stressful thermal environments by lowering core temperature and sweating rate. Therefore, cooling garments are practical in reducing skin temperature without reducing muscle temperature [6], resulting in improved anaerobic performance. Conversely, **other cooling techniques** did not induce a performance benefit. The short exercise duration may explain the absence of a *per-cooling* effect on performance. There may be a thermal strain threshold that must be reached to gain a performance benefit from per-cooling techniques [37]. Previous studies have reported that cooling the neck may be beneficial during intermittent activity in the heat when core temperatures can exceed 39.5◦C [76–79]. Therefore, the effect of cooling in anaerobic protocols depends on the core temperature; cooling is effective from a well-defined threshold of core temperature (39.5◦C) [73,74]. Accordingly, the effect of cooling on anaerobic exercise performance may depend on the length of time that the cooling was performed [67]. Another explanation of the absence of a positive effect of several cooling techniques on anaerobic exercise performance is that 50% of the included studies were performed in temperate conditions; thus, the thermal strain was not sufficient to lower the performance, and the effect of cooling during exercise was not optimal. Thus, the efficacy of *per-cooling* depends on the participant's core temperature, and it has been hypothesized that the higher the temperature value, the greater the performance impact of *per-cooling*. Thus, the impact of cooling on performance measures may be more evident at higher temperatures.

- ***Effect of body area cooled on anaerobic performance***

We found that cooling **the whole body** was the only effective area to enhance anaerobic exercise performance with a small positive effect [SMD (95% CI) = 0.39 (0.12 to 0.66), I^2 = 0.18, p<0.05]. As discussed above, a cooling garment was the best technique to improve anaerobic exercise performance. In the included studies, cooling garments were worn over the entire body; thus, it was logical to observe that cooling the entire body induced the greatest effect compared to other body regions.

However, cooling other body regions did not improve anaerobic exercise performance. For example, LaFata et al. [33] investigated the effect of internal cooling by cold water ingestion on bench repetitions to fatigue, broad jump and total time to exhaustion. They found no improvement in broad jump, unchanged TTE performances tests, and decreased performance of bench press with cold-water ingestion. They explained the absence of performance improvement by the fact that the participant's core temperatures did not reach a high enough temperature. Similarly, head cooling by applying cold packs during brief (5s) and sustained maximal voluntary contractions (MVCs) of the plantar flexors did not induce any beneficial effect on neuromuscular function [80].

Per-cooling induces a performance benefit during aerobic and anaerobic exercises with a greater benefit in aerobic exercises, which agreed with a previous meta-analysis that examined the effects of pre-cooling on subsequent aerobic and anaerobic exercise performance. Cooling prior to exercise has a greater impact on aerobic exercise performance (mean increase in performance = 4.25%) compared to anaerobic performance (mean increase in performance = 0.66%).

5 Conclusion

The present meta-analysis shows that *per-cooling* improves aerobic and anaerobic exercise performance in hot and temperate conditions with a greater effect on aerobic performance. The effectiveness of *per-cooling* depends on the

type of cooling technique and the body site receiving the cooling application.

6 Practical Considerations

In a questionnaire administered before the 2015 World Championships in Beijing, approximately 52% of the athletes had a pre-cooling (before exercise) technique determined in advance. The most chosen technique was ice slurry ingestion, and as a post-cooling intervention (recovery), approximately 47% of the athletes chose cold water immersion [81]. However, athletes did not use cooling during exercise throughout the World Championships. In team sports and tennis matches, athletes can implement *per-cooling* strategies during breaks such as internal methods (ice slurry ingestion) [6], using silicone drink bottles with a wide nozzle that allows access to the ice slurry during cycling-based competitions [82] or pouring cold water (1°C) on the body [83]. Other easy external cooling interventions that are highly practical during exercise include the application of a cooling garment or collar [12,84,85]. Neck cooling collars are practical since they do not restrict body movement, and they are easier to use than cooling other body areas; thus, neck cooling collars are recommended for farm workers to reduce heat strain [86]. In addition, the use of fans and cooling vests might be efficient because they provide cooling without impairing muscle temperature [6]. Thus, cooling individuals during exercise could be practical for team sports such as soccer, rugby and field hockey, which regularly occur in hot conditions, and could utilize a cooling intervention during training, warm-up bouts, and active half-time interventions [9]. Therefore, it seems worth noting that regional cooling yields many advantages involving a lowered cost, better thermal comfort through local cooling (head/neck), using a system with a reduced size, and fewer transport problems. Hence, to ensure an optimal effect of *per-cooling*, the employed cooling device should be a balance of acceptable cooling effect, weight, and mobility [86].

7 Perspectives

The combination of pre-cooling and *per-cooling* may be more effective in improving exercise performance than only a single cooling strategy. This finding was confirmed in a study by Hasegawa et al [87] that showed that the combined effect of pre-cooling and *per-cooling* was superior in improving exercise performance compared to pre-cooling or *per-cooling* alone. Future studies must explore this combined effect in detail. There is a lack of studies that assess the effects of *per-cooling* on performance in elite performers, particularly because athletes with greater aerobic fitness have a slower rate of skin temperature increase and are more able to lose heat via an increased sweat rate during exercise in the heat [88]; this potentially reduces the positive effects of cooling. Therefore, further investigations are necessary to assess the effect of *per-cooling* on exercise performance in the female population. *Per-cooling* is an effective method to improve exercise performance even in the absence of physiological or perceptual responses, albeit its effectiveness is strongly linked to the level of environmental thermal stress and cooling technique and the type of exercise performed.

Funding: The preparation of this article was not supported by any source of funding

Conflicts of interest: none

References:

1. Nybo L, Secher NH. Cerebral perturbations provoked by prolonged exercise. Prog Neurobiol. 2004;72:223–61.
2. Girard O, Racinais S. Combining heat stress and moderate hypoxia reduces cycling time to exhaustion without modifying neuromuscular fatigue characteristics. Eur J Appl Physiol. 2014;114:1521–32.
3. Périard JD, Cramer MN, Chapman PG, Caillaud C, Thompson MW. Neuromuscular function following prolonged intense self-paced exercise in hot climatic conditions. Eur J Appl Physiol. 2011;111:1561–9.
4. Girard O, Brocherie F, Bishop DJ. Sprint performance under heat stress: A review. Scand J Med Sci Sports. 2015;25 Suppl 1:79–89.
5. Grantham J, Cheung SS, Connes P, Febbraio MA, Gaoua N, González-Alonso J, et al. Current knowledge on playing football in hot environments. Scand J Med Sci Sports. 2010;20:161–167.
6. Racinais S, Alonso JM, Coutts AJ, Flouris AD, Girard O, González-Alonso J, et al. Consensus recommendations on training

and competing in the heat. Scand J Med Sci Sports. 2015;25:6–19.
7. Bongers CCWG, Hopman MTE, Eijsvogels TMH. Cooling interventions for athletes: An overview of effectiveness, physiological mechanisms, and practical considerations. Temperature. 2017;4:60–78.
8. Tyler CJ, Sunderland C, Cheung SS. The effect of cooling prior to and during exercise on exercise performance and capacity in the heat: a meta-analysis. Br J Sports Med. 2015;49:7–13.
9. Arngrïmsson SÁ, Petitt DS, Stueck MG, Jorgensen DK, Cureton KJ. Cooling vest worn during active warm-up improves 5-km run performance in the heat. J Appl Physiol. 2004;96:1867–1874.
10. Stevens CJ, Kittel A, Sculley DV, Callister R, Taylor L, Dascombe BJ. Running performance in the heat is improved by similar magnitude with pre-exercise cold-water immersion and mid-exercise facial water spray. J Sports Sci. 2017;35:798–805.
11. Stevens CJ, Bennett KJ, Sculley DV, Callister R, Taylor L, Dascombe BJ. A comparison of mixed-method cooling interventions on pre-loaded running performance in the heat. J Strength Cond Res. 2017;31:620-629
12. Tyler CJ, Sunderland C. Cooling the Neck Region During Exercise in the Heat. J Athl Train. 2011;46:61–8.
13. Kenefick RW, Cheuvront SN, Sawka MN. Thermoregulatory Function during the Marathon. Sports Med. 2007;37:312–5.
14. Tyler CJ, Sunderland C, Cheung SS. The effect of cooling prior to and during exercise on exercise performance and capacity in the heat: a meta-analysis. Br J Sports Med. 2015;49:7–13.
15. Bongers CCWG, Thijssen DHJ, Veltmeijer MTW, Hopman MTE, Eijsvogels TMH. Precooling and percooling (cooling during exercise) both improve performance in the heat: a meta-analytical review. Br J Sports Med. 2015;49:377–84.
16. Ruddock A, Robbins B, Tew G, Bourke L, Purvis A. Practical Cooling Strategies During Continuous Exercise in Hot Environments: A Systematic Review and Meta-Analysis. Sports Med. 2017;47:517–32.
17. Moher D, Liberati A, Tetzlaff J, Altman DG, Group P. Preferred reporting items for systematic reviews and meta-analyses: the PRISMA statement. PLoS Med. 2009;6:e1000097.
18. Jadad AR, Moore RA, Carroll D, Jenkinson C, Reynolds DJM, Gavaghan DJ, et al. Assessing the quality of reports of randomized clinical trials: is blinding necessary? Control Clin Trials. 1996;17:1–12.
19. Maher CG, Sherrington C, Herbert RD, Moseley AM, Elkins M. Reliability of the PEDro scale for rating quality of randomized controlled trials. Phys Ther. 2003;83:713–721.
20. Hedges LV. Distribution Theory for Glass's Estimator of Effect size and Related Estimators. J Educ Stat. 1981;6:107–28.
21. Cohen J. Statistical power analysis for the behavioral sciences. Hilsdale. NJ Lawrence Earlbaum Assoc. 1988;2.
22. Borenstein M, editor. Introduction to meta-analysis. Chichester, U.K: John Wiley & Sons; 2009.
23. Higgins JPT, Thompson SG, Deeks JJ, Altman DG. Measuring inconsistency in meta-analyses. BMJ. 2003;327:557–60.
24. Chan AP, Song W, Yang Y. Meta-analysis of the effects of microclimate cooling systems on human performance under thermal stressful environments: potential applications to occupational workers. J Therm Biol. 2015;49:16–32.
25. Stevens CJ, Taylor L, Dascombe BJ. Cooling During Exercise: An Overlooked Strategy for Enhancing Endurance Performance in the Heat. Sports Med. 2017;47:829–41.
26. Bongers CCWG, Thijssen DHJ, Veltmeijer MTW, Hopman MTE, Eijsvogels TMH. Precooling and percooling (cooling during exercise) both improve performance in the heat: a meta-analytical review. Br J Sports Med. 2015;49:377-84
27. Siegel R, Laursen PB. Keeping Your Cool. Sports Med. 2012;42:89–98.
28. Yeo ZW, Fan PWP, Nio AQX, Byrne C, Lee JKW. Ice slurry on outdoor running performance in heat. Int J Sports Med. 2012;33:859–866.
29. Ansley L, Marvin G, Sharma A, Kendall MJ, Jones DA, Bridge MW. The effects of head cooling on endurance and neuroendocrine responses to exercise in warm conditions. Physiol Res. 2008;57:863.
30. Saunders A, P Dugas J, Tucker R, Lambert M, Noakes T. The effects of different air velocities on heat storage and body temperature in humans cycling in a hot,

humid environment. Acta Physiol Scand. 2005;183:241–55.
31. Yin J, Zheng Y, Wu R, Tan J, Ye D, Wang W. An analysis of influential factors on outdoor thermal comfort in summer. Int J Biometeorol. 2011;56:941–8.
32. Barwood MJ, Davey S, House JR, Tipton MJ. Post-exercise cooling techniques in hot, humid conditions. Eur J Appl Physiol. 2009;107:385.
33. LaFata D, Carlson-Phillips A, Sims ST, Russell EM. The effect of a cold beverage during an exercise session combining both strength and energy systems development training on core temperature and markers of performance. J Int Soc Sports Nutr. 2012;9:44.
34. Mündel T, King J, Collacott E, Jones DA. Drink temperature influences fluid intake and endurance capacity in men during exercise in a hot, dry environment. Exp Physiol. 2006;91:925–33.
35. Stevens CJ, Dascombe B, Boyko A, Sculley D, Callister R. Ice slurry ingestion during cycling improves Olympic distance triathlon performance in the heat. J Sports Sci. 2013;31:1271–9.
36. Burdon CA, Hoon MW, Johnson NA, Chapman PG, O'Connor HT. The Effect of Ice Slushy Ingestion and Mouthwash on Thermoregulation and Endurance Performance in the Heat. Int J Sport Nutr Exerc Metab. 2013;23:458–69.
37. Tyler CJ, Wild P, Sunderland C. Practical neck cooling and time-trial running performance in a hot environment. Eur J Appl Physiol. 2010;110:1063–74.
38. Tyler CJ, Sunderland C. Neck Cooling and Running Performance in the Heat: Single versus Repeated Application. Med Sci Sports Exerc. 2011;43:2388–95.
39. Lee JKW, Koh ACH, Koh SXT, Liu GJX, Nio AQX, Fan PWP. Neck cooling and cognitive performance following exercise-induced hyperthermia. Eur J Appl Physiol. 2014;114:375–84.
40. Eijsvogels TMH, Bongers C, Veltmeijer MTW, Moen MH, Hopman M. Cooling during exercise in temperate conditions: impact on performance and thermoregulation. Int J Sports Med. 2014;35:840–846.
41. Bongers CC, Eijsvogels TM, van Nes IJ, Hopman MT, Thijssen DH. Effects of cooling during exercise on thermoregulatory responses of men with paraplegia. Phys Ther. 2016;96:650–658.
42. Barwood MJ, Corbett J, White D, James J. Early change in thermal perception is not a driver of anticipatory exercise pacing in the heat. Br J Sports Med. 2012;46:936-42.
43. Barwood MJ, Corbett J, White DK. Spraying with 0.20% L-menthol does not enhance 5 km running performance in the heat in untrained runners. J Sports Med Phys Fitness. 2014;54:595–604.
44. Scheadler CM, Saunders NW, Hanson NJ, Devor ST. Palm cooling does not improve running performance. Int J Sports Med. 2013;34:732–5.
45. Grahn DA, Cao VH, Heller HC. Heat extraction through the palm of one hand improves aerobic exercise endurance in a hot environment. J Appl Physiol. 2005;99:972–8.
46. Hsu AR, Hagobian TA, Jacobs KA, Attallah H, Friedlander AL. Effects of heat removal through the hand on metabolism and performance during cycling exercise in the heat. Can J Appl Physiol. 2005;30:87–104.
47. Trong TT, Riera F, Rinaldi K, Briki W, Hue O. Ingestion of a cold temperature/menthol beverage increases outdoor exercise performance in a hot, humid environment. PloS One. 2015;10:e0123815.
48. De Carvalho MV, De Andrade MT, Ramos GP, Maia-Lima A, Pereira ER, Mendes TT, et al. The temperature of water ingested ad libitum does not influence performance during a 40-km self-paced cycling trial in the heat. J Sports Med Phys Fitness. 2015;55:1473–9.
49. Rollo I, Williams C, Gant N, Nute M. The influence of carbohydrate mouth rinse on self-selected speeds during a 30-min treadmill run. Int J Sport Nutr Exerc Metab. 2008;18:585–600.
50. Guest S, Grabenhorst F, Essick G, Chen Y, Young M, McGlone F, et al. Human cortical representation of oral temperature. Physiol Behav. 2007;92:975–984.
51. Burdon C, O'Connor H, Gifford J, Shirreffs S, Chapman P, Johnson N. Effect of drink temperature on core temperature and endurance cycling performance in warm, humid conditions. J Sports Sci. 2010;28:1147–1156.
52. Cotter JD, Taylor NAS. The distribution of cutaneous sudomotor and alliesthesial thermosensitivity in mildly heat-stressed

humans: an open-loop approach. J Physiol. 2005;565:335–45.
53. Nunneley SA, Troutman Jr SJ, Webb P. Head cooling in work and heat stress. Aerosp Med. 1971;42:64–68.
54. Nunneley SA, Reader DC, Maldonado RJ. Head-temperature effects on physiology, comfort, and performance during hyperthermia. Aviat Space Environ Med. 1982;53:623–8.
55. Brown GA, Williams GM. The effect of head cooling on deep body temperature and thermal comfort in man. Aviat Space Environ Med. 1982;53:583-6.
56. Shvartz E. Effect of neck versus chest cooling on responses to work in heat. J Appl Physiol. 1976;40:668–672.
57. Nakamura M, Yoda T, Crawshaw LI, Kasuga M, Uchida Y, Tokizawa K, et al. Relative importance of different surface regions for thermal comfort in humans. Eur J Appl Physiol. 2013;113:63–76.
58. Shvartz NB, others. The incorporation of individual cooling in a compressed-oxygen closed-circuit breathing apparatus. J South Afr Inst Min Metall. 1975;75:322–324.
59. Shvartz E. The application of conductive cooling to human operators. Hum Factors. 1975;17:438–445.
60. Shvartz E, Aldjem M, Ben-Mordechai J, Shapiro Y. Objective approach to a design of a whole-body, water-cooled suit. Aerosp Med. 1974;45:711–715.
61. Nishihara N, Tanabe S, Hayama H, Komatsu M. A cooling vest for working comfortably in a moderately hot environment. J Physiol Anthropol Appl Human Sci. 2002;21:75–82.
62. Vanggaard L, Kuklane K, Holmer I, Smolander J. Thermal responses to whole-body cooling in air with special reference to arteriovenous anastomoses in fingers. Clin Physiol Funct Imaging. 2012;32:463–469.
63. Gao C, Kuklane K, Holmér I. Cooling vests with phase change material packs: the effects of temperature gradient, mass and covering area. Ergonomics. 2010;53:716–723.
64. Shvartz E, Benor D, others. Total body cooling in warm environments. J Appl Physiol. 1971;31:24–7.
65. Young AJ, Sawka MN, Epstein Y, DeCristofano B, Pandolf KB. Cooling different body surfaces during upper and lower body exercise. J Appl Physiol. 1987;63:1218–1223.
66. Filingeri D, Fournet D, Hodder S, Havenith G. Mild evaporative cooling applied to the torso provides thermoregulatory benefits during running in the heat. Scand J Med Sci Sports. 2015;25:200–10.
67. Ranalli GF, DeMartini JK, Casa DJ, McDermott BP, Armstrong LE, Maresh CM. Effect of body cooling on subsequent aerobic and anaerobic exercise performance: a systematic review. J Strength Cond Res. 2010;24:3488–3496.
68. Duffield R, Marino FE. Effects of pre-cooling procedures on intermittent-sprint exercise performance in warm conditions. Eur J Appl Physiol. 2007;100:727–735.
69. Sleivert GG, Cotter JD, Roberts WS, Febbraio MA. The influence of whole-body vs. torso pre-cooling on physiological strain and performance of high-intensity exercise in the heat. Comp Biochem Physiol A Mol Integr Physiol. 2001;128:657–666.
70. Cheung SS, Robinson AM. The influence of upper-body pre-cooling on repeated sprint performance in moderate ambient temperatures. J Sports Sci. 2004;22:605–612.
71. Duffield R, Dawson B, Bishop D, Fitzsimons M, Lawrence S. Effect of wearing an ice cooling jacket on repeat sprint performance in warm/humid conditions. Br J Sports Med. 2003;37:164–169.
72. Butts CL, Smith CR, Ganio MS, McDermott BP. Physiological and perceptual effects of a cooling garment during simulated industrial work in the heat. Appl Ergon. 2017;59:442–448.
73. Morrison S, Sleivert GG, Cheung SS. Passive hyperthermia reduces voluntary activation and isometric force production. Eur J Appl Physiol. 2004;91:729–36.
74. Morrison SA, Sleivert GG, Neary JP, Cheung SS. Prefrontal cortex oxygenation is preserved and does not contribute to impaired neuromuscular activation during passive hyperthermia. Appl Physiol Nutr Metab Physiol Appl Nutr Metab. 2009;34:66–74.
75. Vernieuw CR, Stephenson LA, Kolka MA. Thermal comfort and sensation in men wearing a cooling system controlled by skin temperature. Hum Factors J Hum Factors Ergon Soc. 2007;49:1033–1044.
76. Sunderland C, Nevill M. Effect of the menstrual cycle on performance of intermittent, high-intensity shuttle running in a hot

environment. Eur J Appl Physiol. 2003;88:345–352.
77. Sunderland C, Nevill ME. High-intensity intermittent running and field hockey skill performance in the heat. J Sports Sci. 2005;23:531–40.
78. Morris JG, Nevill ME, Boobis LH, Macdonald IA, Williams C. Muscle Metabolism, Temperature, and Function During Prolonged, Intermittent, High-Intensity Running in Air Temperatures of 33 ° and 17 °C. Int J Sports Med. 2005;26:805–14.
79. Sunderland C, Morris JG, Nevill ME. A heat acclimation protocol for team sports. Br J Sports Med. 2008;42:327–33.
80. Racinais S, Gaoua N, Grantham J. Hyperthermia impairs short-term memory and peripheral motor drive transmission. J Physiol. 2008;586:4751–62.
81. Périard JD, Racinais S, Timpka T, Dahlström Ö, Spreco A, Jacobsson J, et al. Strategies and factors associated with preparing for competing in the heat: a cohort study at the 2015 IAAF World Athletics Championships. Br J Sports Med. 2016; 51:264-270
82. Laursen PB. From science to practice: Development of a thermally-insulated ice slushy dispensing bottle that helps athletes “keep their cool” in hot temperatures. Temperature. 2016;3:187–90.
83. Morris NB, Jay O. To drink or to pour: How should athletes use water to cool themselves? Temperature (Austin). 2016; 3: 191–4.
84. Hasegawa H, Takatori T, Komura T, Yamasaki M. Wearing a cooling jacket during exercise reduces thermal strain and improves endurance exercise performance in a warm environment. J Strength Cond Res. 2005;19:122–128.
85. Luomala MJ, Oksa J, Salmi JA, Linnamo V, Holmér I, Smolander J, et al. Adding a cooling vest during cycling improves performance in warm and humid conditions. J Therm Biol. 2012;37:47–55.
86. Choi J-W, Kim M-J, Lee J-Y. Alleviation of Heat Strain by Cooling Different Body Areas during Red Pepper Harvest Work at WBGT 33℃. Ind Health. 2008;46:620–8.
87. Hasegawa H, Takatori T, Komura T, Yamasaki M. Combined effects of pre-cooling and water ingestion on thermoregulation and physical capacity during exercise in a hot environment. J Sports Sci. 2006;24:3–9.
88. Cheung SS, McLellan TM. Heat acclimation, aerobic fitness, and hydration effects on tolerance during uncompensable heat stress. J Appl Physiol. 1998;84:1731–9.

Figure captions:

Figure 1: Flow chart.
Figure 2: Funnel Plot for aerobic (A) and anaerobic (B) exercise performances.
Figure 3: Effect of cooling techniques on aerobic (A) and anaerobic (B) exercise performances, N: number of subjects; n: number of experimental groups.
Figure 4: Effect of cooled body area on aerobic (A) and anaerobic (B) exercise performance, N: number of subjects; n: number of experimental groups.

Table captions:
Table 1: Effect of per-cooling on aerobic performance.
Table 2: The effect of per-cooling on anaerobic performance.

Table 1: Effect of per-cooling on aerobic performance

Study	Cooled body area	Cooling interventions	Subjects (n)	Ambient temperature (°C)	Exercise type	Exercise protocol	Performance outcomes
Burdon et al. (2010)	Internal	Cold fluid ingestion Ice slurry ingestion	7	28	Cycling	90 min at 65 % $\dot{V}O_2$ peak followed by a 15 min performance test	Significant higher total work and power output (+4.9 ± 2.4%) with cold fluid ingestion No changes with ice slurry ingestion
Burdon et al. (2013)	Internal	Ice slurry ingestion	10	32.1	Cycling	90 min of steady state cycling (62% $\dot{V}O_2$ max) followed by a TT with a resistance of 4 kJ/kg body mass until exhaustion	Significant improvement in exercise time (+10%)
Carvalho et al. (2015)	Internal	Cold fluid ingestion	10	35	Cycling	Self-paced 40 km	No changes in exercise time
Mundel et al. (2006)	Internal	Cold fluid ingestion	8	34	Cycling	Cycling at 65% Wmax until exhaustion	Significant increase in exercise time (+12.7%)
Riera et al. (2014)	Internal	Menthol cooling Ice slurry ingestion	12	30.7 ± 0.8	Cycling	15 min warm up followed by 20 km at VT2	Significant improvement in exercise time (-5.6%) with menthol cooling Significant improvement in exercise time (-6.7%) with ice slurry ingestion
Stevens et al. (2013)	Internal	Ice slurry ingestion	9	32-34	Triathlon (swimming, cycling and running)	10 min warm-up + 1500 m swim at 90% MV + a cycling protocol (8 min at 50%VT1, 3 min at 50%VT2, 2.5 min at 75%VT2 and 1.5 min at 75 % maximal aerobic power) +10 km self-paced TT run	Significant improvement in exercise time (-3%) in running performance
Abdallah et al. (2015)	Whole body	Cooling garment	20	24.5	Cycling	2 min warm-up at 25% MPO followed by 85% MPO until exhaustion	No changes in exercise time
Barwood et al. (2015)	Whole body	Menthol cooling (spray)	8	33.5	Cycling	5 min warm up at 100 W then 16.1 km TT	No changes in exercise time
Kim et al. (2011)	Whole body	Cooling garment Air ventilation	6	35	Running	Three stages of 15 min exercise at 75% $\dot{V}O_2$ max, with 10 min rest following each exercise stage. The exercise was terminated when the participants reached 90% of their maximum heart rate	Significant improvement in exercise time (+56%) with cooling garments No changes in exercise time with air ventilation
Teunissen et al. (2013)	Whole body	Air ventilation	10	28-33	Cycling	15 min incremental test +15 km self-paced TT	Significant power output increase during the incremental test Significant improvement in the finish time (-67 ± 48s) in TT
Wingo et al. (2006)	Whole body	Air ventilation	10	35	Cycling	45 min at 60% $\dot{V}O_2$ max at 35°C with or without cooling followed by a maximal	Significant increase in exercise time (+54%) in the maximal graded exercise test

						graded exercise test	
Barwood et al. (2009)	Torso	Ventilated vest	8	45	Walking	10 min rest followed by walking on treadmill at 5 km.h^{-1} until exhaustion	Significant increase in exercise time (+18%)
Bain et al. (1991)	Torso	Ice vest	6	33	Walking Lifting task	20 min treadmill walk at 4.8 km.h^{-1}, 15 min of a lifting task, 5min rest and another 20 min of lifting task. Repeated until exhaustion	Significant exercise time increase (+11.8%)
Chan et al. (2017)	Torso	Hybrid vest	10	33	Running	Incremental running test until exhaustion	No changes in exercise duration, running distance and power output
Chinevere et al. (2008)	Torso	Ventilated vest	7	35	Walking	Treadmill walk at metabolic rate of 200 W.m^{-2}	Significant increase in exercise tolerance time (+22 %)
Cuttel et al. (2016)	Torso Neck	Ice vest Neck cooled collar	9	35	Cycling	Cycling at 60% MPO until exhaustion	Significant increase in exercise time (+16.6%) with ice vest No changes in exercise time with neck cooling
Eijsvogels et al. (2014)	Torso	Ice vest	10	25	Running	12 min warm up followed by a self-paced 5 km TT	No changes in exercise time
Kenny et al. (2011)	Torso	Ice vest	10	35	Walking	Walking at 3 miles/h with 2% grade on treadmill until volitional fatigue	Significant increase in exercise time (+11.8%)
Luomala et al. (2012)	Torso	Ice vest	7	30	Cycling	Repeated 10 min of exercise (9 min at 60% $\dot{V}O_2$ max and 1 min at 80% $\dot{V}O_2$ max) until exhaustion	Significant increase in exercise time (+21.5%)
McLellan et al. (1998)	Torso	Hybrid vest Ventilated vest	7	40	Walking	Continuous treadmill walking at 3.5 km.h^{-1} until exhaustion	Significant increase in exercise time (+31.7%) with hybrid vest Significant increase in exercise time (+80%) with ventilated vest
McFarlin et al. (2015)	Torso	Cooling garment	14	35	Running	30 min at incremental speed until exhaustion	Significant increase in exercise time (+8%)
Grahn et al. (2005)	Hand	Hand cooling device	6	23-40	Walking	5.63 km/h on a treadmill with a 2% slope increase of every 3 min until exhaustion	Significant increase in exercise time (+11%)
Hirata et al. (1987)	Face	Air ventilation	8	35	Hand grip exercise	Lifting weight at 19-24% of maximal HGS at the rate of 30 contractions per min	Significant increase in the number of contractions (+39%) Significant increase in exercise time (+37 %)
Quirion et al. (1989)	Face	Air ventilation	5	28	Cycling	30 min at 65 % $\dot{V}O_2$ max	No changes in the total work
Schlader et al. (2011)	Face	Air ventilation	12	20.7	Cycling	10 min warm up then 3 min of rest followed by 3 min cycling at 16-fixed RPE until reaching 70 % MPO	Significant increase in total work (+17.8%) Significant increase in power output (+4%)
Stevens et al. (2016)	Face	Water spray	9	33	Running	10 min warm up, 2 min rest, and a self-paced 5 km TT	Significant improvement in exercise time (-2.4%)
Hsu et al.	Hand	Hand cooling	8	31.9	Cycling	Study1: 60 min at 60% $\dot{V}O_2$ peak	Significant improvement in exercise time

(2005)		device				Study2: 30 km TT	(-6%) in TT
Ruddock et al. (2016)	Hand	Cold water immersion	9	35	Cycling	60 min at 50% $\dot{V}O_2$ peak	Significant increase in exercise time with hand immersion at 8°C and 14°C (+7%)
Scheadler et al. (2012)	Hand	Hand cooling device	12	30	Running	Warm-up at 60 % $\dot{V}O_2$ max until central temperature reached 37.5 °C followed by a 75 % $\dot{V}O_2$ max exercise until exhaustion	No effects in exercise duration for reaching the central temperature of 37.5 °C Significant shorter exercise time (-13%) in the cooling condition
Lee et al. (2014)	Neck	Neck cooled collar	12	30.2	Running	75 min at 70 % $\dot{V}O_2$ peak until exhaustion	No changes in exercise time
Minnitti et al. (2011)	Neck	Neck cooled collar	8	30.5	Running	75 min at 60% $\dot{V}O_2$ max followed by a 15 min TT	Significant improvement in the TT distance (+11.3%)
Tyler et al. (2010)	Neck	Neck cooled collar	12	30	Running	Study 1: 75 min at 60% $\dot{V}O_2$ max followed by a 15-min self paced TT Study 2: 15 min TT	Study 1: significant increase in the distance covered (+10.6%) Study 2: No changes in the distance covered
Tyler et al. (2011)	Neck	Neck cooled collar	7	30.4	Running	75 min at 60% $\dot{V}O_2$ max followed by a 15 min TT	Significant longer distance (+7%) in TT
Tyler et al. (2011)	Neck	Neck cooled collar	8	32.2	Running	8 min warm up followed by a running test at 70% $\dot{V}O_2$ max until exhaustion	Significant increase in exercise time (+13.5%)
Mundel et al. (2010)	Mouth rinse	Menthol cooling	9	34	Cycling	Cycling at 65% Wmax until volitional fatigue	Significant increase in exercise time (+9%)
Stevens et al. (2015)	Mouth rinse	Menthol cooling	11	33	Running	10 min warm up followed by a self-paced 5-km TT	Significant improvement in exercise time (-4 %)

Abbreviations: VT2, second ventilatory threshold; MPO, maximal power output; TT, time trial; HGS, handgrip strength; Wmax, peak aerobic power; MV, maximal velocity

Table 2: Effect of per-cooling on anaerobic performance

Study	Cooled body area	Cooling intervention	Subjects (n)	Ambient Temperature (°C)	Exercise protocol	Performance outcomes
Lafata et al. (2012)	Internal	Cold fluid ingestion	45	22	Bench press at 60% of 1RM, 2 x maximal broad jump and time to exhaustion test on bicycle	No changes in broad jump and time to exhaustion tests Significant decrease in bench press repetitions (–3%)
Butts et al. (2017)	Whole body	Cooling garment	20	34.2	2 bouts of 20 min (5 min treadmill walking at 1.3 m/s, 5 min of transporting 11.3 kg boxes, 5 min loosening and tightening six nuts on six bolts 2 times, 5 min of walking over a two-tier stepping apparatus while holding 3.6 kg dumbbells) followed by a maximal performance bout (maximum cycles of carrying boxes, loosening and tightening nuts on bolts and carrying weights over steps)	No changes in the maximal performance bout
Morrison et al. (2004)	Whole body	Cooling garment	22	22 and 35	Sustained MVC (10 s) of the plantar flexors	No changes in MVC and voluntary activation
Morrison et al. (2009)	Whole body	Cooling garment	6	35	10 s maximal isometric knee extension	No changes in voluntary force
Webborn et al. (2008)	Torso	Ice vest	8	32	Intermittent sprint protocol: (10s rest, 5s maximal sprint at PPO, then 105s of AR at 35% $\dot{V}O_2$ max) for 60 min or until exhaustion.	Significant increase in the total number of sprints (+45.6 %)
Endo et al. (2003)	Face	Cold compresses	5	24	Twice 6-min leg cycling exercise at 50% of the difference between lactate threshold and $\dot{V}O_2$ max	Significant improvement in the exercise time with a constant HR (+24 %)
Geurts et al. (2006)	Hand	Cold water immersion	10	25.9	Cycling at 50 % of the age- predicted HRR; neuromuscular functions tests measured before and after exercise	No changes in grip strength, peak twitch force, time to peak and half relaxation time
Racinais et al. (2008)	Head	Cold packs	16	20-50	Neuromuscular testing at rest and during brief (4-5 s) and sustained (120 s) MCV of the plantar flexors. Three conditions were used: 20°C, 50°C and 50°C with cold packs applied on the head	During brief and sustained MVC, torque decreased both in the 50°C and 50°C with cold packs on the head conditions compared with the 20°C condition

Abbreviations: RM, maximal repetition; BJ, broad jump; MVC, maximal voluntary contraction; PPO, peak power output; AR, active recovery; HRR, heart rate reserve

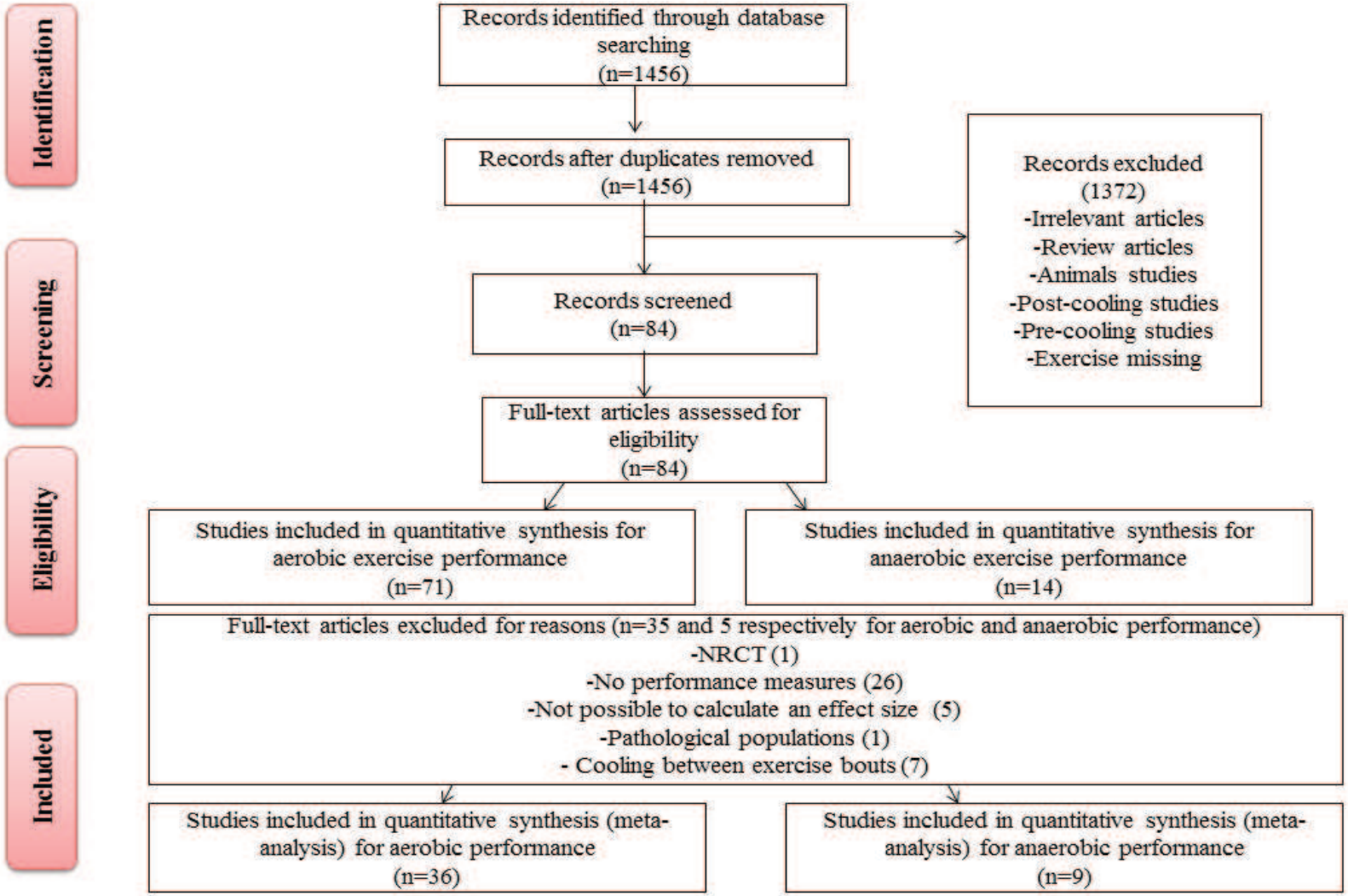


Figure 1: Flow chart.

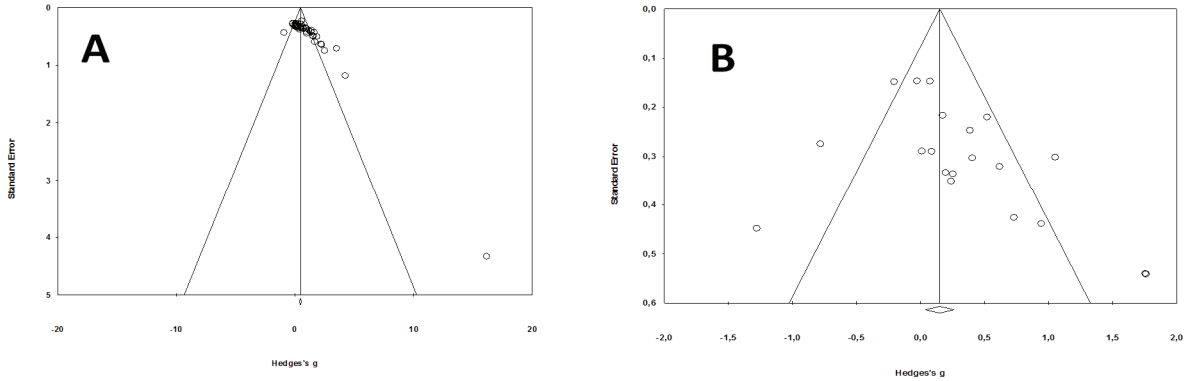


Figure 2: Funnel Plot for aerobic (A) and anaerobic (B) exercise performances.

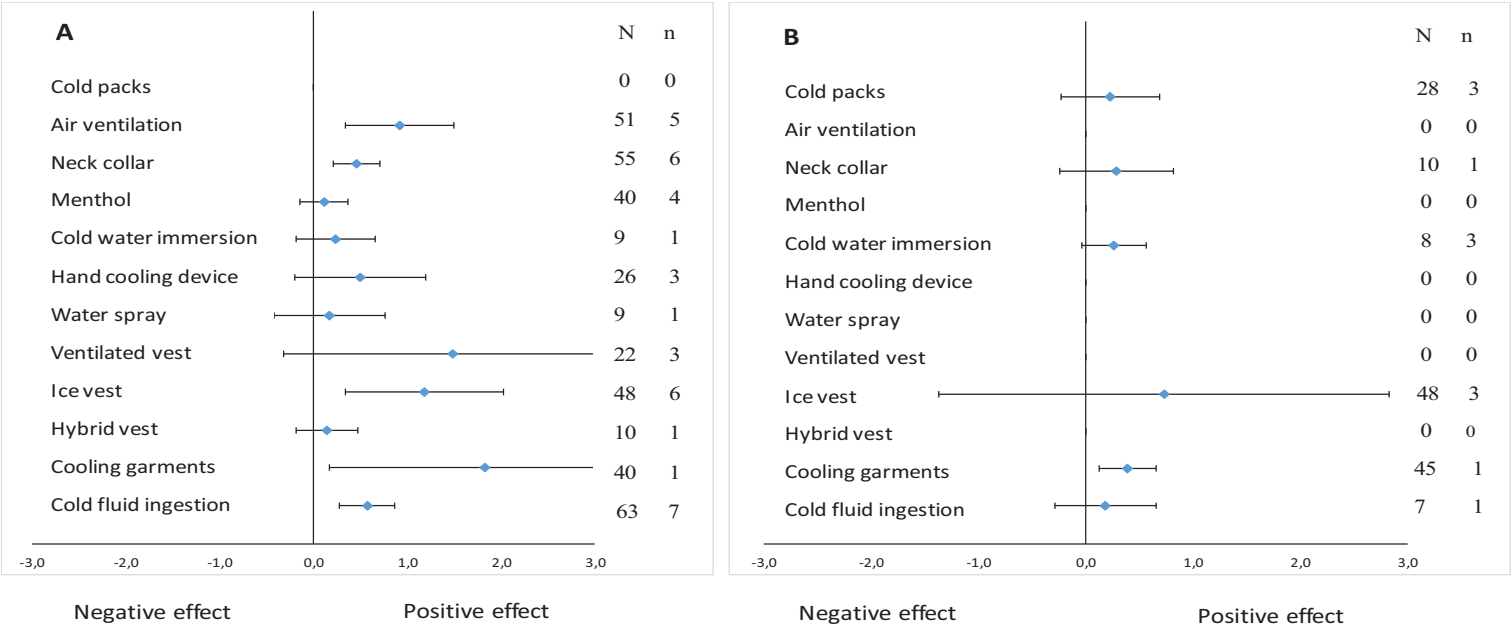


Figure 3: Effect of cooling techniques on aerobic (A) and anaerobic (B) exercise performances, N: number of subjects; n: number of experimental groups

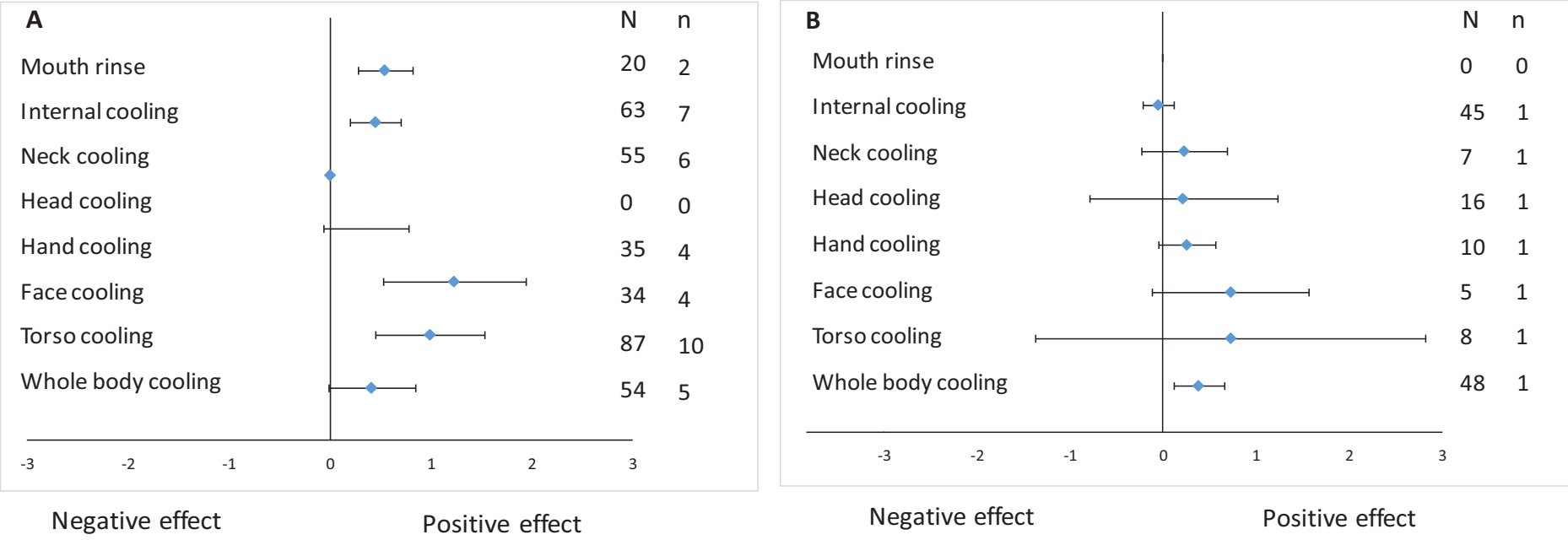


Figure 4: Effect of cooled body area on aerobic (A) and anaerobic (B) exercise performance, N: number of subjects; n: number of experimental groups.

3.2. Étude 2 (per-cooling)

a) Résumé:

Physiological and perceptual responses during submaximal exercise and recovery in ambient temperature: the impact of wearing a new kind of cooling system

Douzi W, Dugué B, Theurot D, Vinches L, Al Sayed C, Hallé S, Dupuy O

❖ Objectif

Etudier l'effet du port d'un nouveau système de refroidissement sur les réponses physiologiques (fréquence cardiaque, échanges gazeux et oxygénation cérébrale et musculaire) et perceptives lors d'un exercice physique sous-maximal chez des sujets sains et actifs.

❖ Sujets et Méthodes

20 sujets sains et physiquement actifs (âge : 23, 65 ± 4,2 ans ; poids : 71, 66 ± 7,02 kg ; taille : 175, 15 ± 5,81cm) ont participé à cette étude. Les sujets participent à trois visites avec une semaine d'intervalle entre chaque visite. Lors de la première visite, les sujets ont effectué un test incrémenté (30 watts toutes les deux minutes) jusqu'à l'atteinte d'une puissance correspondant à 70 % de fréquence cardiaque maximale théorique. Ensuite, les sujets ont participé aléatoirement à deux conditions (Expérimentale : "veste allumé" ; Contrôle " veste éteinte") dans une condition thermo-neutre (22°C, 25%). Au cours des deux conditions, les sujets ont effectué un échauffement de 5 minute suivi de 30 minutes d'exercice à une puissance de travail fixée pendant la première visite (70% de Fc max théorique) et enfin une récupération de 5 min comprend 2 minutes de récupération active (50% de l'intensité de l'exercice) et 3 min de récupération passive. La fréquence cardiaque, les échanges gazeux, l'oxygénation cérébrale et musculaire ont été mesurés en continue pendant l'exercice et la récupération. La température cutanée et la perception de l'effort (RPE) ont été mesurées toutes les 10 minutes lors de l'exercice. Les perceptions de la température, d'humidité et de bien-être ont été relevées à la fin de la récupération.

❖ Résultats

Température cutanée : Nous constatons que le port d'un gilet activé (On) diminue significativement la température cutanée du tronc à la fin de l'exercice et pendant la récupération ($p<0.05$) par rapport à la condition contrôle (Off). Aucune différence n'a été observée pour les autres régions (bras et tête).

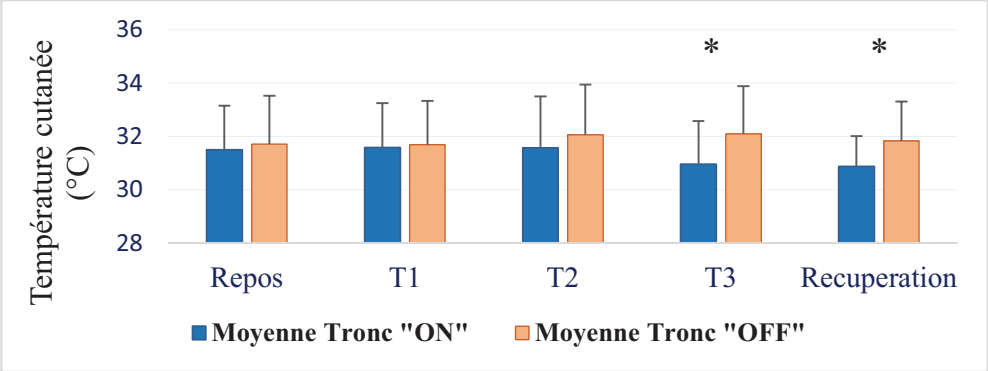


Figure 41 *: Moyennes de la température cutanée du tronc pendant le repos, l'exercice et la récupération avec veste activée (ON) ou désactivée (OFF). * différence significative par rapport au contrôle*

Mesures perceptives : Nous avons observé que le port du gilet activé (On) réduit significativement la perception de la température et de l'humidité et améliore la sensation de bien-être par rapport à la condition contrôle (Off) ($p<0.05$).

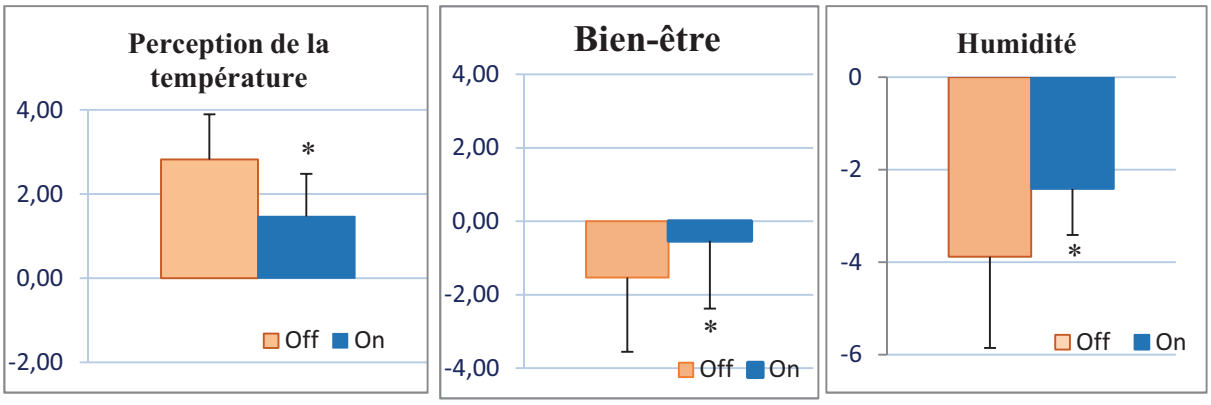


***Figure 42** : Moyennes de la perception de température (a), bien-être (b) et d'humidité (c) pendant l'exercice et la récupération dans les deux conditions. * différence significative par rapport au contrôle (p<0.05)*

Fréquence cardiaque : La fréquence cardiaque n'était pas significativement différente entre les deux conditions pendant l'exercice mais une différence significative a été observé au début de la récupération ($p<0.05$) pour les mesures de T30.

Oxygénation cérébrale et musculaire : Nous obtenons un interaction significative Temps x condition ($p<0.05$) pour les mesures de THb. Nous avons remarqué un THb cérébral plus important en (ON) par rapport au (OFF) au cours de l'exercice ($p<0.05$). Aucune différence significative n'a été observée pour l'oxygénation musculaire.

❖ Discussion

Le port du gilet refroidissant pendant l'exercice sous-maximal et la récupération, permettent d'améliorer les réponses perceptives grâce à une meilleure sensation de bien-être et une réduction de la perception de la température et de l'humidité. Nous avons également observé une réduction du stress physiologique grâce à une diminution de la température cutanée du tronc, une récupération plus rapide de la fréquence cardiaque et une amélioration de l'oxygénation cérébrale.

- Le port d'un gilet refroidissant lors d'un exercice sous-maximal dans un environnement thermo-neutre permet d'améliorer le confort thermique et de réduire le stress physiologique grâce à une diminution de la température cutanée du tronc, une meilleure récupération de fréquence cardiaque et une amélioration de l'oxygénation cérébrale.

b) Article

Physiological and perceptual responses during submaximal exercise and recovery in ambient temperature: the impact of wearing a new kind of cooling system

Douzi W[1], Dugué B[1], Theurot D[1], Vinches L[2], AL Sayed[2], Hallé[2], Olivier Dupuy[1]

[1] Faculty of Sports Sciences, University of Poitiers - Building C6 - 8 allée Jean Monnet - 86073 Poitiers Cedex 9, France.
[2] Department of Mechanical Engineering, École de Technologie Supérieure, 1100 Notre Dame Street West, Montreal, Quebec, Canada H3C 1K3.

(Article sur le point d'être soumis au Scandinavian Journal of Medicine and Sciences in Sport)

Running head: Wearing cooling vest during submaximal exercice improves perceptual and physiological responses in temperate condition.

Corresponding author: Olivier Dupuy, PhD.
Olivier Dupuy, PhD, Université de Poitiers, Faculté des Sciences du Sport et Laboratoire "Mobilité, Vieillissement, Exercice" ; 8 allée Jean Monnet, 86000, Poitiers, France.
E-mail : olivier.dupuy@univ-poitiers.fr.

Abstract:

Many athletes or occupational workers undertake physical activities in extreme conditions in terms of temperature and humidity. The thermal stress developed in such conditions likely hinder physical performance and impose physiological and perceptual strains on human body. Personal cooling systems have been designed as effective ways to reduce heat stress. We aimed to evaluate the effect of an innovative cooling system on perceptual and physiological responses in temperate condition (22°C, 25% relative humidity). A total of 20 physically active men performed a cycling exercise at power corresponding to 70% theoretical maximum heart rate with activated (ON) or not activated (OFF) cooling vest. Heart rate and tissue (cerebral and muscular) oxygenation were measured continuously during exercise and recovery. Skin temperature and perceived exertions (RPE) were measured every 10 minutes during exercise. Perceptions of temperature, wetness and pleasantness were assessed at the end of the recovery. We found a decreased trunk skin temperature ($p<0.05$), a faster heart rate recovery and an increased relative concentration of total hemoglobin ($p<0.05$) compare to control condition. We also observed an improved subjective rating of thermal sensations, wetness and pleasantness compared to control ($p<0.05$) However, we found no differences between condition for RPE. Wearing cooling vest during submaximal exercise improves perceptual and physiological responses in temperate condition.

Introduction:

Many occupational groups such as athletes and workers often perform challenging tasks in hot environmental situations. High body core temperature and heat stress are due to a combination of the metabolic heat production from physical activity, an ambient temperature and sometimes the wearing of protective clothing [1]. This excessive heat stress imposes physiological and perceptual strains on human body, which causes deleterious effects on physical performance [2]. Indeed, excessive increase of body core temperature during exercise has a negative impact on psycho-physiological functions and exercise performance. Moreover, an elevated body core temperature can lead to the prevalence of higher accidents and injury at works/competition and even produces heat illnesses such as heat cramps, heat exhaustion or heat stroke [3].

Although the exact physiological mechanisms that limit exercise performance in hot environments have still not fully understood [4]. several physiological impairments are well documented. It's well recognized that hyperthermia causes central and peripheral physiological perturbations. It has been reported that thermal load induces cerebral changes such as a vascular perturbation (decreased cerebral blood flow and cerebral oxygenation), limiting the heat removal from the brain. Also, neurotransmitters perturbations (dopamine/serotonine) were observed during exercise in hyperthermia. All these cerebral perturbations can lead to reduce the neural drive to locomotive muscles. Furthermore, other physiological peripheral disturbances may be involved such as changes in muscle metabolism and an increased cardiovascular strain. The thermal stress induce a redistribution of a considerable blood quantity toward the skin, which reduces subsequently central blood volume and ultimately decreases cardiac output and stroke volume [5,6]. That may compromise blood flow and oxygen delivery to the muscles, and possibly brain [7,8].

Strategies that can prevent excessive heat stress and reduce the thermal strain during exercise are therefore of high of importance. Indeed, a decrease in skin temperature is essential to improve working conditions, reduce work stress and prevent the risk of accidents. To achieve these objectives, personal cooling systems have been designed as effective ways to reduce heat stress while working or training in a hot environment [9], therefore it seems necessary to overcome the physiological and perceptual problems induced by the heat. It was recognized that cooling the skin may attenuate cardiovascular strain [10] duo to a reduced heart rate and decelerated cutaneous circulation For instance, cooling garments lowered significantly the heart rate and elicited an increased cardiac filling via a cold induced vasoconstriction of the skin, thus allowing for better maintenance of cardiac output (Johnson et al .2014). In this line, wearing a cooling jacket during an exercise in hot condition would reduce fatigue, physiological strain and perceived stress [12].

Furthermore, several studies have shown that cooling during exercise can prolong physical exercise [13–16] and promotes thermal comfort while wearing for example a cooling vest during exercise [17]. Two recents meta-analysis concluded that cooling vest appeared to be the most effective method in performance improvement [13,14]. Therefore, it was established that cooling vest is an efficient cooling technique since it was used in a relatively large body surface [13]. As shown by Choi et al [18] who demonstrated that the vest (torso cooling) with a cooling area of only 3.3% body surface area (BSA) was effective in alleviating heat strain in a simulated harvest work. Accordingly, torso cooling was recognized as an efficient technique to reduce physiological strain [12] and improve thermal comfort [17]. However, the exact physiological mechanism explaining the improvement of physical performance [13].

However, using cooling vest differs with respect to cooling technique such as cooling vest using cold packs [17,19], ice packs [12,20] and ventilated vest [21,22]. It was shown that cooling vest with a ventilation system was very effective in alleviating heat strain, as found by Chinevere et al, who reported that the use of an air body ventilation system (torso-vest) reduce physiological strain in three environments, with temperature ranged from 30 °C to 40 °C and humidity ranged from 20 % to 75 %, with a

similar amount. This finding was in agreement with other previous works which highlighted a beneficial effect of ambient forced ventilation [23,24]. Therefore, cooling vest involving ventilation system has been shown to provide a persistent cooling effect during physical exercise [25].

Based on the fact that there are lacking or contradictory data concerning the effect of cooling during exercise on cerebral and peripheral responses, we aimed to evaluate the effect of an innovative cooling system based on the combination of fan system and thermoelectric technology, on skin temperature, on perceptual and on physiological (cerebral and peripheral) responses. Since the physiological responses to cooling depend on the environmental conditions and the responses are unclear in the thermo-neutral condition, this study take place under thermo-neutral conditions.

Methods:

Subjects:

Twenty healthy and physically active (3-6 hours/week) subjects (age: 23, 65 ± 4.2 years; Weight: 71, 66 ± 7.02; Height: 175, 15 ± 5.81) have voluntarily participated in the study. They were informed of the experiment objective, all associated risks, and they provided their written informed consent prior the experiment. Participants were refrained from heavy exercise for one day before the experiment; coffee and alcohol were forbidden 12 hours before the experiment. This protocol has been evaluated and accorded by an ethical committee.

Preliminary test:

During the first visit, we calculated the theoretical maximal heart rate (220-age). The heart rate (HR) was monitored continually using heart rate monitor (Polar RS800CX, Finland), the subject starts pedalling at 30 watt with an incrementation of 30 watt every two minutes until a target power corresponding to its theoretical 70% HR max using a Monark bicycle ergometer (Monark LC6 Novo, Vansbro, Sweden). The same ergometer was used in all experiments and the saddle was adjusted according to the participant's height before each experiment. 5 min after the test the subject was asked to pedal 6 min at the power found (theoretical 70% HR max) and at the end his RPE was asked, if his perception of the task difficulty is greater than 5-6 in the Borg scale and according to its reached heart rate, 15 watts is reduced which corresponds to a half-stage.

Experimental protocol:

Two different cycling tests were performed with a 1-week interval between trials using a randomized crossover design. The control trial was completed with deactivate cooling vest (Vest off) and the cooling vest was activated during the experimental trial (Vest on). The two experiments were carried out under thermoneutral condition (temperature T°=22 °C; humidity RH=25 %). the same volume of water given before the start of the experiment to ensure the similarity of test protocol for subjects. Each subject was tested at the same hour to minimize the effects of the circadian rhythm on the Tc and heart rate [17,26].

Before each experiment, the weight and the water mass were measured by a body composition analyser (Tanita BC 418 MA - Tokyo, Japan), After explanation of several perceptual scale, the subject was allowed to rest for 5 min in order to take the baseline measurements. During the warm-up, subjects cycled 5 min at 50% of the target power set in the preliminary test, then the power was adjusted to the value found during the first visit (the power corresponding to its theoretical 70% Fc max) for 30 minutes and finally a recovery of 5 min comprised 2min of active recovery (50 % of exercise intensity) and 3 min o passive recovery, then subjects were retaken for an impedance measurement. In the experiment test, subjects wear the cooling vest activated ("vest on") during the exercise and the recovery, in the control condition, the cooling vest was turned off ("vest off").

Materials and Measurements

Heart rate responses and parasympathetic reactivation: HR was assessed continuously during exercise and recovery using heart rate monitor (Polar RS800CX, Finland). During recovery we also measured parasympathetic control using the slope of the regression line during the 30, 60 and 120 seconds of the

recovery period (Dupuy et al, 2013, Imai et al, 1994, Buchheit et al, 2007).

Skin temperature: of the head, trunk and arms were measured at rest, every 10 minutes during exercise and during recovery (at the end) with infrared thermal camera Fluke TIS (Mississauga, Canada). Subjects were instructed to stand in front of the thermal camera with palms open and head straight, the picture comprised the forehead and the upper thighs, SmartView™ software allowed the pictures analysis to assess the mean skin temperature in the head, trunks and arms.

Ventilatory and gas exchanges: were recorded continuously throughout "vest on" (EXP) and "vest off" (CON) with METAMAX® 3B (cortex biophysik gmbh leipzig, Germany), the device was calibrated before each experiment, parameters were chosen for analysis were oxygen uptake (VO2), carbon dioxide production (VCO2), respiratory rate (RR), respiratory quotient (RQ= VCO2/VO2), ventilation (VE), tidal volume (VT).

Fluid loss: To calculate the fluid loss, body mass was measured at baseline and directly after completion of exercise protocol [17] with Tanita (BC 418 Tokyo, Japan), to ensure the similarity of condition, participant drink the same volume of water before the experiment in the two condition.

Cerebral and muscular oxygenation: were measured continuously for the duration of the protocol (rest, exercise and recovery) by the near infrared spectroscopy (NIRS) (Oxymon Mk III, Zetten, The Netherlands). It is a non-invasive optical imaging technique whose principle is the absorbance of light at different wavelengths, by oxygenated hemoglobin (oxy-Hb) and deoxygenated hemoglobin (deoxy-Hb), and from the absorbed amount of light, oxy-Hb and deoxy-Hb concentrations, respectively, can be calculated either at the cerebral or muscular level [27]. For cerebral oxygenation, the probes were attached to the left prefrontal cortex (Fp2 using 10/20 system), The distance between probe and detector was set to 4 cm [28] and for muscular oxygenation, light transmitting and receiving optodes were connected and positioned longitudinally on the medial axis of the vastus lateralis (VL) ~10 cm above the knee joint [29], to avoid movement and outer sources of light that can disturb the signal, an elastic bandage wrapped around the optodes. In the cerebral and muscular sites, this device provides concentration changes (Δμmol/L) in oxygenated (HbO2), deoxygenated (HHb), total (THb) hemoglobin and the difference between [HbO2] and [HHb] ([diffHb]) as well as tissue oxygenation saturation index (TSI (%)) that reflect a measure of oxygen saturation independent of blood volume changes in cerebral/muscular tissue [30]. NIRS data were collected at one-second intervals continuously at rate of 10 Hz.

Subjective rating of thermal, wetness and pleasantness sensations: were estimated after the finish of the recovery period, participant was asked to provide their overall perception throughout the exercise and the recovery. Rating scores for thermal perception ranged between (-6: very cold and 4: warm), for wetness it ranged from (-6: dripping wet to 4: dry) and pleasantness score ranging from (-6: Very unpleasant to 4: pleasant) (Filingeri et al, 2014). Thermal and wetness sensations are good markers for determining the effectiveness of this cooling system in real workplaces (Chan et al. 2013)

Rating of perceived exertion : was assessed every 10 minutes during the cycling exercise by the 10-point BORG category scale, in which 0 corresponded to rest ("no effort") and 10 to maximal exertion [17,32]

Cooling system:

In the two conditions EXP ("vest on") and CON ("vest off"), participants wear the Mawashi Advanced Personal Thermoregulation System (APTS-P5, Canada) presented in the Figure 1, the system uses a combination of two smart body cooling systems that evaporates perspiration and evacuates excessive heat. The first system is a fan system that evaporates perspiration and evacuates excessive heat; the second system is a controllable state-of-the-art thermoelectric module. It transmits heat or cold by conduction, depending on user preference. This device reaches its maximum efficiency when both systems are active together, creating a controllable microclimate regulator. Cooling vest was worn close to the skin because it was be indicated that heat loss is greater with no T-shirt

worn under the vest (Q =180Wm^{-2}) than with a T-shirt worn under the vest (Q =120Wm^{-2}) [33], As a consequence, the trials were conducted with the vest worn directly on the skin.

Statistical analysis

Standard statistical methods were used for the calculation of means and standard deviations. Normal Gaussian distribution of the data was verified by the Shapiro–Wilk test and homoscedasticity by a modified Levene's Test. The compound symmetry, or sphericity, was checked by the Mauchly's sphericity test. When the assumption of sphericity was not met, the significance of F-ratios was adjusted according to the Greenhouse–Geisser procedure when the epsilon correction factor was < 0.75, or according to the Huynh-Feldt procedure when the epsilon correction factor was > 0.75. On each physiological measure, we performed a two-way analysis of variance with repeated measures (ANOVA: Condition (ON/OFF) × Time). Multiple comparisons were made with the Fisher's Least Significant Difference (LSD) post-hoc test. We also performed student test to perform comparison between condition for perceptual response and temperature. The significance level was set at $p < 0.05$ for all analyses.

Results

We found in this study, a lower skin temperature at the end of the exercise and at the end of the recovery only for the trunk ($p<0.05$). We found no difference between condition for the head and the arms. All skin temperature results are presented in the Table 1.

Also, for perceptual responses we found a significant lower thermal sensation score, lower score of perception of wetness and greater pleasantness sensation with activated vest compared to the control condition ($p<0.05$). However, we found no differences between condition for RPE. All these results are presented in the Figure 2.

Concerning the oxygen uptake and ventilatory responses, we found only a main effect of time ($p<0.05$) but no difference between condition. These results are presented in the Figure 3.

Regarding heart rate response, we found no differences between conditions during exercise, but we found a faster heart recovery (T30) during the condition "ON" ($p<0.05$) (Figure 4).

All results concerning the muscular and cerebral oxygenation are presented in the Figure 5 and Figure 6. We found for all measures a main effect of time ($p<0.05$). We found no differences between conditions for all muscular responses. However, we found a significant interaction between condition and time for cerebral ThB ($p<0.05$) during exercise. The increases of ThB during the condition "ON" are greater than the condition "OFF".

Discussion

The aim of this study was to examine the effect of wearing a new cooling vest on perceptual and physiological responses during submaximal exercise and recovery in temperate condition (22°C). The most important findings are that wearing a ventilated cooling vest during exercise and recovery under temperate condition (T°=22 °C; humidity RH=25 %) (1) improved perceptual sensations of temperature, comfort and humidity, (2) accelerated the heart rate recovery (3) decreased the trunk skin temperature at the end of exercise and during recovery and (4) allowed a better cerebral oxygenation.

The cooling vest used in this study implies a ventilation system, and it has recently been shown that this type of vest is an effective strategy for the dissipation of the heat during physical work Therefore, subjects may be feel comfortable with this cooling vest during exercise and recovery compared to ice vest which may cause discomfort and invoke severe cooling stimulus with a risk of erythema [34]. Hence, ventilated vest could has a beneficial effect on the reduction of physiological strain during exercise and post exercise recovery (Chan et al. 2017) by increasing sweat evaporation and decreasing the levels of thermal and cardiovascular stress [36,37].

First of all, the present study demonstrated that wearing the activated cooling vest reduce significantly trunk skin temperature at the end of the exercise and during recovery, while those of

the arms and the head were not affected as shown by previous works [33,38]. This results was expected since the evaporative vest is focused on the torso, therefore the most important changes in skin temperature were observed in this area [33]. According to a previous study [25] local regions where the air ventilation fans placed underwent the highest cooling in comparison with other local regions. Additionally, the reduced temperature of the trunk can be explained by the great vascularization of this zone, indeed its exposure to the cold allows the cooling of substantial quantities of blood [39]. Our results were consistent with those observed in a previous study conducted in temperate condition (25°C). This study demonstrated that cooling vest decrease significantly the chest temperature during 5-km time trial [17]. This result is very interesting since the relation between cooling and skin temperature are not clear (Bongers al, 2013) and reduced skin temperature are almost of importance. Indeed, skin temperature was a strong factor influencing perceived sensations and exertions rather than core temperature [40] since thermal sensation could impact physiological functions (Cheung et al,)

It's well known that thermal sensation rises during exercise simultaneous to the increase of the metabolic heat production. Cooling the skin was proposed to be a suitable solution to improve thermal sensations in participants [3]. The cooling vest used in the present study consists of active cooling (ventilation) known to stimulate heat loss and provide a freshness feeling [35]. Additionally, the chest and back are two large body areas sensitive to cold. Cooling these body areas through a cooling vest can result in improved thermal sensation [17,41]. Therefore, participants feel cooler and drier when wearing the activated cooling vest compared to the control. This improved thermal sensation rating may be explained either by the capacity of ventilated vest to enhance the coldness sensation, or by the large sensitivity of the chest to cold [42]. Indeed, it has been proposed that the exposure of the cutaneous cold receptors to cold stimulus acts to lower the perception of the thermal sensation [43]. Our results were consistent with previous investigations using ventilated-ambient air cooling during exercise and recovery [22,24,37]. It should be noted that previous studies have been mainly conducted in hot condition, they have suggested that air-cooling improve comfort and reduce the heat strain either in sport [44] or in military work (Barwood et al .2009). However, we did not observe any difference in perceived exertion between the two conditions. RPE increases during exercise, however the cooling vest was ineffective to reduce it, as found in a previous study conducted in temperate condition (25°C) [17]. Likewise, other studies have reported that the use of ventilated vest did not affect rating of perceived exertion under different ambient condition [33,37]. Accordingly, wearing cooling vest has been reported to be ineffective in reducing perceived exertion in cycling exercise even in warm and humid condition [12,38]. This finding may be explained by the fact that the rating of perceived exertion is largely dependent upon the intensity of exercise (Chan et al. 2017; Borg 1962) which was constant in the present protocol.

In agreement with the results from RPE, we found no effect of activated vest on oxygen consumption or on ventilation. A recent study conducted in the same environmental condition as the present study, found that mild body cooling during moderate exercise did not report an oxygen consumption changes during exercise [46]. Likewise, these results were consistent with previous studies using cooling vest in hot condition [34,38].

Reduced skin temperature and perceptual responses during this study were associated to improvement of physiological responses. The present study showed that wearing an activated cooling vest did not change the average heart rate during exercise but allows a faster recovery of heart rate compared to the control condition. The results are contradictory concerning the impact of cooling vest on heart rate responses (Bongers et al, 2013). The lack of heart rate reduction during exercise has been demonstrated in previous studies using cooling vests [34,47]. It was assumed that the superficial cooling as used in the present study was not useful in reducing cardiovascular strain [3]. Most studies which reported a decrease in heart rate during exercise

were systematically conducted in extreme environments in terms of temperature and humidity [20,33,48]. Our results were in agreement with previous studies reporting no beneficial effect of cooling vest on heart rate changes during exercise but a slight decrease of HR at the end of exercise and during recovery [12,34] (Zhao et al, 2017). Mechanisms underlying the faster recovery of the heart rate are numerous. A previous study using a cooling vest during recovery [49] indicated that the reduced heart rate might be explained by the peripheral vasoconstrictor effect of the skin cooling, which may lead to an increased central blood volume [46] and a reduced heart rate [34,50]. However, we found no decreases of heart rate at the end of the exercise. Another explanation for reduced heart rate during recovery is an enhanced parasympathetic response as observed in a previous study which reported that skin cooling allows for better parasympathetic reactivation after exercise, they quantify this improvement [51]. This better parasympathetic reactivation was probably associated to perceptual sensation and reduced skin temperature. The thermal sensation could have an impact of central nervous system and have a positive impact on cardiac autonomic control of the heart.

Currently, the effect of cooling on tissue oxygenation is not known. To the best of our knowledge, this study is the first to examine the effect of wearing a cooling vest on cerebral (prefrontal cortex) and muscular oxygenation. Regarding cerebral oxygenation changes, we observed a significant interaction between condition and time on the relative concentrations of total hemoglobin. Skin cooling, through applying a cooling vest, has been reported to reduce the skin blood flow [52] owing to a peripheral vasoconstriction and a stimulation of sympathetic nervous system. Hence, the blood flow may be redirected from the skin to central organs such as the brain [53], influencing thereby the cerebral blood flow. It is necessary to keep in mind that the NIRS signals depend to the skin blood flow changes [54,55]. A previous work [28] has reported a strong correlation between changes in cerebral oxygenation and forehead skin blood flow changes when applying facial cooling during moderate intensity steady state cycling exercise (60 % HR max). These authors concluded that NIRS signals was strongly influenced by thermoregulatory changes in skin blood flow. This finding was confirmed by another study [56] which examined the changes in cerebral oxygenation under different environmental conditions, authors concluded that prefrontal cortex oxygen saturation (TSI) was maintained in cold condition (18°C) but declined in hot conditions (40°C). Accordingly, applying cooling during exercise may increase central blood volume, resulting in increased cerebral blood flow and cerebral oxygen availability [56]. These results are almost of importance since the decrease in cerebral oxygenation could be associated to central fatigue and causes the end of the exercise. Concerning the muscle oxygenation, the lack of results is in accordance with results from oxygen consumption and perception of exertion. In this study, we have no observe any positive results of the cooling vest on metabolic system associated to the same perception of difficulty of exercise

Our results not seem to be associated to fluid loss since we found no impact of cooling vest on body weight. A previous study demonstrated that fluid loss remained unchanged while wearing a cooling vest during cycling exercise at 60% maximal power output until exhaustion in hot condition (Cuttell et al.2016). Likewise, another work [17] conducted in the same environmental condition as the present study, reported that fluid loss was unaffected by wearing a cooling vest. The lack of fluid loss while wearing the cooling vest may be explained by the fact that sweat evaporation might be inhibited because of the insulation of the vest

Limitations.

The lack of change in some variables (such as the metabolic changes, fluid loss and the tissue oxygenation) is probably due to the moderate ambient condition (22 ° C) under which subjects performed the cycling exercise. A previous study mentioned that the cooling capacity of cooling vest is more pronounced with higher heat load [17]. In the same frame, precooling studies demonstrated that cycling performance and

thermoregulatory responses were enhanced in environmental temperatures of 30 °C, but not at 25 °C [12,52,58]. Also, the authors recognized that rectal of tympanic temperature are not but taken account but we have hypotheses that reduced skin temperature and thermal sensations could have an impact on physiological responses as mentioned by Cheung et al [1]

Conclusion

Wearing cooling vest during submaximal exercise under temperate condition (22%, 25% relative humidity) improve thermal comfort by reducing the perceptions of temperature and wetness and by enhancing the pleasantness sensation. Regarding physiological responses, this new personnel cooling vest seems to reduce the trunk temperature during exercise and recovery and to allow a greater cerebral oxygenation and a faster heart rate recovery. Further studies are warranted to investigate the underlying mechanism of the improvement of cerebral oxygenation while wearing cooling vest and to examine whether cognitive capacities can be affected.

Acknowledgements:

The authors would like to thank the volunteers who participated in this study.

References

1. Cheung SS, Lee JKW, Oksa J. Thermal stress, human performance, and physical employment standards. Appl Physiol Nutr Metab Physiol Appl Nutr Metab 2016;41:S148-164.
2. Nybo L, Rasmussen P, Sawka MN. Performance in the heat-physiological factors of importance for hyperthermia-induced fatigue. Compr Physiol 2014;4:657–689.
3. Cleary MA, Toy MG, Lopez RM. Thermoregulatory, cardiovascular, and perceptual responses to intermittent cooling during exercise in a hot, humid outdoor environment. J Strength Cond Res 2014;28:792–806.
4. Tyler CJ, Sunderland C, Cheung SS. The effect of cooling prior to and during exercise on exercise performance and capacity in the heat: a meta-analysis. Br J Sports Med 2013;bjsports–2012.
5. Périard JD, Racinais S. Heat stress exacerbates the reduction in middle cerebral artery blood velocity during prolonged self-paced exercise. Scand J Med Sci Sports 2015;25 Suppl 1:135–144.
6. Trinity JD, Pahnke MD, Lee JF, Coyle EF. Interaction of hyperthermia and heart rate on stroke volume during prolonged exercise. J Appl Physiol 2010;109:745–751.
7. González-Alonso J, Dalsgaard MK, Osada T, Volianitis S, Dawson EA, Yoshiga CC, Secher NH. Brain and central haemodynamics and oxygenation during maximal exercise in humans. J Physiol 2004;557:331–342.
8. Rasmussen P, Stie H, Nybo L, Nielsen B. Heat induced fatigue and changes of the EEG is not related to reduced perfusion of the brain during prolonged exercise in humans. J Therm Biol 2004;29:731–737.
9. Guo T, Shang B, Duan B, Luo X. Design and testing of a liquid cooled garment for hot environments. J Therm Biol 2015;49:47–54.
10. Reilly T, Drust B, Gregson W. Thermoregulation in elite athletes. Curr Opin Clin Nutr Metab Care 2006;9:666–671.
11. Johnson JM, Minson CT, Kellogg DL. Cutaneous vasodilator and vasoconstrictor mechanisms in temperature regulation. Compr Physiol 2014;
12. Luomala MJ, Oksa J, Salmi JA, Linnamo V, Holmér I, Smolander J, Dugué B. Adding a cooling vest during cycling improves performance in warm and humid conditions. J Therm Biol 2012;37:47–55.
13. Bongers CCWG, Thijssen DHJ, Veltmeijer MTW, Hopman MTE, Eijsvogels TMH. Precooling and percooling (cooling during exercise) both improve performance in the heat: a meta-analytical review. Br J Sports Med 2015;bjsports-2013-092928.
14. Tyler CJ, Sunderland C, Cheung SS. The effect of cooling prior to and during exercise on exercise performance and capacity in the heat: a meta-analysis. Br J Sports Med 2015;49:7–13.
15. Ross M, Abbiss C, Laursen P, Martin D, Burke L. Precooling methods and their effects on athletic performance. Sports Med 2013;43:207–225.
16. Duffield R. 2008. Cooling interventions for the protection and recovery of exercise performance from exercise-induced heat stress. In: Thermoregulation and human performance. Karger Publishers, 89–103.
17. Eijsvogels TMH, Bongers C, Veltmeijer MTW, Moen MH, Hopman M. Cooling during exercise in temperate conditions:

impact on performance and thermoregulation. Int J Sports Med 2014;35:840–846.
18. Choi JW, Kim MJ, Lee JY. Alleviation of Heat Strain by Cooling Different Body Areas during Red Pepper Harvest Work at WBGT 33°C. Ind Health 2008;46:620–628.
19. Cuttell SA, Kiri V, Tyler C. A Comparison of 2 Practical Cooling Methods on Cycling Capacity in the Heat. J Athl Train 2016;51:525–532.
20. Kenny GP, Schissler AR, Stapleton J, Piamonte M, Binder K, Lynn A, Lan CQ, Hardcastle SG. Ice Cooling Vest on Tolerance for Exercise under Uncompensable Heat Stress. J Occup Environ Hyg 2011;8:484–491.
21. Barwood MJ, Newton PS, Tipton MJ. Ventilated Vest and Tolerance for Intermittent Exercise in Hot, Dry Conditions With Military Clothing. Aviat Space Environ Med 2009;80:353–359.
22. Chinevere TD, Cadarette BS, Goodman DA, Ely BR, Cheuvront SN, Sawka MN. Efficacy of body ventilation system for reducing strain in warm and hot climates. Eur J Appl Physiol 2008;103:307–314.
23. Chen YT, Constable SH, Bomalaski SH. A Lightweight Ambient Air-Cooling Unit for Use in Hazardous Environments. Am Ind Hyg Assoc J 1997;58:10–14.
24. Muza SR, Pimental NA, Cosimini HM, Sawka MN. Portable, Ambient Air Microclimate Cooling in Simulated Desert and Tropic Conditions. ARMY RESEARCH INST OF ENVIRONMENTAL MEDICINE NATICK MA, ARMY RESEARCH INST OF ENVIRONMENTAL MEDICINE NATICK MA; 1987.
25. Zhao M, Gao C, Wang F, Kuklane K, Holmér I, Li J. A study on local cooling of garments with ventilation fans and openings placed at different torso sites. Int J Ind Ergon 2013;43:232–237.
26. Weinert D, Waterhouse J. The circadian rhythm of core temperature: effects of physical activity and aging. Physiol Behav 2007;90:246–256.
27. Villringer A, Planck J, Hock C, Schleinkofer L, Dirnagl U. Near infrared spectroscopy (NIRS): a new tool to study hemodynamic changes during activation of brain function in human adults. Neurosci Lett 1993;154:101–104.
28. Miyazawa T, Horiuchi M, Komine H, Sugawara J, Fadel PJ, Ogoh S. Skin blood flow influences cerebral oxygenation measured by near-infrared spectroscopy during dynamic exercise. Eur J Appl Physiol 2013;113:2841.
29. Gagnon DD, Peltonen JE, Rintamäki H, Gagnon SS, Herzig KH, Kyröläinen H. The effects of skin and core tissue cooling on oxygenation of the vastus lateralis muscle during walking and running. J Sports Sci 2017;35:1995–2004.
30. Morrison SA, Sleivert GG, Neary JP, Cheung SS. Prefrontal cortex oxygenation is preserved and does not contribute to impaired neuromuscular activation during passive hyperthermia. Appl Physiol Nutr Metab Physiol Appl Nutr Metab 2009;34:66–74.
31. Chan APC, Yang Y, Wong DP, Lam EWM, Li Y. Factors affecting horticultural and cleaning workers' preference on cooling vests. Build Environ 2013;66:181–189.
32. Borg G. Borg's Perceived Exertion and Pain Scales. Human Kinetics; 1998. 124 p.
33. Ciuha U, Grönkvist M, Mekjavic IB, Eiken O. Strategies for increasing evaporative cooling during simulated desert patrol mission. Ergonomics 2016;59:298–309.
34. House JR, Lunt HC, Taylor R, Milligan G, Lyons JA, House CM. The impact of a phase-change cooling vest on heat strain and the effect of different cooling pack melting temperatures. Eur J Appl Physiol 2013;113:1223–1231.
35. Chan APC, Yang Y, Wong FKW, Yam MCH, Wong DP, Song WF. Reduction of physiological strain under a hot and humid environment by a hybrid cooling vest. J Strength Cond Res 2017;Publish Ahead of Print:
36. Hadid A, Yanovich R, Erlich T, Khomenok G, Moran DS. Effect of a personal ambient ventilation system on physiological strain during heat stress wearing a ballistic vest. Eur J Appl Physiol 2008;104:311–319.
37. Hadid A, Fuks Y, Erlich T, Yanovich R, Heled Y, Azriel N, Moran DS. EFFECT OF A PERSONAL AMBIENT VENTILATION SYSTEM ON PHYSIOLOGICAL STRAIN DURING HEAT STRESS WEARING BODY-ARMOUR. Environ Ergon XIII 2009;252.
38. Smolander J, Kuklane K, Gavhed D, Nilsson H akan, Holmér I. Effectiveness of a light-

weight ice-vest for body cooling while wearing fire fighter's protective clothing in the heat. Int J Occup Saf Ergon 2004;10:111–117.

39. Shvartz E. Effect of neck versus chest cooling on responses to work in heat. J Appl Physiol 1976;40:668–672.
40. Maw GJ, Boutcher SH, Taylor NA. Ratings of perceived exertion and affect in hot and cool environments. Eur J Appl Physiol 1993;67:174–179.
41. Filingeri D. Neurophysiology of skin thermal sensations. Compr Physiol 2016;
42. Nishihara N, Tanabe S ichi, Hayama H, Komatsu M. A cooling vest for working comfortably in a moderately hot environment. J Physiol Anthropol Appl Human Sci 2002;21:75–82.
43. Cheung SS. Interconnections between thermal perception and exercise capacity in the heat. Scand J Med Sci Sports 2010;20 Suppl 3:53–59.
44. Teunissen LPJ, Haan A de, Koning JJ de, Daanen H a. M. Effects of wind application on thermal perception and self-paced performance. Eur J Appl Physiol 2013;113:1705–1717.
45. Borg GA. Physical performance and perceived exertion. Gleerup Lund; 1962.
46. Konishi M, Tabata H, Ando K, Kim HK, Nishimaki M, Xiang M, Sakamoto S, Tsai SF, Kao YH, Huang YC. Mild Decrease in Skin Temperature Reduces the Heart Rate during Moderate Exercise. J Sports Sci 2017;5:305–312.
47. Gao C, Kuklane K, Holmér I. Cooling vests with phase change materials: the effects of melting temperature on heat strain alleviation in an extremely hot environment. Eur J Appl Physiol 2011;111:1207–1216.
48. Hasegawa H, Takatori T, Komura T, Yamasaki M. WEARING A COOLING JACKET DURING EXERCISE REDUCES THERMAL STRAIN AND IMPROVESENDURANCE EXERCISE PERFORMANCE IN A WARM ENVIRONMENT. J Strength Cond Res 2005;19:122–128.
49. Hausswirth C, Duffield R, Pournot H, Bieuzen F, Louis J, Brisswalter J, Castagna O. Postexercise cooling interventions and the effects on exercise-induced heat stress in a temperate environment. Appl Physiol Nutr Metab 2012;37:965–975.
50. Wegmann M, Faude O, Poppendieck W, Hecksteden A, Fröhlich M, Meyer T. Pre-cooling and sports performance. Sports Med 2012;42:545–564.
51. Wilson OC, Tran BQ, Vossoughi J. HEART RATE VARIABILITY SIGNAL PARAMETERS QUANTIFY SKIN COOLING EFFECT OF ENERGY PATCHES DURING REST AND EXERCISE IN YOUNG HEALTHY INDIVIDUALS. 2007;
52. Bogerd N, Perret C, Bogerd CP, Rossi RM, Daanen HA. The effect of pre-cooling intensity on cooling efficiency and exercise performance. J Sports Sci 2010;28:771–779.
53. Castellani JW, Young AJ, Sawka MN, Pandolf KB. Human thermoregulatory responses during serial cold-water immersions. J Appl Physiol 1998;85:204–209.
54. Davis SL, Fadel PJ, Cui J, Thomas GD, Crandall CG. Skin blood flow influences near-infrared spectroscopy-derived measurements of tissue oxygenation during heat stress. J Appl Physiol 2006;100:221–224.
55. Ogoh S, Ainslie PN, Miyamoto T. Onset responses of ventilation and cerebral blood flow to hypercapnia in humans: rest and exercise. J Appl Physiol Bethesda Md 1985 2009;106:880–886.
56. Périard JD, Thompson MW, Caillaud C, Quaresima V. Influence of heat stress and exercise intensity on vastus lateralis muscle and prefrontal cortex oxygenation. Eur J Appl Physiol 2013;113:211–222.
57. Rupp T, Perrey S. Prefrontal cortex oxygenation and neuromuscular responses to exhaustive exercise. Eur J Appl Physiol 2008;102:153–163.
58. Johnson E, Sporer B, Sleivert GG, Pethick W. 2008. The effect of precooling and ambient temperature on 20 km time trial performance in trained cyclists. In: Proceedings of the CSEP annual scientific conference.15–18.

Figure captions:

Figure1: The Mawashi Advanced Personal Thermoregulation System

Figure 2: Perceptual responses during exercise and recovery for perceived exertions (RPE), thermal sensation, thermal comfort and wetness. *Significant difference between conditions ($p<0.05$).

Figure 3: Average values for oxygen uptake (VO2), carbon dioxide production (VCO2), ventilation (VE) and respiratory quotient (RQ= VCO2/VO2) at baseline, exercise and recovery.

Figure 4: Average values for heart rate at baseline, exercise and recovery. * significant difference between condition (t30) ($p<0.05$).

Figure 5: Average values for concentration changes (Δμmol/L) in muscular saturation index of oxygenation (TSI (%)) and in total (THb), oxygenated (HbO2), deoxygenated (HHb), muscular hemoglobin at baseline, exercise and recovery.

Figure 6: Average values for concentration changes (Δμmol/L) in cerebral saturation index of oxygenation (TSI (%)) and in total (THb), oxygenated (HbO2), deoxygenated (HHb), cerebral hemoglobin at baseline, exercise and recovery.

Table caption:

Table 1: Skin temperatures averages of the trunk, arms and head at baseline, exercise (T1, T2 and T3) and recovery (T4).

Skin temperature	Baseline		T1		T2		T3		T4	
Trunk "OFF"	31,6±1,8	ns	31,5±1,4	ns	31,8±1,7	ns	31,9±1,6	*	31,6±1,3	*
Trunk "ON"	31,5±1,7		31,4±1,6		31,5±1,9		30,9±1,5		30,9±1,1	
Arms "OFF"	33,9±1,7	ns	32,9±1,1	ns	33,6±1,4	ns	33,8±1,5	ns	33,6±1,1	ns
Arms "ON"	33,8±1,4		33,1±1,5		33,7 ±1,6		33,7±1,3		33,5±1,0	
Head "OFF"	32,6±1,5	ns	33,2± 1,4	ns	33,4±1,5	ns	33,4±1,6	ns	33,4±1,4	ns
Head "ON"	32,4±1,4		33,3±1,4		33,4±1,5		33,2±1,2		33,1±0,9	
ns: non significant, * significant ($p<0.05$)										

Figure1: The Mawashi Advanced Personal Thermoregulation System

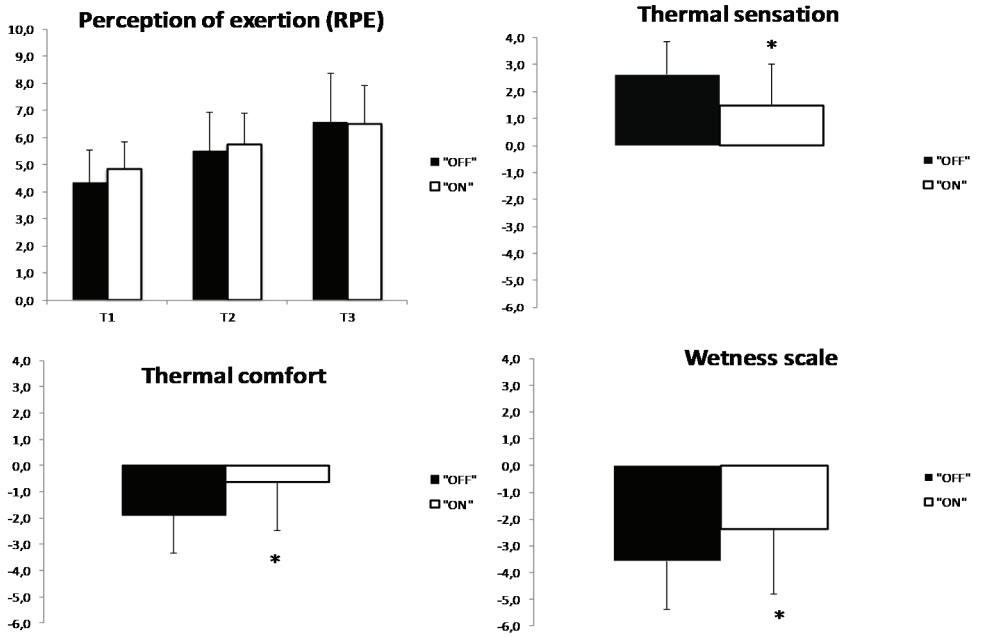


Figure 2: Perceptual responses during exercise and recovery for perceived exertions (RPE), thermal sensation, thermal comfort and wetness. *Significant difference between conditions ($p<0.05$).

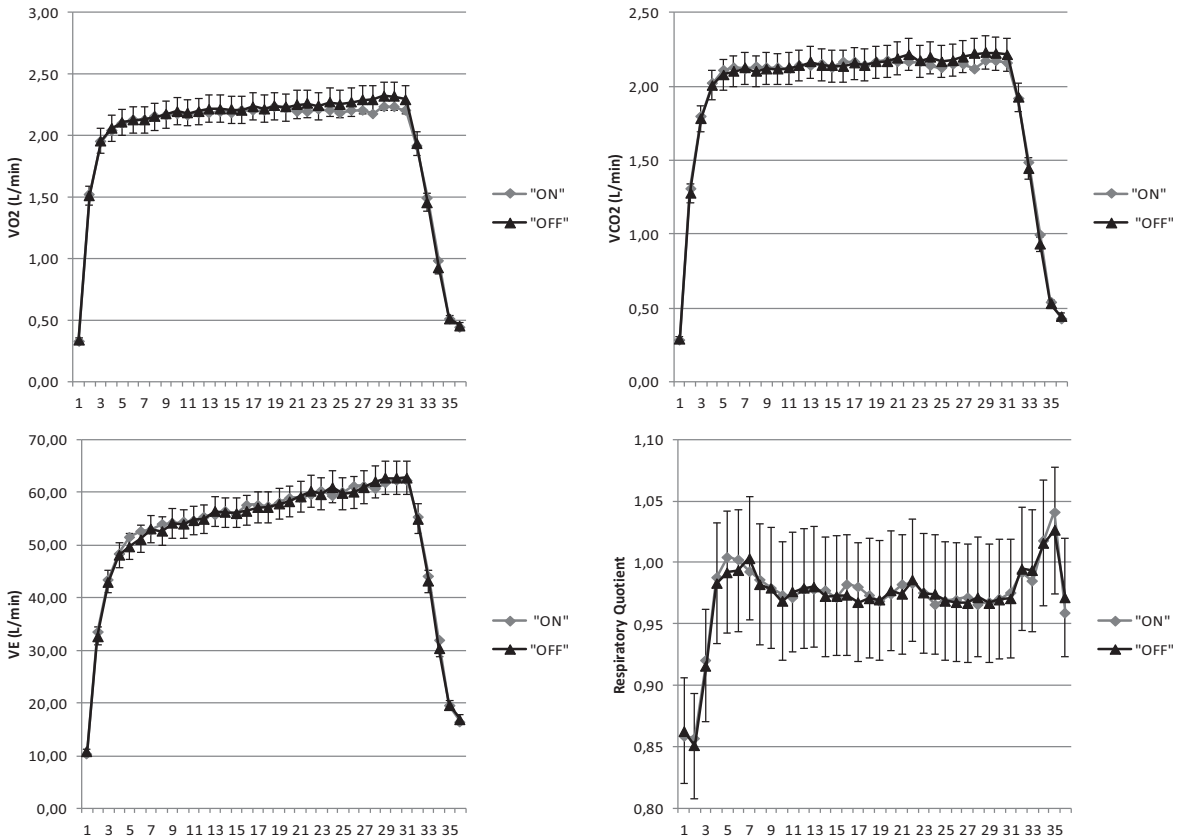


Figure 3: Average values for oxygen uptake (VO2), carbon dioxide production (VCO2), ventilation (VE) and respiratory quotient (RQ= VCO2/VO2) at baseline, exercise and recovery

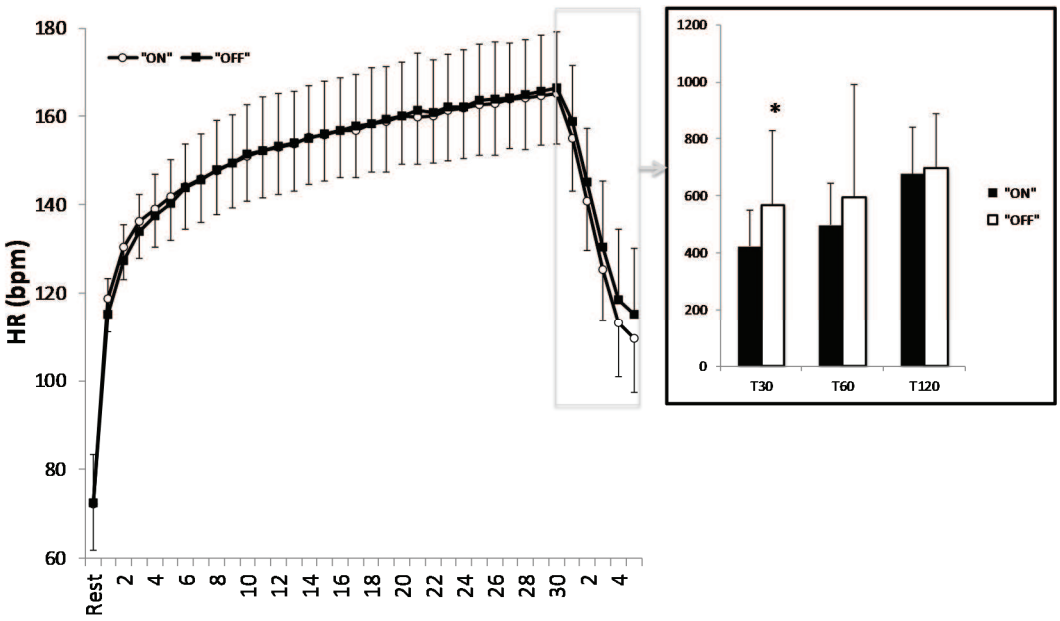


Figure 4: Average values for heart rate at baseline, exercise and recovery. * significant difference between condition (t30) ($p<0.05$).

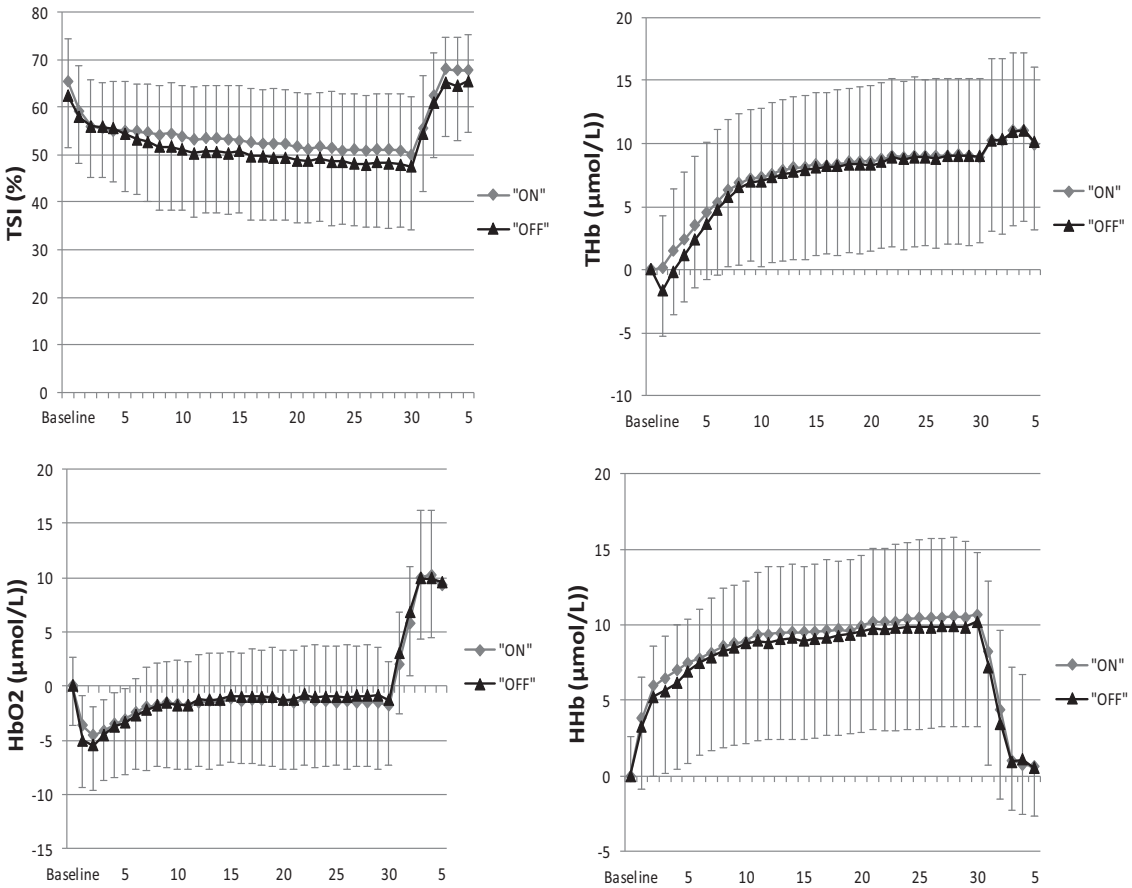


Figure 5: Average values for concentration changes (Δµmol/L) in muscular saturation index of oxygenation (TSI (%)) and in total (THb), oxygenated (HbO2), deoxygenated (HHb), muscular hemoglobin at baseline, exercise and recovery.

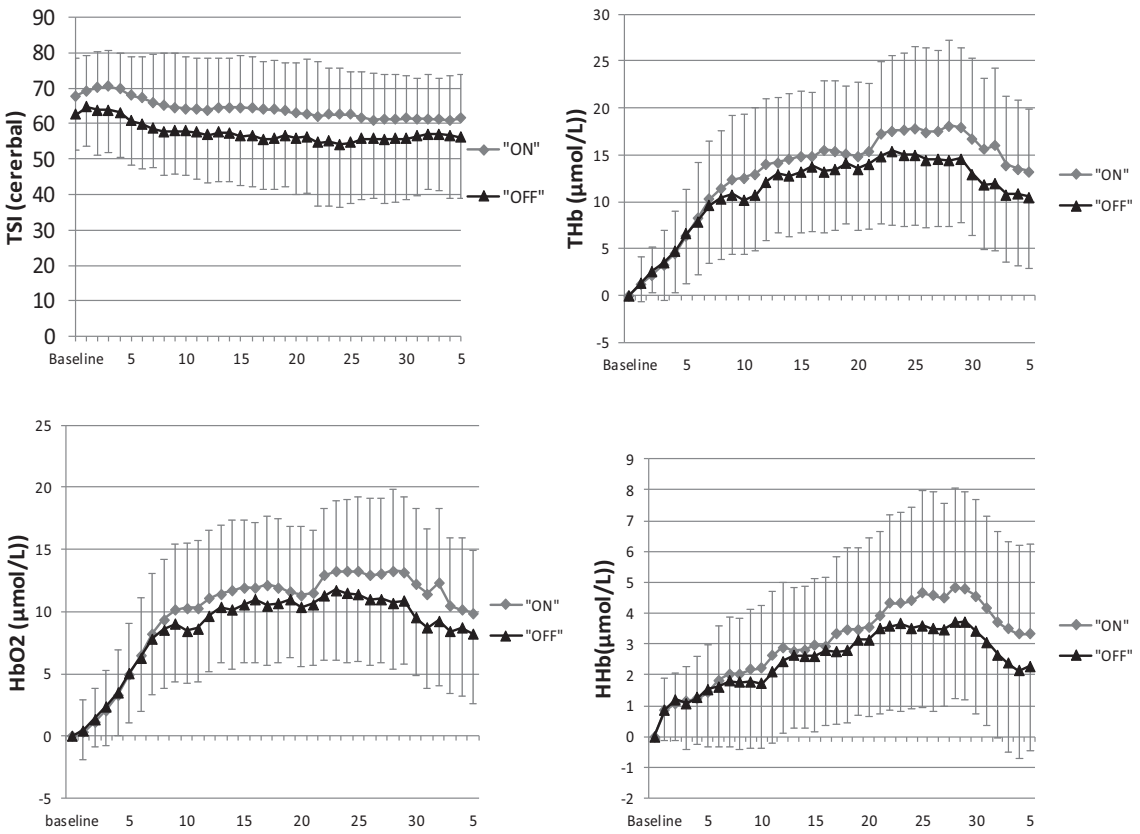


Figure 6: Average values for concentration changes (Δµmol/L) in cerebral saturation index of oxygenation (TSI (%)) and in total (THb), oxygenated (HbO2), deoxygenated (HHb), cerebral hemoglobin at baseline, exercise and recovery.

3.3. Étude 3: (Per-cooling)

a) Résumé

Development of a new Air/CO2 cooling garment: presentation of the prototype and the benefits of its use in terms of physiological and perceptive responses in subjects exposed to a hot and humid climate during physical activities

Al Sayed C, Vinches L, Dupuy O, Douzi W, Dugué B, Hallé S

❖ Objectif

Examiner l'impact du port d'un gilet refroidissant sur la température interne, la fréquence cardiaque et le confort thermique dans un environnement chaud et humide (30°C et 60% d'humidité).

❖ Méthode

20 sujets sains et physiquement actifs (3-6 heures / semaine) (âge 26.7 ± 4.3 ans ; poids : 77.6 ± 10.5 kg ; taille : 1.80 ± 0.07 cm) ont volontairement participé à l'étude. Le même protocole que celui de l'expérimentation réalisée dans un environnement thermo-neutre a été effectué. La première visite est effectuée dans une condition ambiante de température et d'humidité. Mais la deuxième et la troisième visite ont été réalisées dans un environnement chaud et humide (30°C et 60% d'humidité). La fréquence cardiaque a été mesurée en continue pendant l'exercice et la récupération. La température interne et la perception de l'effort (RPE) ont été mesurées toutes les 10 minutes de l'exercice. Les perceptions de la température, d'humidité et de bien-être ont été révélées toutes les 10 minutes de l'exercice et à la fin de la récupération.

❖ Résultats

Température interne : Nous avons trouvé un effet significatif du temps ($p<0.05$) et une interaction significative entre le temps et la condition ($p<0.05$). À partir de la 25ème minute et jusqu'à la récupération les températures enregistrées en condition « ON », sont inférieures à la condition « OFF » (**figure 43**).

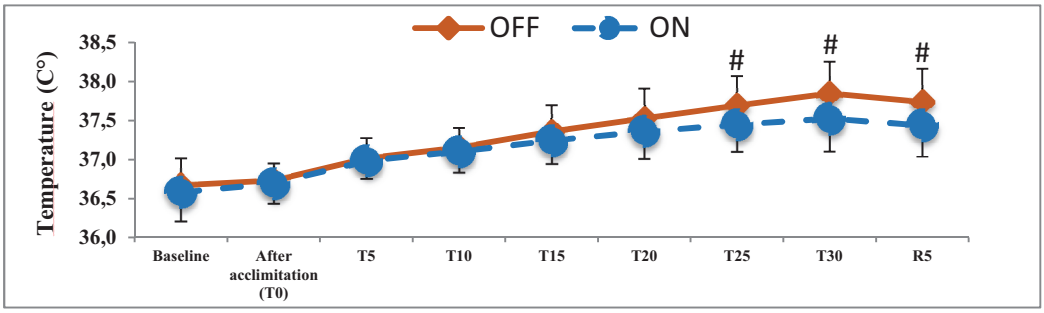


***Figure 43** : Cinétique de la température interne pendant l'exercice et la récupération. # Différence significative entre les conditions (p <0,05).*

Fréquence cardiaque :

Nous avons également observé un effet significatif du temps ($p<0.05$) et une interaction significative entre le temps et la condition ($p<0.05$). Les valeurs de FC enregistrées dans la condition expérimentale sont inférieures à la condition contrôle à partir de la 25ème minute jusqu'à la récupération **(figure 44).**

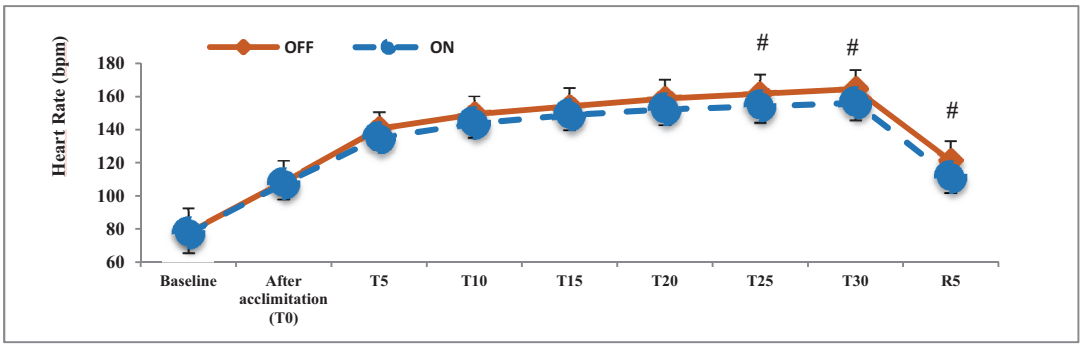


***Figure 44** : Cinétique de la fréquence cardiaque pendant l'exercice et la récupération. # Différence significative entre les conditions (p <0,05).*

Réponses perceptives : (RPE, perception de la température, de l'humidité et de bien-être)

Nous avons trouvé un effet temps pour toutes ces réponses ($p<0.05$). Un effet condition a été également observé pour la perception de la température, de l'humidité et du bien-être ($p<0.05$). En ce qui concerne la RPE, une interaction entre le temps et la condition a été révélée ($p<0.05$). Les valeurs de RPE dans la condition « ON » sont inférieures à la condition « OFF » à partir de la 25ème minute.

❖ Discussion

Le port d'un gilet refroidissant, dans un environnement chaud et humide, réduit la fréquence cardiaque et la température interne pendant l'exercice physique et la récupération. Ce refroidissement permet également de diminuer la perception de la température, de la perception de l'effort et de l'humidité. Le tout est associé à une amélioration de la sensation de bien-être. Cet impact positif sur les réponses physiologiques et perceptives confirme l'effet bénéfique des gilets refroidissants comme observé dans plusieurs études récentes (Ciuha et al. 2016 ; Chan et al. 2017). En ce sens, l'utilisation de cette stratégie de refroidissement, chez des personnes travaillant dans des environnements chauds et humides, améliore les conditions de travail en réduisant le stress physiologique et en améliorant le confort thermique.

- Le port du gilet refroidissant, dans un environnement chaud et humide :
  - Réduit la fréquence cardiaque et la température interne pendant l'exercice physique et la récupération.
  - Diminue la perception de la température et d'humidité.
  - Diminue la perception de l'effort.
  - Améliore la sensation de bien-être.

b) Article:

Effects of an Air/CO_2 cooling garment on physiological responses and perceptions of subjects exposed to a hot and humid climate during physical activities

Chady Al Sayed[1], Ludwig Vinches[1], Olivier Dupuy[2], Wafa Douzi[2], Benoit Dugue[2], Stéphane Hallé[1]

[1] Department of Mechanical Engineering, École de Technologie Supérieure, 1100 Notre Dame Street West, Montreal, Quebec, Canada H3C 1K3
[2] Faculty of Sports Sciences, University of Poitiers - Building C6 - 8 allée Jean Monnet - 86073 Poitiers Cedex 9, France

(Article sur le point d'être soumis dans Building and Environment)

Abstract
A cooling garment for deep mine activities has been developed. It uses the atmospheric discharge of liquid CO_2 to treat a constant airflow and create a cool microclimate with an average temperature of 12.5 (±0.4) °C under the garment, thus assisting the evaporating of the sweat and cooling the body. To evaluate its cooling efficiency, 19 male subjects were recruited and accomplished the same testing protocol (duration of 42 minutes). One test when the garment is off (condition 1: OFF-mode) and the second test when the garment is functional (condition 2: ON-mode). Significant differences were found after minute 27 ($p < 0.05$) and until the end of the recovery phase, between the two conditions, at heart rate (maximum difference of 10 beat per minute) and internal body temperature measurements (maximum difference of 0.33 °C). At perceptual response levels, we observed an effect of time for all perceptual measures ($p < 0.05$). Interestingly, we found a main effect of condition on perception of well-being, humidity and thermal comfort ($p < 0.05$). The ON-mode condition is associated to better well-being, thermal comfort and a lesser humidity. Furthermore, we measured a significant interaction (Condition × Time) for perception of exertion ($p < 0.05$). The perception of exertion levels is lower in ON-mode condition from minute 22. The findings provide strong evidence on the capability of the cooling garment to reduce heat stress under conditions of temperature and humidity similar to what is encountered in deep mines.

Keywords
Cooling garment, deep mining, hot and humid, liquid CO_2 expansion, physiological measurements, perceptual responses.

1. Introduction

Heat stress in mines increases with the depths of the work site and can have a great impact on the health and safety of the miners. At deep levels, the environment is both hot and humid, leading to an increase in work accidents and a decrease in productivity [1].

As the temperature of the surrounding air exceeds the mean skin temperature, the body gains heat from the surrounding by convection. As a last resort for dissipating build-up heat, the body increases the sweat secreting in an attempt to cool the body by evaporation. Unfortunately, in deep mines, ambient temperatures can easily reach 35 °C and the surrounding air is already saturated or at relative humidity (RH) levels that frequently exceed 80% [2], preventing or limiting any evaporating mechanism.

To reduce the severity of this workplace, several industrial cooling technologies are already been used such as central air conditioning, ice and water cooling technologies [3, 4]. These systems are massive, expensive, consume a large amount of energy to operate and need modifications to adapt with the increase of the working depths. Therefore, developing alternative cooling methods is necessary, like the use of personal cooling garments. Unfortunately, currently commercialised cooling garments are not fully efficient once used in deep mines working conditions because of the high level of relative humidity [5] and that they are unsuited to the mining environment.

Researchers are continuously optimizing and testing new cooling garments to achieve a better effectiveness in reducing occupational heat stress. In 2016, Shirish et al. [6] tested the effectiveness of a liquid-cooled garment, during actual work in an iron foundry with 24 workers. There were no significant differences recorded neither at mean oral temperatures, nor at heart rates between wearing the garment or not. They recorded significant differences at torso skin temperature but none at other skin points (head, arm, hand, thighs and feet). Workers did not exhibit any overcooling for wearing the garment and it had no interfering with their ability to perform their work. They stated that the garment gave them thermal comfort while working in a hot environment (35.89 ± 1.25 ° C and 35% RH). Similar results were found in 2017 by Bartkowiak et al. [7] when studying the effect of a liquid cooling garment consisting of a jacket connected to a mobile cooling unit (approximately 10 kg of weight) transportable via wheels, in reducing the thermal discomfort of people working in a hot environment (30 °C and 40% RH). Same year, Butts et al. [8] evaluated the physiological and perceptual responses of 20 subjects wearing a phase changing garment (PCG) during simulated labor and exposed to heat (34.2 ± 0.05 °C and 54.7 ± 0, 3% RH). They found that this PCG effectively decreases skin temperature, increasing heat loss and reducing heat stress. It improved perceptions of heat stress and decreased body fluid losses in subjects.

Researchers are also comparing different cooling methods to evaluate their possibility to use in a working environment, such as wearing cooling garments, executing arm immersion in cold water, inhaling heliox, and ingesting ice [9]. At the best of our knowledge, no personal cooling method has been developed or fully adapted to the mining industry. Most studies are focused on developing and optimizing the air cooling in underground environments through general ventilation in centralized systems.

In that context, a prototype of a personal cooling garment suitable for miners has been developed. Its main objective is to assist the body in evacuating excessive heat, which will lead to better working conditions and improve the health and safety of workers. The present study aims to validate the effects of this prototype, on some physiological (heart rate and internal body temperature) and perceptual responses of subjects inside a climate chamber (exertion, thermal comfort, etc.), performing physical activities in a simulated environment that reproduces the temperature and humidity conditions that are similar to those found in deep and ultra-deep mines.

2. Method

2.1 Subjects

Twenty healthy male subjects were recruited for this study. Each subject was informed about the

experiment protocol, the potential risks during the tests and the purpose of the study prior to signing their consensus letter. Nineteen subjects completed all required tests, with an average age of 26.7 (±4.3) years, an average weight of 77.6 (±10.5) kg, an average height of 1.80 (±0.07) m, and an average body mass index of 24.1 (±3.5) kg/m^2. The study protocol was reviewed and approved by the École de Technologie Supérieure Ethics Committee (ethical reference code: H20170802).

2.2 Prototype of a personal cooling garment

The prototype was developed by joining three major parts; the layers that form the garment, the air treating system and the distributing channels (see Figure 1). The outside layer of the garment is made from polyester to create an air barrier between the surrounding environment and the microclimate inside the garment. The middle layer is a moisture-wicking fabric. Its main purpose is to increase the wearer's comfort by absorbing excessive non-evaporated sweat. The inside layer which is in direct contact with the wearer's underclothing is meshing polyester that allows mass and heat transfer between the skin and the microclimate.

The air treating system uses the atmospheric discharge of highly pressurized liquid CO_2 (58 bars) to cool and dehumidify a constant stream of air coming from the surroundings. For that purpose, two identical cylinders, containing each 0.68 kg of saturated two-phase CO_2 (liquid/gas) were mounted upside down on the back of the garment. The liquid CO_2 passes inside the brass connexions once the feeding valve and the valve adapters are open, through an inline filter and expands to atmospheric pressure over an orifice of 0.089 mm in diameter. Although several orifice diameters have been tested, the one to deliver a mass flow of 0.43 g/s of mix gaseous CO_2 and dry ice when an all-liquid expansion occurs is chosen. The orifice is connected directly to a mixing chamber located inside a mixing box that contains a heat sink. The mixing chamber is also connected to a DC blower, operating under 13.2 V, which delivers a 3.5 L/s of hot and humid air coming from the surroundings. The mixing box contains also a humidity chamber to collect the condensate (water) once the air is cooled under its dew point. **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** shows the temperature profiles of the injected air beneath the cooling garment (microclimate temperature) and the air inside the climate chamber when a 0.089 mm orifice diameter is used for the atmospheric expansion of the CO_2.

A microclimate with a 12.5 (±0.4) °C average temperature was created between the cooling garment and the wearer for a duration of 40 minutes (duration required for accomplishing the experimental protocol of visit 2 and visit 3). When no more liquid exists inside the cylinders, the remaining CO_2 is in a gaseous state that expands through the orifice and a decrease in the cooling capacity of the CO_2 is registered. This affects the temperature of the microclimate created beneath the garment and is shown in **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** by an increase of the temperature after minute 41.

The distributing channels which are responsible for creating the microclimate are formed by using PVC tubes with different diameters. Because that the sweat rate at the back region of a human body under physical activity is approximately the double of the value at chest level [10], the PVC tubes are perforated in a way to deliver two third of the treated airflow on the back of the wearer (approximately 2.3 L/s) while maintaining a constant flow through perforations . This distributing system is imbedded between the wicking fabric and the mesh polyester. The overall weight of the prototype is 5.1 kg.

2.3 Climate chamber

The study was conducted inside a 54 m^3 climate chamber connected to two thermocouples type J and two humidity detectors, over LabVIEW platform [11]. Due to the ethical committee's restrictions on the maximum heat stress allowed during tests with human subjects, the surrounding environment inside the chamber was maintained at 30°C ±1°C dry bulb temperature and at 60% ±2% relative humidity (RH). Since the cooling garment injects CO_2 into a closed surroundings, a ventilation rate of 5.5 air change per hour is maintained inside the climate chamber so that the concentration of the CO_2

should not exceed 5000 ppm (the occupational limit of CO_2 for an 8-hour exposure) [12, 13]. A CO_2 detector is mounted in the breathing zone at 1 meter from the subject registers data during all tests.

2.4 *Physiological measurements and subjective perceptions*

The weight of the subject was measured using a digital body scale (accuracy ± 5g). The heart rate was recorded using a H10 Polar™ heart rate sensor placed around the chest, connected to a V800 Polar™ watch [14]. The internal body temperature was measured using a Braun™ ThermoScan® 7 Age Precision® (IRT6520) ear thermometer with a maximum error of ± 0.2°C. Subjects indicated during tests, when the cooling garment has been worn (ON-mode and OFF-mode), their rating of perceived exertion (RPE) using a 10-point scale [15], on thermal comfort (from -6 = extremely cold to 4 = hot), on humidity feeling (from -6 = soaking wet to 4 = dry) and on the well-being feeling (from -6 = extremely unpleasant to 4 = pleasant) for each 5-minute interval, once the exercise phase starts.

2.5 *Experimental protocol*

Each subject was asked to perform tests over a period of three visits, separated by a one-week interval. During the first visit, the weight and height each subject were measured. Then the subject wears a H10 Polar heart rate sensor connected to a V800 Polar watch [14] and enters the climate chamber set at 22 °C ± 1°C dry bulb temperature and 40% ± 2% RH. The subject sits on a stationary bike and starts to pedal at 50 W of cycling power (Low cycling power: LP). The cycling power is then increased by increments of 25 W each 2 minutes until the subject reaches his 70% of their theoretical maximum heart rate (220 – age) [16]. The final cycling power is then registered for each subject and is used as his maximum cycling power (MP) during the other two visits.

During the last two visits, the subject wears the prototype of the cooling garment, once activated (ON-mode) and the other time deactivated (OFF-mode). To eliminate any effect caused by the order of the last two visits, half of the subjects accomplished their second visit while the garment is in ON-mode and the other half in OFF-mode. The climate chamber is set at 30°C ±1°C dry bulb temperature and at 60% ±2% RH and the test protocol will be identical for both visits. Upon arriving to the facility, the internal body temperature of the subject is measured at tympanic level (Baseline measurement). He then wears the H10 heart rate sensor, his T-shirt, the cooling garment, enters the climate chamber and sits on the stationary bicycle. The H10 heart rate sensor is activated and the subject remains still for 2 minutes (acclimation phase).

After the two minutes, his internal temperature is measured (T0 interval) and the subject is asked to start pedalling for 5 minutes, at 50% of his MP (warm-up phase). After the warm-up, the stationary bicycle is set to 100% of MP of each subject and the subject is asked to pedal for 30 minutes (exercise phase from T5 to T30). During exercise phase, the body internal temperatures are measured each 5 minutes, and the subject gives his perception of different feelings (exertion, thermal comfort, well-being and humidity feeling) using corresponding scales. After the exercise phase is finished, the subject continues to pedal at 50 W of cycling power (LP) for two minutes (active recovery phase) and then rests on the stationary bicycle for 3 minutes (passive recovery phase).

His internal body temperature, as long with the perceptive feelings, are taken one last time before the subject exits the climate chamber (R5 interval). Figure 3 shows the cycling protocol during the second and the third visit. The cooling garment and the H10 Polar heart rate sensor are then removed, and the subject is then offered water and snacks and can leave the facility once he feels relaxed.

2.6 *Statistical analysis*

Standard statistical methods were used for the calculation of means and standard deviations. Normal Gaussian distribution of the data was verified by the Shapiro–Wilk test and homoscedasticity by a modified Levene's Test. The compound symmetry, or sphericity, was checked by the Mauchly's sphericity test. When the assumption of sphericity was not met, the significance of F-ratios was adjusted according to the Greenhouse–Geisser procedure when the

epsilon correction factor was < 0.75, or according to the Huynh-Feldt procedure when the epsilon correction factor was > 0.75. On each physiological and perceptual measure, we performed a two-way analysis of variance with repeated measures (ANOVA: Condition (ON/OFF) × Time). Multiple comparisons were made with the Fisher's Least Significant Difference (LSD) post-hoc test. The significance level was set at $p < 0.05$ for all analyses.

3. Results and discussion

The maximum CO_2 concentration measured inside the climate chamber during the ON-mode tests was 4200 ppm. A maximum value of 1100 ppm was also recorded when the garment was off (OFF-mode). The results regarding the internal body temperature of all subjects were averaged and presented in **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**. It is clear that the average internal temperature was lower when the garment was functional (ON-mode). The higher internal temperatures measured for both conditions were at the end of the exercise phase (T30), with an average value of 37.85 (± 0.4)°C at OFF-mode and a 37.52 (± 0.4) °C at ON-mode (a 0.33°C difference). The ANOVA revealed a significant main effect of time ($p < 0.05$) and a significant interaction (Condition x Time; $p < 0.05$). This interaction indicated that during the ON-mode tests, the internal temperature did not increase as much as during OFF-mode tests. From the 27th minute and until the end of the recovery period (T25, T30 and R5), there were significant differences between the two conditions.

Perceptual responses recorded during visit 2 and visit 3 of all subjects are presented in **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**. We found a main effect of time for all perceptual measures ($p < 0.05$). All subjects felt an improvement in the exertion feelings during the exercise phase when the garment was functional. Significant differences were recorded at T20, T25 and T30 with 1, 1.1 and 1.4 levels of exertion difference respectively (RPE, $p < 0.05$). This indicates that wearing the cooling garment generates a positive influence on the work intensity feeling. Same workloads would feel less intense when the body is cooled. It is also clear that the garment on its ON-mode, improved the thermal comfort of all subjects. Significant differences were found at each time interval (from T5 to R5). The maximum variance was found at the end of the recovery phase (R5) with a 2-level difference value. The cold microclimate generated under the garment has a great influence on the evaporation of the sweat. This was shown in the humidity feeling results in **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** (C). A probability value less than 0.05 were found at every time interval (from T5 to R5) and improvements of the humidity sensation were recorded when the garment was in ON-mode. The maximum variance was found simultaneously at T20, T30 and R5, with an equal levels difference value of 1.77. The subjects felt better during exercise and recovery phases when the garment was in ON-mode (compared to the garment in OFF-mode), which is shown in the well-being feelings recorded (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.** (D)). Significant differences were found at every time intervals during exercise and recovery phase, with a maximum of 1.95 levels (at T30).

The heart rate responses were recorded and then averaged for each time interval from the baseline measurements to the end of the recovery phase. The results are presented in **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**. We found a main effect of Time ($p < 0.05$) and a significant interaction (Condition x Time, $p < 0.05$). This interaction revealed that during the ON-mode tests, the heart rate did not increase as much as in OFF-mode tests. Significant differences were found at T25, T30 and R5. The maximum average difference in heart rates was recorded after the recovery phase (R5) with a value of 10 beats per minute (bmp). At T25 and T30, the difference in heart rates was 8 bmp.

At physiological measurements the cooling garment has a significant effect in reducing, both internal body temperature and heart rate, of the subjects from T25 till R5. This indicates that the heat stress imposed on the body of the subjects due to physical activities and the surrounding environment was reduced because of the cooling delivered by the garment. The cooling of the garment has also a great influence on the recovery speed and is shown by the significant differences found at R5 for each physiological measurement.

At perceptual responses, the cooling garment at its operating level (ON-mode), was able to provide improvements on the thermal comfort, the humidity sensation and the well-being feeling during all time intervals. The subjects felt that the cooling generated by the garment made the exertion levels lower and the physical activity more tolerable, from T20 till T30.

Conclusion

A personal cooling garment was developed for use in deep mining activities. The garment weighs 5.1 kg and uses the atmospheric discharge of highly pressured CO_2 to create a cold microclimate separating the body from the surrounding environment. The purpose of this study was to evaluate the effects of the cooling garment on some physiological measurements and perceptual responses of subjects exposed to a hot and humid working environment. The finding shows that the garment can lower the internal body temperature and the heart rate of the subjects. It has a great impact on improving the sensation of the well-being. It has a positive effect on the thermal comfort, the humidity sensation and the perception of the exertion level. All this provides strong evidence on the capability of the cooling garment to reduce heat stress in an environment that simulates approximately the working reality of deep mines. Compared to the mining reality, this study has some limitations. Miners have an average age and body weight higher than the averages of the subjects inside this study [2]. The workload and the surrounding conditions (temperature and humidity) vary too. That is why it is important that future studies would concentrate on testing the effects of this cooling garment with miners during real-time working conditions.

Acknowledgement

This study was funded by the Fonds de Recherche du Québec - Nature et Technologies (FRQNT).

Conflicts of interest

All authors declare no potential conflicts of interest.

1. Michael Donoghue, A., *Heat illness in the US mining industry.* American journal of industrial medicine, 2004. **45**(4): p. 351-356.
2. Ngô, V.T.M., S. Nadeau, and S. Hallé, *Ergonomic design of a cooling vest in deep and ultra-deep mining environments.* Occupational Ergonomics, 2017. **13**(S1): p. 115-126.
3. He, M.-c., *Application of HEMS cooling technology in deep mine heat hazard control.* Mining Science and Technology (China), 2009. **19**(3): p. 269-275.
4. Xiaojie, Y., et al., *Progress of heat-hazard treatment in deep mines.* Mining Science and Technology (China), 2011. **21**(2): p. 295-299.
5. Al Sayed, C., L. Vinches, and S. Hallé, *Towards Optimizing a Personal Cooling Garment for Hot and Humid Deep Mining Conditions.* Open Journal of Optimization, 2016. **5**(01): p. 35.
6. Shirish, A., et al., *Effectiveness of a cooling jacket with reference to physiological responses in iron foundry workers.* International journal of occupational safety and ergonomics, 2016. **22**(4): p. 487-493.
7. Bartkowiak, G., A. Dabrowska, and A. Marszalek, *Assessment of an active liquid cooling garment intended for use in a hot environment.* Applied ergonomics, 2017. **58**: p. 182-189.
8. Butts, C.L., et al., *Physiological and perceptual effects of a cooling garment during simulated industrial work in the heat.* Applied ergonomics, 2017. **59**: p. 442-448.
9. Maley, M.J., et al., *Internal and external cooling methods and their effect on body temperature, thermal perception and dexterity.* PLOS ONE, 2018. **13**(1): p. e0191416.
10. Smith, C.J. and G. Havenith, *Body mapping of sweating patterns in male athletes in mild exercise-induced hyperthermia.* European Journal of Applied Physiology, 2011. **111**(7): p. 1391-1404.
11. National-Instruments-Corporation. 2017 06/08]; Available from: http://www.ni.com/fr-ca/shop/labview/buy-labview.html.
12. Hygienists, A.C.o.G.I. *Threshold Limit Values for Chemical Substances and Physical Agents and Biological Exposure Indices*. 1995. American Conference of Governmental Industrial Hygienists.

13. Officiel du Québec, É., *Règlement sur la santé et la sécurité du travail.* Extrait de la Gazette officielle du Québec. Décret, 2007: p. 885-2001.
14. Polar. 03/07/2018]; Available from: https://www.polar.com/ca-en/products.
15. Borg, G.A., *Psychophysical bases of perceived exertion.* Med sci sports exerc, 1982. **14**(5): p. 377-381.
16. Prevention, C.f.D.C.a. *Target heart rate and estimated maximum heart rate.* [cited 2018 July 21]; Available from: www.cdc.gov/physicalactivity/basics/measuring/heartrate.htm.

Figure captions:

Figure 1 : Front view, back view, and the air treating system of the cooling garment

Figure 2: Temperature profiles inside the microclimate and the climate chamber

Figure 3: Cycling protocol during visit number 2 and visit number 3

Figure 4: Kinetics of internal temperature during exercise and recovery. # Significant difference between conditions ($p < 0.05$)

Figure 5: Perceptual responses during exercise and recovery for RPE (A), Thermal comfort (B), Humidity (C) and Well-being (D). # Significant difference between conditions ($p<0.05$).

Figure 6: Heart rate responses during exercise and recovery. # Significant difference between conditions ($p < 0.05$).

Figure 2 : Front view, back view, and the air treating system of the cooling garment

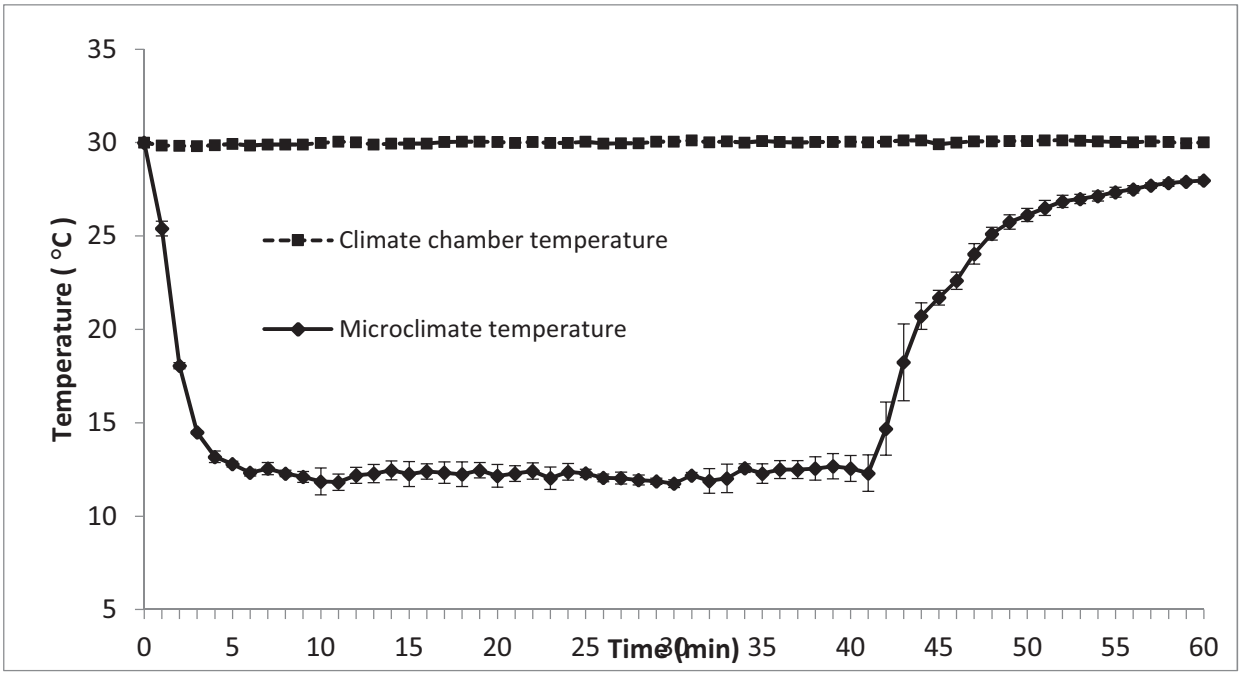


Figure 2: Temperature profiles inside the microclimate and the climate chamber

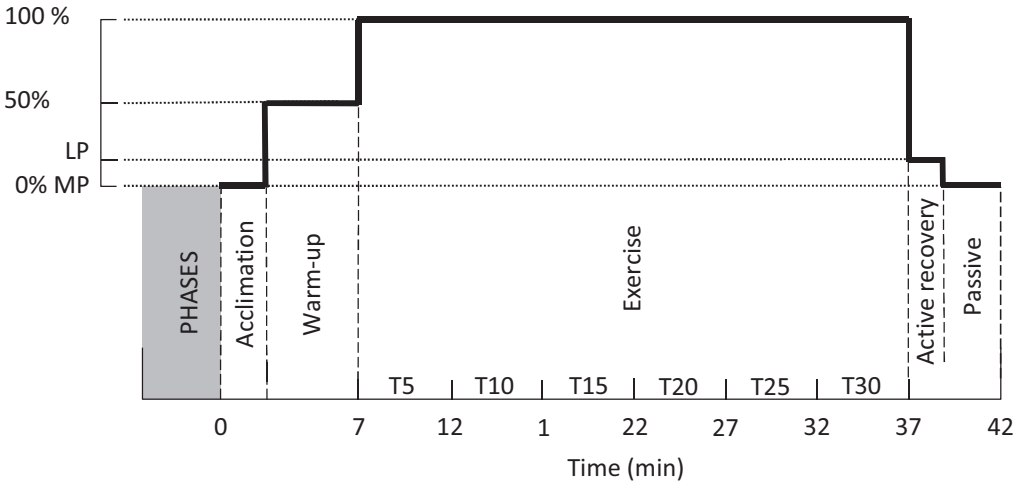


Figure 3 : Cycling protocol during visit number 2 and visit number 3

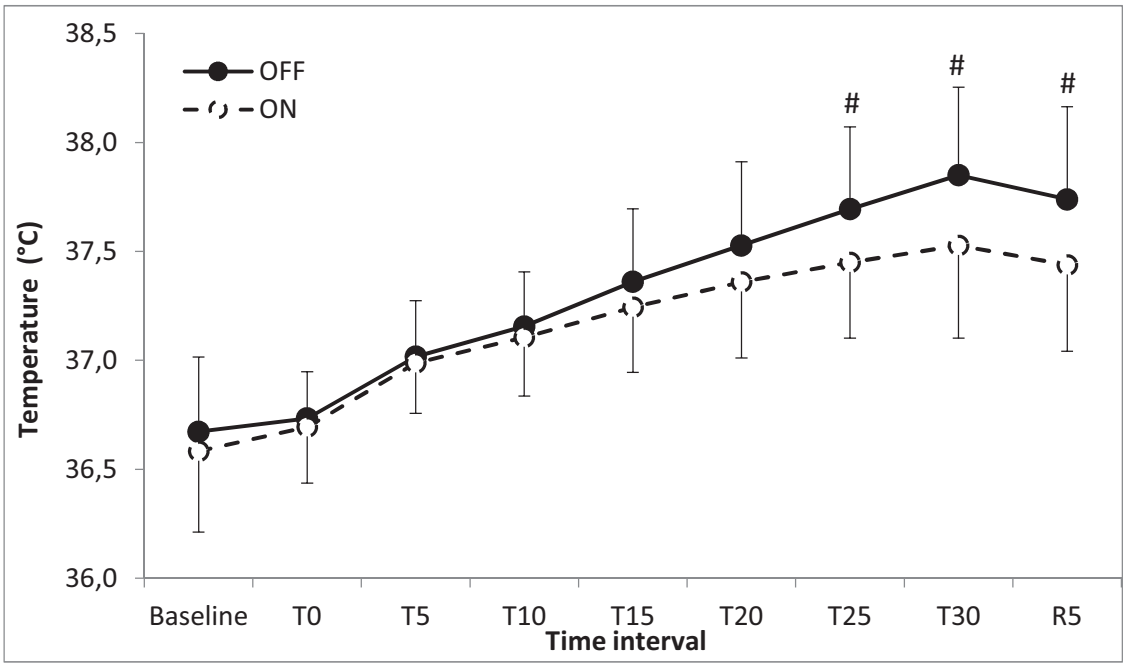


Figure 4: Kinetics of internal temperature during exercise and recovery. # Significant difference between conditions ($p < 0.05$)

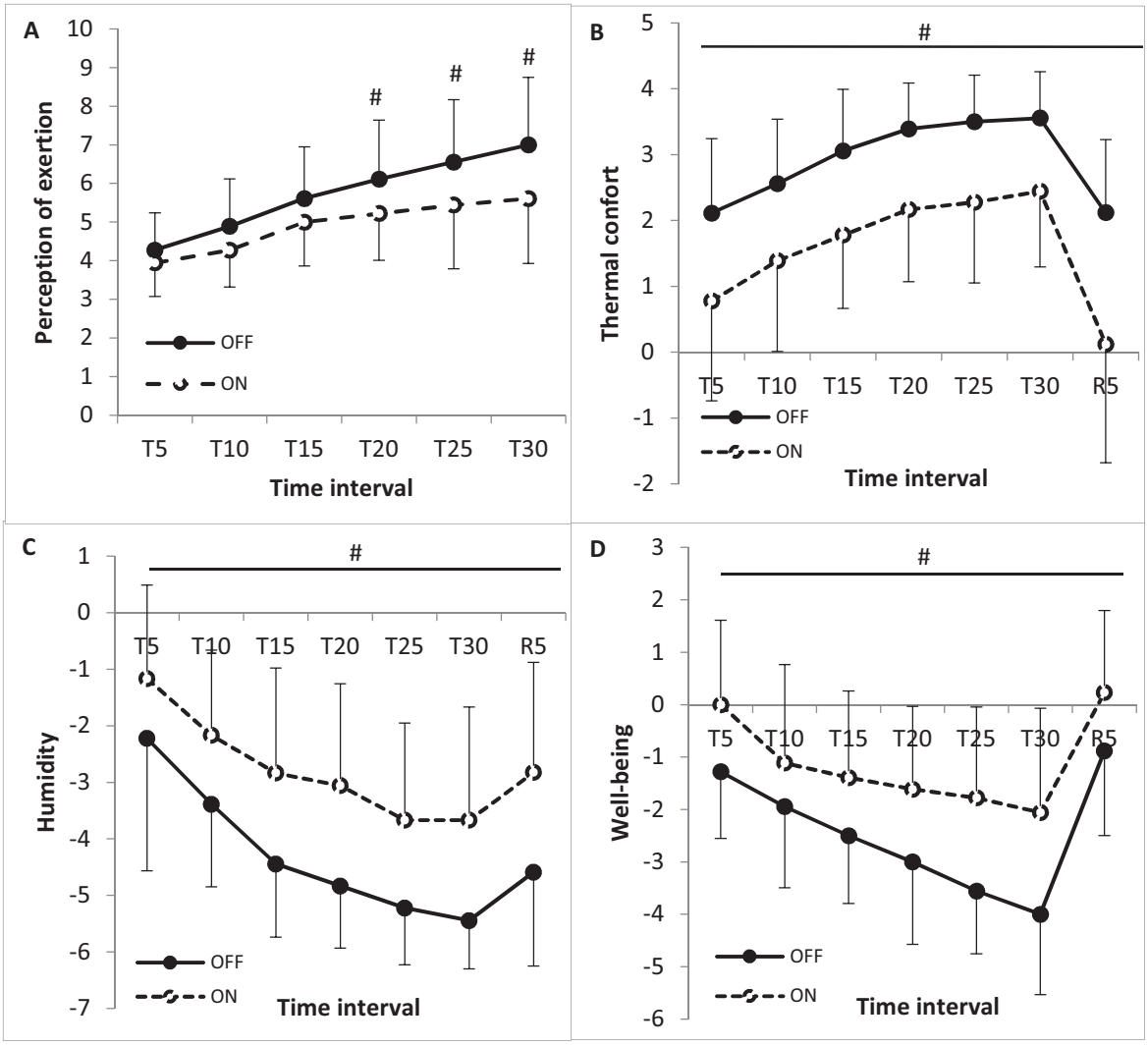


Figure 5: Perceptual responses during exercise and recovery for RPE (A), Thermal comfort (B), Humidity (C) and Well-being (D). # Significant difference between conditions ($p<0.05$).

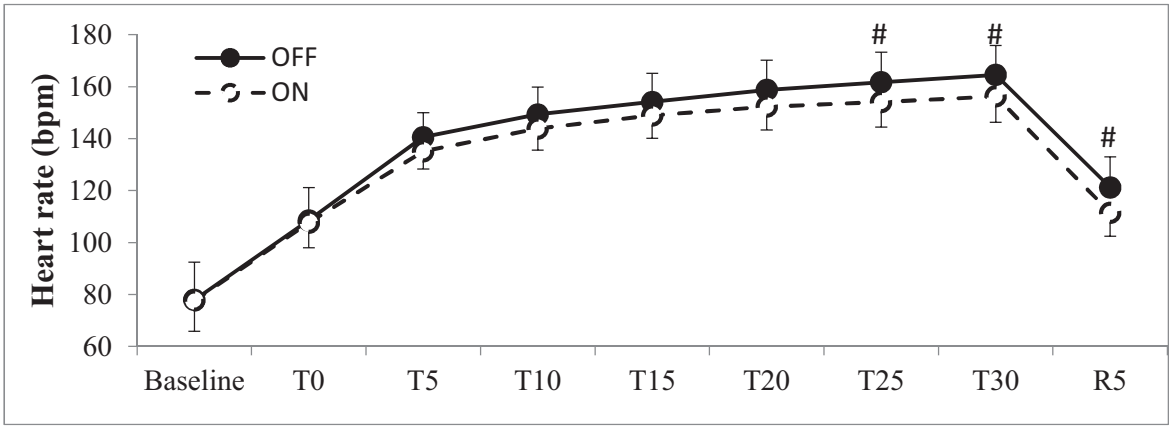


Figure 6: Heart rate responses during exercise and recovery. # Significant difference between conditions ($p < 0.05$).

3.4. Étude 4: (Post-cooling)

a) Résumé:

An evidence-based approach for choosing post-exercise recovery techniques to reduce markers of muscle damage, soreness, fatigue and inflammation: a systematic review with meta-analysis.

Dupuy O, Douzi W, Theurot D, Bosquet L, Dugué B

❖ **Objectif**

Comparer l'effet des différentes techniques de récupération sur la gestion des DOMS, de la fatigue perçue, et des marqueurs des dommages musculaires (CK) et d'inflammation induits par l'exercice physique.

❖ **Méthodes**

La recherche bibliographique a permis d'identifier 1693 études potentielles à inclure dans l'analyse. Ensuite, une sélection très stricte des travaux a permis d'inclure seulement les études randomisées et contrôlées qui ont mis en place un exercice suivi d'une récupération et ont donné des détails pertinents sur : 1) la durée et l'intensité de l'exercice ainsi que la modalité et le moment de l'utilisation de la récupération 2) les mesures (moyenne ± écart type) de DOMS, fatigue et inflammation. Après une évaluation de la qualité méthodologique en utilisant l'échelle de Pedro et Van Tulder, les mêmes examinateurs ont lu et codé les différents modérateurs en lien avec les caractéristiques des sujets, de l'exercice et de la récupération.

❖ **Résultats**

Globalement, 99 études répondaient à tous les critères d'inclusion (80 pour les DOMS, 17 pour la fatigue perçue et 43 pour les marqueurs d'inflammation et des dommages musculaires).

La qualité méthodologique des études incluses :

Nous avons constaté que les résultats de nos analyses sont similaires en utilisant des études de qualité inférieure (score de qualité à l'échelle de Pedro inférieur à 5) et de qualité supérieure (score de qualité à l'échelle de Pedro supérieur à 5). Par conséquent, aucun biais dans nos résultats ne devrait résulter de la qualité des études incluses.

Effet des méthodes de récupération sur DOMS et la fatigue perçue :

La taille d'effet global (SMD) indique que dans l'ensemble lorsqu'une une technique de récupération est utilisée (au lieu d'une récupération passive) il a un impact sur la diminution des DOMS [SMD (95% CI) = -0.78 (-0.61 to -0.94), I2 = 56.62%] et de la fatigue perçue [SMD (95% CI) = -1.40 (-0.89 to -1.92), I2 = 33%]. Le massage, les vêtements compressifs, l'immersion, et la cryothérapie induisent une diminution de petit à grand effet sur la magnitude des DOMS. Une forte diminution de la fatigue perçue (-2,55 <g <-0,88) est observée suite à l'utilisation de massage, de vêtements compressifs et d'immersion.

Effet des méthodes de récupération sur les marqueurs d'inflammation (IL6, CRP) et de dommages musculaires (CK) :

En ce qui concerne les marqueurs d'inflammation et de dommages musculaires, nous avons observé une diminution globale avec un effet modéré sur la créatine kinase [SMD (95% CI) = -0.37 (-0.58 to -0.16), I2 = 40.15%], et un effet léger sur l'interleukine-6 [SMD (95% CI) = -0.36 (-0.60 to -0.12), I2 = 0%] et protéine C-réactive [SMD (95% CI) = -0.38 (-0.59 to -0.14), I2 = 39%].

Effet des caractéristiques d'immersion sur les DOMS, Fatigue perçue et inflammation :

À l'exception de l'immersion dans l'eau chaude (> 36 °C), toutes les autres températures entrainent des améliorations similaires pour ces variables.

❖ Discussion

Cette méta-analyse a permis d'identifier plusieurs techniques de récupération qui peuvent être utilisées après l'exercice physique pour réduire les DOMS et / ou la fatigue perçue. Parmi elles, le massage semble la technique la plus efficace à la fois pour réduire les DOMS et la fatigue. L'immersion dans l'eau (froide ou contrastée), la cryothérapie et l'utilisation de vêtements compressifs ont également un impact positif sur les mêmes variables mais avec un effet moins prononcé. De plus, les techniques les plus puissantes pour réduire l'inflammation semblent être le massage et l'exposition au froid (l'immersion dans l'eau et la cryothérapie). Les études portant sur cette thématique dans la littérature scientifique ont généralement comparé l'efficacité de ces techniques mais séparément d'où l'utilité de cette méta-analyse qui clarifie le rôle de chaque technique de récupération sur les paramètres de récupération les plus utilisées dans le domaine sportif soit après une séance d'entraînement ou soit après une compétition.

On peut conclure les points suivants de cette étude :

- Pour la gestion des DOMS, la technique la plus efficace est le massage.
- Pour récupérer de la fatigue, les techniques les plus efficaces sont les techniques de compression telles que les vêtements compressifs ou l'immersion dans l'eau froide.
- Pour réduire rapidement l'inflammation, les meilleures techniques sont le massage et l'exposition au froid (immersion dans l'eau froide ou cryothérapie).

frontiers in Physiology

SYSTEMATIC REVIEW
published: 26 April 2018
doi: 10.3389/fphys.2018.00403

An Evidence-Based Approach for Choosing Post-exercise Recovery Techniques to Reduce Markers of Muscle Damage, Soreness, Fatigue, and Inflammation: A Systematic Review With Meta-Analysis

Olivier Dupuy, Wafa Douzi, Dimitri Theurot, Laurent Bosquet and Benoit Dugué*

Laboratoire MOVE (EA6314), Faculty of Sport Sciences, University of Poitiers, Poitiers, France

OPEN ACCESS

Edited by:
François Billaut,
Laval University, Canada

Reviewed by:
Aaron Petersen,
Victoria University, Australia
James Broatch,
Victoria University, Australia

***Correspondence:**
Olivier Dupuy
olivier.dupuy@univ-poitiers.fr

Specialty section:
This article was submitted to Exercise Physiology, a section of the journal Frontiers in Physiology

Received: *05 October 2017*
Accepted: *04 April 2018*
Published: *26 April 2018*

Citation:
Dupuy O, Douzi W, Theurot D, Bosquet L and Dugué B (2018) An Evidence-Based Approach for Choosing Post-exercise Recovery Techniques to Reduce Markers of Muscle Damage, Soreness, Fatigue, and Inflammation: A Systematic Review With Meta-Analysis. Front. Physiol. 9:403. doi: 10.3389/fphys.2018.00403

Introduction: The aim of the present work was to perform a meta-analysis evaluating the impact of recovery techniques on delayed onset muscle soreness (DOMS), perceived fatigue, muscle damage, and inflammatory markers after physical exercise.

Method: Three databases including *PubMed*, *Embase*, and *Web-of-Science* were searched using the following terms: ("recovery" or "active recovery" or "cooling" or "massage" or "compression garment" or "electrostimulation" or "stretching" or "immersion" or "cryotherapy") and ("DOMS" or "perceived fatigue" or "CK" or "CRP" or "IL-6") and ("after exercise" or "post-exercise") for randomized controlled trials, crossover trials, and repeated-measure studies. Overall, 99 studies were included.

Results: Active recovery, massage, compression garments, immersion, contrast water therapy, and cryotherapy induced a small to large decrease ($-2.26 < g < -0.40$) in the magnitude of DOMS, while there was no change for the other methods. Massage was found to be the most powerful technique for recovering from DOMS and fatigue. In terms of muscle damage and inflammatory markers, we observed an overall moderate decrease in creatine kinase [SMD (95% CI) = −0.37 (−0.58 to −0.16), $I^2 = 40.15\%$] and overall small decreases in interleukin-6 [SMD (95% CI) = −0.36 (−0.60 to −0.12), $I^2 = 0\%$] and C-reactive protein [SMD (95% CI) = −0.38 (−0.59 to−0.14), $I^2 = 39\%$]. The most powerful techniques for reducing inflammation were massage and cold exposure.

Conclusion : Massage seems to be the most effective method for reducing DOMS and perceived fatigue. Perceived fatigue can be effectively managed using compression techniques, such as compression garments, massage, or water immersion.

Keywords: meta-analysis, recovery, DOMS, fatigue, inflammation, muscle damage, intervention efficiency

INTRODUCTION

Scientific evidence gathered during the past few decades has allowed the identification of the most efficient training strategies for improving physical performance. However, maximizing the performance capacity of an athlete is not only a matter of training. It also depends on an optimal balance between training and recovery in order to prevent maladaptation to accumulated psychological and physiological stresses induced by the training load (Meeusen et al., 2013; Soligard et al., 2016).

Indeed, competition and training can induce repeated eccentric contractions (Ispirlidis et al., 2008) and tissue vibrations (Friesenbichler et al., 2011) that can lead to muscle damage (i.e., disruption of structural proteins in muscle fibers and/or connective tissues), subsequent tissue inflammation, delayed onset muscle soreness (DOMS), and increased perceived fatigue (Cheung et al., 2003; Dugué, 2015). Changes in the blood concentrations of muscle damage indicators [i.e., creatine kinase (CK)] and inflammatory biomarkers [C-reactive protein (CRP) and interleukin-6 (IL-6)] that are observed after exercise and are associated with the occurrence of DOMS can also be used to achieve skeletal muscle recovery (Bishop et al., 2008; Banfi et al., 2009; Stacey et al., 2010; Leal Junior et al., 2011).

These exercise-induced perturbations can lead to a temporary reduction in muscular force (Brown et al., 1997; Goodall and Howatson, 2008; Mackey et al., 2008), a disturbed sense of joint position (Saxton et al., 1995; Paschalis et al., 2007), decreased physical performance (Twist and Eston, 2009; Burt and Twist, 2011), and/or an increased risk of injury (Cheung et al., 2003; Barnett, 2006). In this context, it is important for coaches and sports scientists to optimize the recovery period in order to manage muscle damage and alleviate DOMS, inflammation, and fatigue, thereby allowing the athlete to feel less fatigued and decrease the risk of injury (Cheung et al., 2003; Soligard et al., 2016) or maladaptation to the training load (Kenttä and Hassmén, 1998; Meeusen et al., 2013).

In terms of the training frequency of elite athletes, a brief duration between two training sessions may not be enough to achieve a complete recovery (Barnett, 2006; Minett and Duffield, 2014), which is defined as the return to homeostasis of various physiological systems following metabolic and inflammatory challenges and muscle damage induced by exercise training sessions (Hausswirth and Le Meur, 2011). The interaction between the training load, subsequent fatigue and adaptation is complex (Fröhlich et al., 2014; Halson et al., 2014; Roberts et al., 2015) and may be modulated (positively or negatively) by the recovery strategy (Minett and Costello, 2015). Therefore, the choice of recovery techniques is of utmost importance to enable the athlete to perform during the next training session feeling rested, not fatigued, healthy, and injury-free (Hausswirth and Le Meur, 2011).

Several kinds of recovery interventions have been proposed to improve recovery after physical exercise (Barnett, 2006; Bishop et al., 2008; Robson-Ansley et al., 2009; Nédélec et al., 2013; Kovacs and Baker, 2014), including the following: compressive techniques, such as massage (Kargarfard et al., 2016), compressive garments (Marqués-Jiménez et al., 2016), or water immersion (Leeder et al., 2012); electrostimulation (Bieuzen et al., 2014a); stretching (Herbert and Gabriel, 2002); anti-inflammatory interventions relying on cold exposure, such as cryotherapy (Costello et al., 2015) or cold water immersion (Poppendieck et al., 2013); and active recovery (Andersson et al., 2008). Depending on the timing and the context, these interventions can target either central or peripheral mechanisms (Minett and Duffield, 2014). The mechanisms underlying the beneficial effects of recovery may be technique dependent. However, most of them are share common processes that allow decreases in exercise-induced muscle damage and inflammation. Such mechanisms enable a reduction in the space available for swelling and oedema formation, thereby limiting fluid diffusion into the interstitial space and facilitating the transport of metabolites/neutrophils/damage proteins from the muscle to the blood through changes in blood and lymph flow (Barnett, 2006; Bishop et al., 2008; Robson-Ansley et al., 2009; Nédélec et al., 2013; Kovacs and Baker, 2014).

Our knowledge of the dose-response relationship between different protocols and the magnitude of their impact on DOMS, fatigue, muscle damage, and inflammatory markers has greatly improved for each of the recovery techniques, and some evidence-based recommendations are now available. The difficulty for athletes, coaches, sports scientists, and medical staff is that very few studies have compared the impact of these techniques with the others, and there is a lack of information to facilitate choosing the best adequate recovery techniques. Furthermore, no comparisons of the impacts of different recovery techniques have been presented using a meta-analysis thus far. Therefore, the aim of the present work is to compare the effects of the most commonly used recovery techniques on muscle damage, DOMS, inflammation, and the perception of fatigue induced by physical exercise through a meta-analysis of the scientific literature.

METHODS

Literature Search

Three databases, namely, *PubMed* (1949 to 2017), *Embase* (1974 to 2017), and *Web-of-Science* (1945 to 2017), were searched using the following terms: ("recovery" or "active recovery" or "cooling" or "massage" or "compression garment" or "electrostimulation" or "stretching" or "immersion" or "cryotherapy") and ("delayed onset muscle soreness (DOMS)" or "perceived fatigue" or "creatine kinase (CK)" or "C-reactive protein (CRP)" or "interleukin-6 (IL-6)") and ("after exercise" or post-exercise") for "English" or "French-language" randomized controlled trials, crossover trials, and repeated-measure studies. In addition, we completed our literature search with two databases that contain theses and dissertations (*Kinpubs* and *Sport-Discus*) and thereby included "gray literature" (i.e., literature that is difficult to locate or retrieve, Moher et al., 1999). The reference lists of the articles obtained were searched manually to obtain additional studies that were not electronically identified. This led to the identification of 1693 potential studies for inclusion in the analysis (**Figure 1**). The last update was made on November 6, 2017.

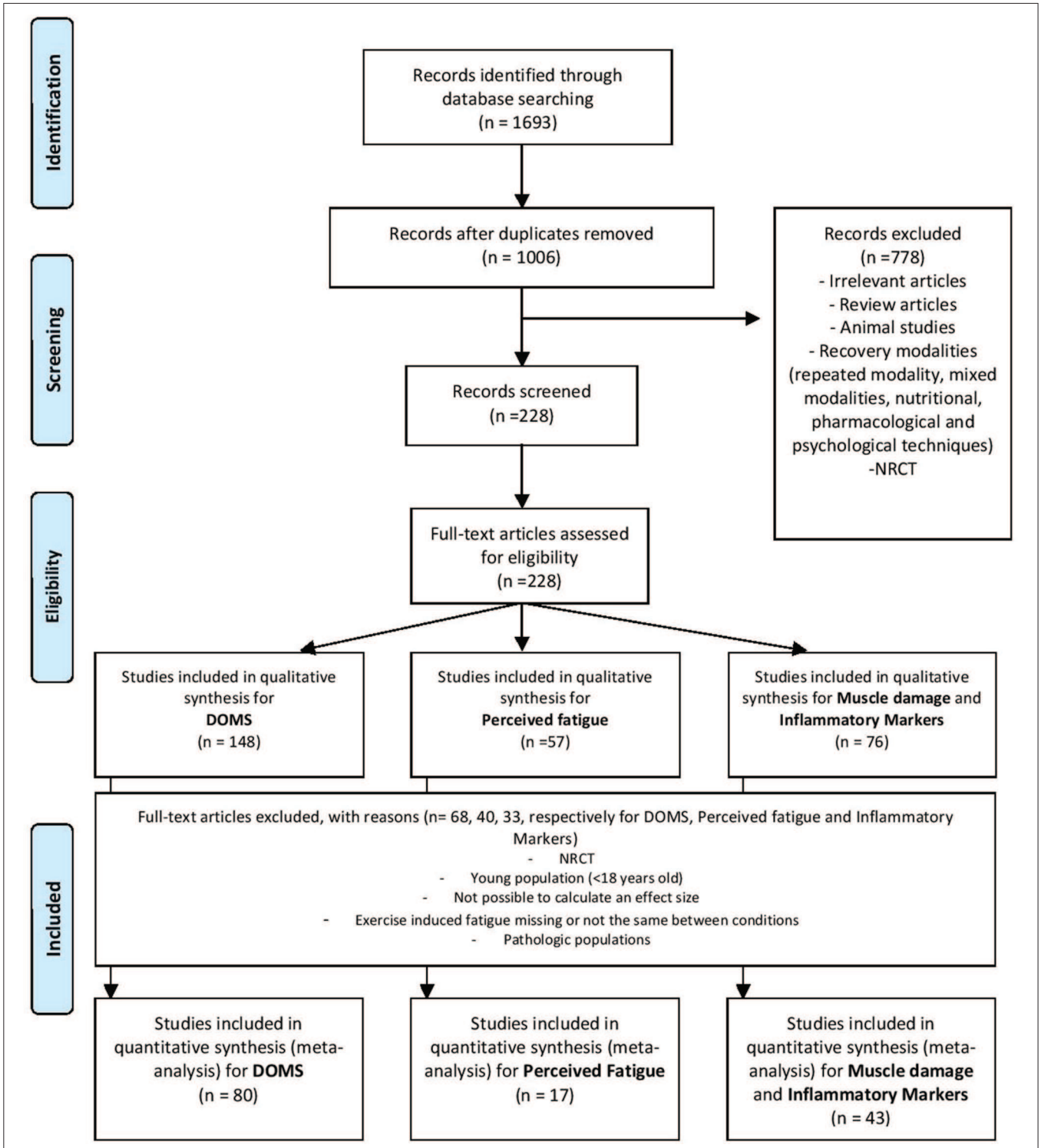


FIGURE 1 | Flow chart.

Selection Criteria

Studies were eligible for inclusion if the met the following criteria: (1) they implemented an exercise intervention followed by a recovery intervention and provided relevant details about the procedures, including the modality, duration and intensity of exercise; (2) they detailed the modality and timing of the recovery

intervention [repeated sessions of recovery and/or combined modalities were not included (e.g., ice + massage)]; (3) the outcome included valid tests and measures of DOMS, perceived fatigue, muscle damage, and inflammation markers in healthy humans adults (>18 years to <65 years); and (4) they reported the number of participants and all the necessary data to calculate effect sizes. Studies were excluded if they presented results from a previous publication (duplicated data). Our study protocol followed the Quality of Reporting of Meta-analyses (QUOROM) (Moher et al., 1999) and the Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses (PRISMA) statements (Moher et al., 2009). The exclusion criteria are detailed in **Figure 1**.

Coding for the Studies

Two independent reviewers who were blinded to authors, affiliations, and the publishing journal independently read and coded all the included articles (Jadad et al., 1996) using the PEDro scale (Maher et al., 2003) and the van Tulder scale (van Tulder et al., 2003). Following this quality assessment, the same reviewers read and coded each of the studies and assessed the following moderators: training status (competitive athletes, recreational athletes, or inactive people), sex (male, female, or both), exercise duration (minutes), exercise type [cardiorespiratory exercise (continuous or intermittent) or resistance exercise], exercise intensity (very light, light, moderate, vigorous, or maximal; according to the criteria of Garber et al., 2011), type of recovery (active recovery, stretching, massage, compression garment, electrostimulation, immersion, contrast water therapy, cryotherapy, or hyperbaric therapy), temperature of the immersion (<15°C, 15 to 35°C, or >35°C), level of immersion (arms, legs, or whole body), temperature of the cryotherapy chamber (> −80°C, −80 to −110°C, or < −110), and timing of the measurements (<6, 24, 48, 72, >96 h). An interval scale was used for the coding of exercise duration, while a nominal scale was used for the coding of the other moderators. Any disagreement between both reviewers was discussed in a consensus meeting, and unresolved items were addressed by a third reviewer for resolution.

Statistical Analysis

Standardized mean differences (SMDs) were calculated for each experimental group using Hedges' g (Hedges, 1981). In the studies that used multiple measures of a parameter of interest, a single composite SMD was calculated to estimate the overall effect (Borenstein et al., 2009). We decided *a priori* to use a random-effects model because the effect of a recovery intervention might differ according to the type of fatiguing exercise, training status, sex, or other moderators. Standardized mean differences were weighted by the inverse of the variance to calculate the overall effect and 95% confidence interval. Cohen's criteria were used to interpret the magnitude of the SMD: <|0.50|: small; |0.50| to |0.80|: moderate; and >|0.80|: large (Cohen, 1988). Statistical heterogeneity, which refers to the percentage of variability between studies that is due to clinical and methodological heterogeneity rather than sampling error, was assessed by the I^2 statistic (Borenstein et al., 2009). According to Higgins et al. (2003), I^2 values of 25, 50, and 75% represent low, medium, and high heterogeneity, respectively. The presence of medium or high heterogeneity may provoke further investigation through a subgroup analysis of moderator variables (sex, exercise, training status, technique of recovery, level of immersion, and water temperature), even if the overall effect is considered non-significant (35). Weighted SMDs and standard errors were calculated for each category within the moderator variables; in addition, 95% confidence intervals were calculated to determine whether a given SMD was different from 0. A Q-test based on analysis of variance was performed to test the null hypothesis that the effect of recovery was similar among the categories of a moderator variable (Borenstein et al., 2009). When the null hypothesis was rejected, pairwise comparisons were performed with a Z test. The statistical significance level was set at $P = 0.05$. All calculations were carried out with a spreadsheet (Excel) and Comprehensive Meta-analysis software (www.meta-analysis.com).

RESULTS

Overall Results

The literature search identified 1693 potentially relevant publications spanning from 1958 to 2017, of which 99 studies met all the inclusion criteria (80 for DOMS, including 1188 participants and 106 experimental groups; 17 for perceived fatigue, including 266 participants and 27 experimental groups; 19 for inflammatory markers; and 37 for muscle damage marker). The numbers of participants and experimental groups for each inflammatory marker are reported in **Figures 2**, **3**. Funnel plots that were used to identify a possible publication bias are presented in **Figure 4**. With the exception of DOMS (23 studies out of 57 were distributed toward a positive effect), inflammatory markers (4 studies out of 39 were distributed toward a positive effect), and perceived fatigue (9 studies out of 8 were distributed toward a positive effect), all the other measures were distributed symmetrically about the mean effect size, suggesting that the sampling error was random. We also performed a sensitivity analysis to determine whether the quality score of the studies should be considered as a possible effect modifier. We did not find any difference between groups (the criteria for group allocation was a quality score of 5).

Effect of Recovery Methods on DOMS, Perceived Fatigue, Inflammation and Muscle Damage

The overall SMD indicated a positive effect of a recovery intervention on the magnitude of DOMS [SMD (95% CI) = −0.78 (−0.61 to −0.94), I^2 = 56.62%] and perceived fatigue [SMD (95% CI) = −1.40 (−0.89 to −1.92), I^2 = 33%]. The presence of statistical heterogeneity justified the subgroup analysis of moderator variables, including population characteristics (sex and training status), as well as exercise (type, intensity, and duration) and recovery characteristics.

In terms of population characteristics, the only difference we found was a greater effect of a recovery intervention on the

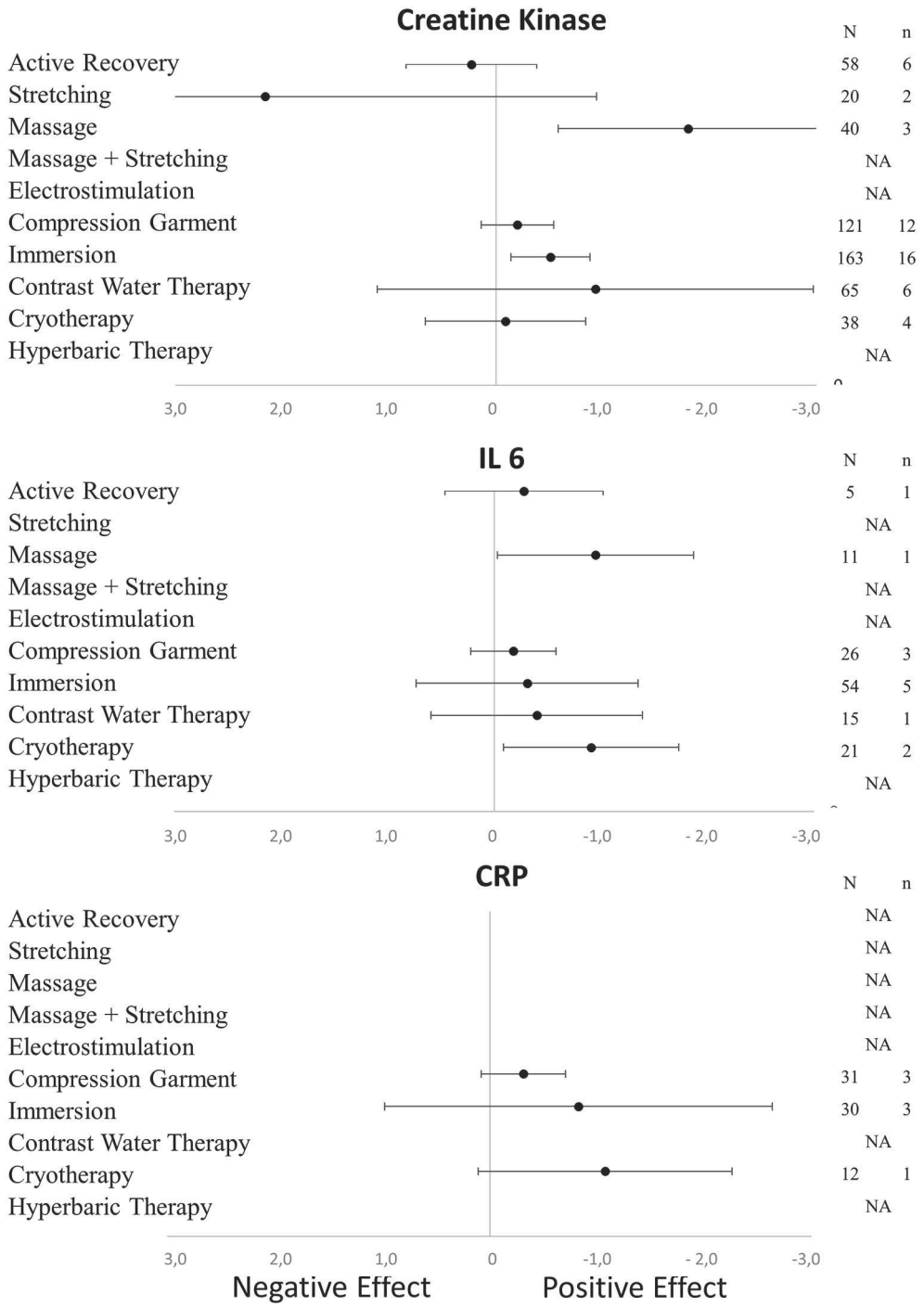


FIGURE 2 | Effects of recovery techniques on the kinetics of muscle damage (CK) and inflammatory markers (CRP and IL-6) (NA, not available; N, number of subjects; n, number of experimental groups).

magnitude of DOMS (but not on the magnitude of perceived fatigue) in males than in females ($-2.07 <$ Hedge's g for the difference < -0.43, $Z = 4.44$, $p < 0.01$). We found no effect of exercise characteristics on the efficiency of a recovery intervention on DOMS, perceived fatigue, markers of inflammation or muscle damage. In contrast, the time course of recovery was modulated by the characteristics of the techniques. As shown in **Table 1**, active recovery, massage, compression garments, immersion, contrast water therapy and cryotherapy induced a small to large decrease ($-2.26 < g < -0.40$) in

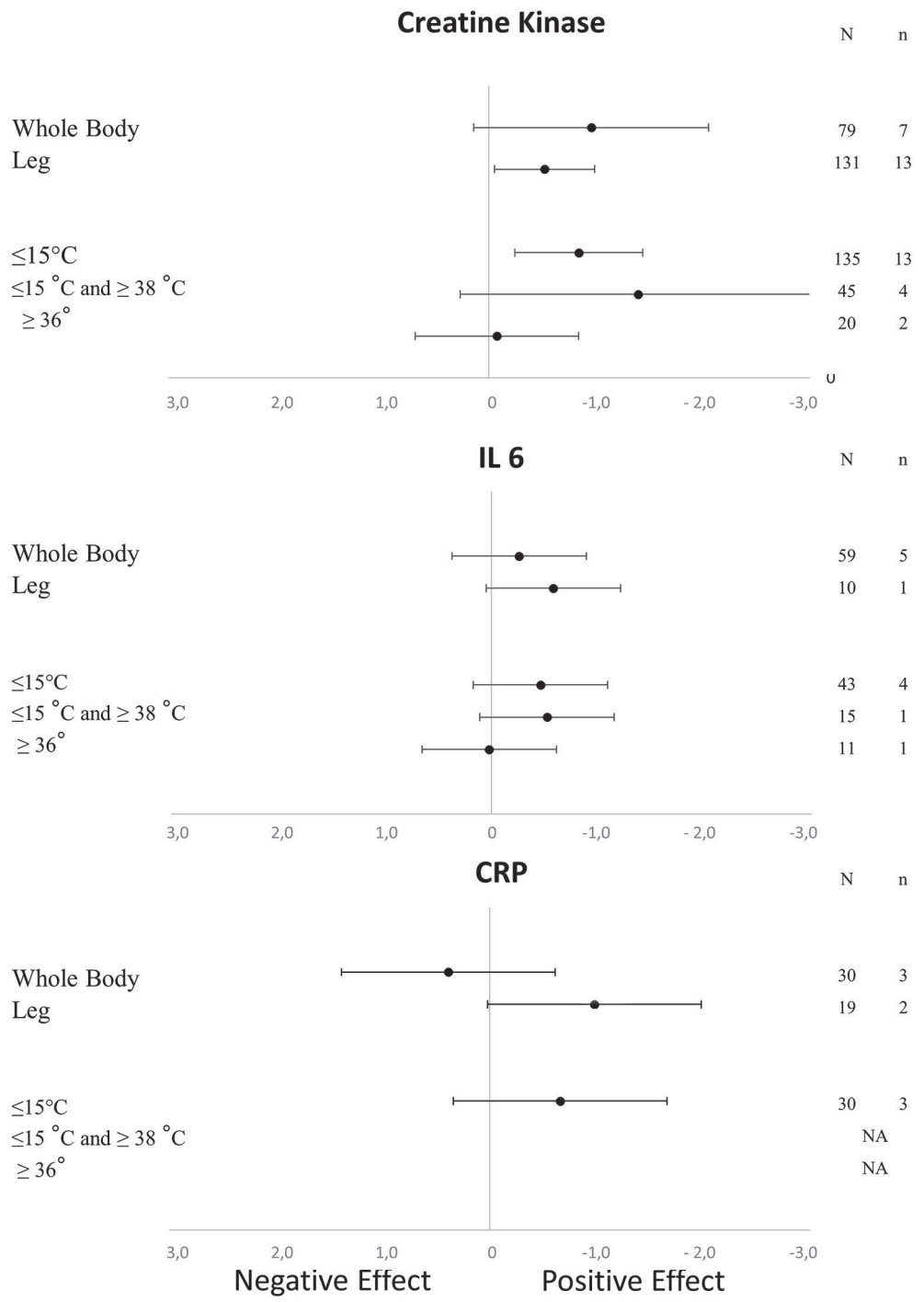


FIGURE 3 | Effects of the characteristics of immersion on the kinetics of muscle damage (CK) and inflammatory markers (CRP and IL-6) (NA, not available; N, number of subjects; n, number of experimental groups).

the magnitude of DOMS, while there was no change associated with the other methods. However, this adaptation was not necessarily associated with a similar magnitude decrease in perceived fatigue. In fact, we found a large decrease in this variable ($-2.55 < g < -0.88$) following the use of massage, compression garments and immersion, while the other methods had no significant effects. The time course effects of the recovery modalities on DOMS and perceived fatigue are presented in **Figure 5**. In terms of inflammation and muscle damage markers, we observed an overall moderate decrease in creatine kinase

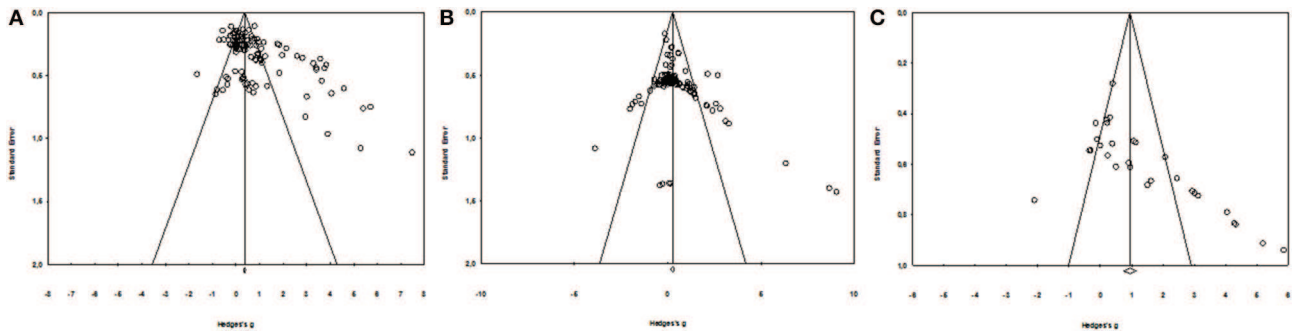


FIGURE 4 | Funnel Plot for DOMS **(A)**, muscle damage, and inflammatory markers **(B)** and perceived fatigue **(C)**.

TABLE 1 | Effects of recovery techniques on the kinetics of DOMS and perceived fatigue.

	Subjects (*n*)	Experimental group (*n*)	SMD	IC	I^2
DOMS	**1188**	**106**	**−0.78**	**−0.94; −0.61**	**56.62**
Active recovery	90	8	−0.94	−1.61; −0.28	*
Stretching	67	5	0.15	0.00; 0.29	
Massage	158	14	−2.26	−3.05; −1.47	*
Massage + Stretching			N/A		
Compression Garments	160	16	−0.92	−1.34; −0.50	*
Electrostimulation	94	8	−0.28	−0.59; 0.03	
Immersion	379	34	−0.47	−0.77; −0.18	*
Contrast water therapy	144	12	−0.40	−0.73; −0.07	*
Cryotherapy/ cryostimulation	72	6	−0.53	−1.04; −0.03	*
Hyperbaric therapy	24	3	0.55	−0.12; 1.22	
Perceived Fatigue	**266**	**27**	**−1.40**	**−1.92; −0.89**	**32.65**
Active recovery	33	4	0.64	−0.43; 1.70	
Stretching	30	1	−0.21	−1.04; 0.62	
Massage	64	7	−2.55	−3.49; −1.62	*
Massage + stretching	9	1	−4.34	−7.20; −1.47	*
Compression Garments	28	3	−0.88	−1.34; −0.50	*
Electrostimulation	11	1	−0.28	−0.59; 0.03	
Immersion	75	8	−1.16	−1.94; −0.39	*
Contrast water therapy	16	2	−0.04	−0.86; 0.79	
Cryotherapy/ cryostimulation			NA		
Hyperbaric therapy			NA		

*SMD, standardized mean differences; IC, interval of confidence; NA, not available; * significant; − indicates a decrease and + indicates an increase in DOMS and perceived fatigue after the recovery strategy.*

[SMD (95% CI) = −0.37 (−0.58 to −0.16), I^2 = 40.15%] and overall small decreases in interleukin-6 [SMD (95% CI) = −0.36 (−0.60 to −0.12), I^2 = 0%] and C-reactive protein [SMD (95% CI) = −0.38 (−0.59 to −0.14), I^2 = 39%]. The specific effects of each method on these markers are presented in **Figure 4**, and the time course is shown in **Figure 6**.

Effect of the Immersion Characteristics on DOMS, Perceived Fatigue, Inflammation, and Muscle Damage

As shown in **Table 1**, we found a positive effect of immersion and contrast water therapy on the magnitude of DOMS [SMD (95% CI) = −0.47 (−0.77 to −0.18), I^2 = 50.55% and −0.40 (−0.73 to −0.07), I^2 = 17.07%, respectively]. In terms of perceived fatigue, we observed a positive effect following immersion [SMD (95% CI) = −1.16 (−1.94 to −0.39), I^2 = 41.13%], while there was no change after contrast water therapy [SMD (95% CI) = −0.04 (−0.86 to 0.79), I^2 = 0.00%]. The effect of each immersion procedure (i.e., immersion level and water temperature) on DOMS and perceived fatigue is presented in **Table 2**. These specifics effects of immersion on inflammation and muscle damage markers are presented in **Figure 3**. With the exception of immersion in warm water (>36°), all the procedures were associated with similar improvements.

DISCUSSION

In this meta-analysis, we compared the impacts of a single session of different kinds of recovery techniques after physical exercise on DOMS, perceived fatigue, inflammatory [interleukin-6 (IL-6), C-reactive protein (CRP)], and muscle damage markers [creatine kinase (CK)]. The different recovery techniques we investigated were the following: active recovery, stretching, massage, massage combined with stretching, the use of compression garments, electrostimulation, immersion, contrast water therapy, cryotherapy/cryostimulation, and hyperbaric therapy/stimulation. Massage was found to be the most powerful procedure that induced significant benefits in DOMS and perceived fatigue, regardless of the subjects (athletes, sedentary subjects). Additionally, both the use of compression garments and immersion induced a significant positive impact on the same variables but with a less pronounced effect. Active recovery, contrast water therapy and cryotherapy had a positive impact only on DOMS, whereas massage combined with stretching also induced benefits in perceived fatigue. The other techniques did not have a significant impact on DOMS or fatigue but had some effects on circulating CK, IL-6, and CRP concentrations in the blood.

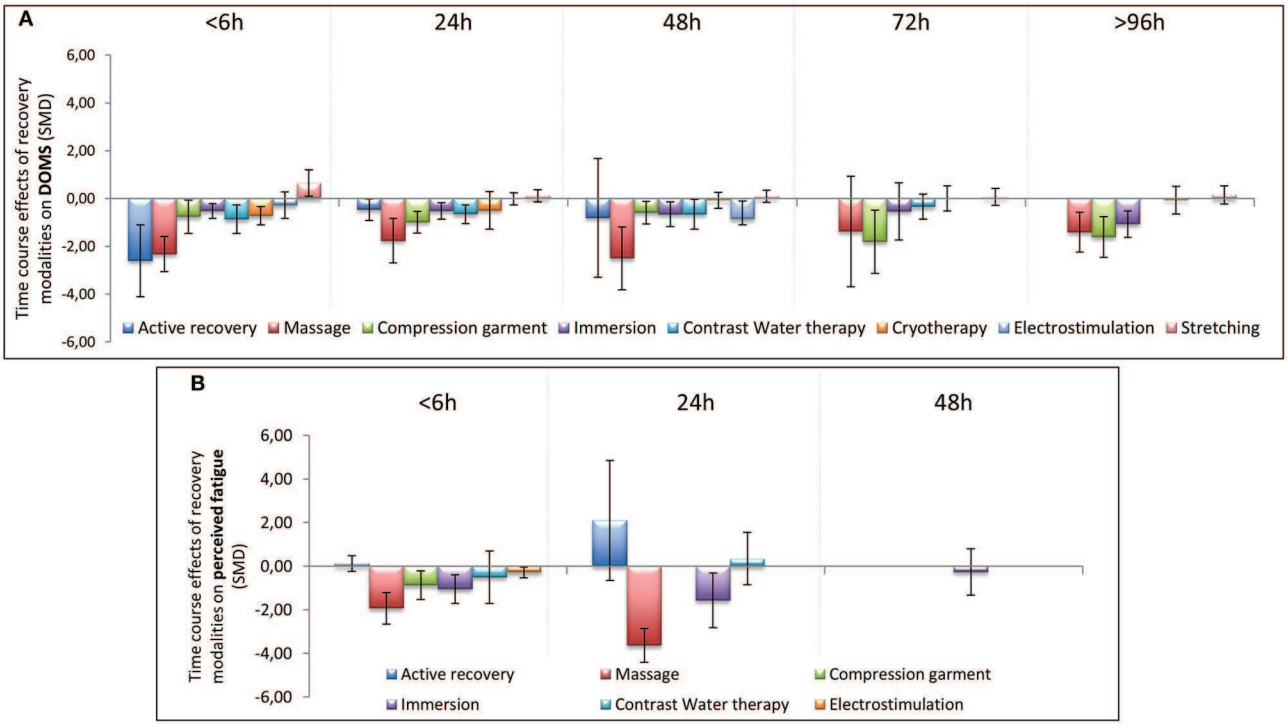


FIGURE 5 | Time course effect of recovery modalities on DOMS **(A)** and perceived fatigue **(B)**. The results are presented as SMD ± IC (SMD, standardized mean differences; IC, interval of confidence).

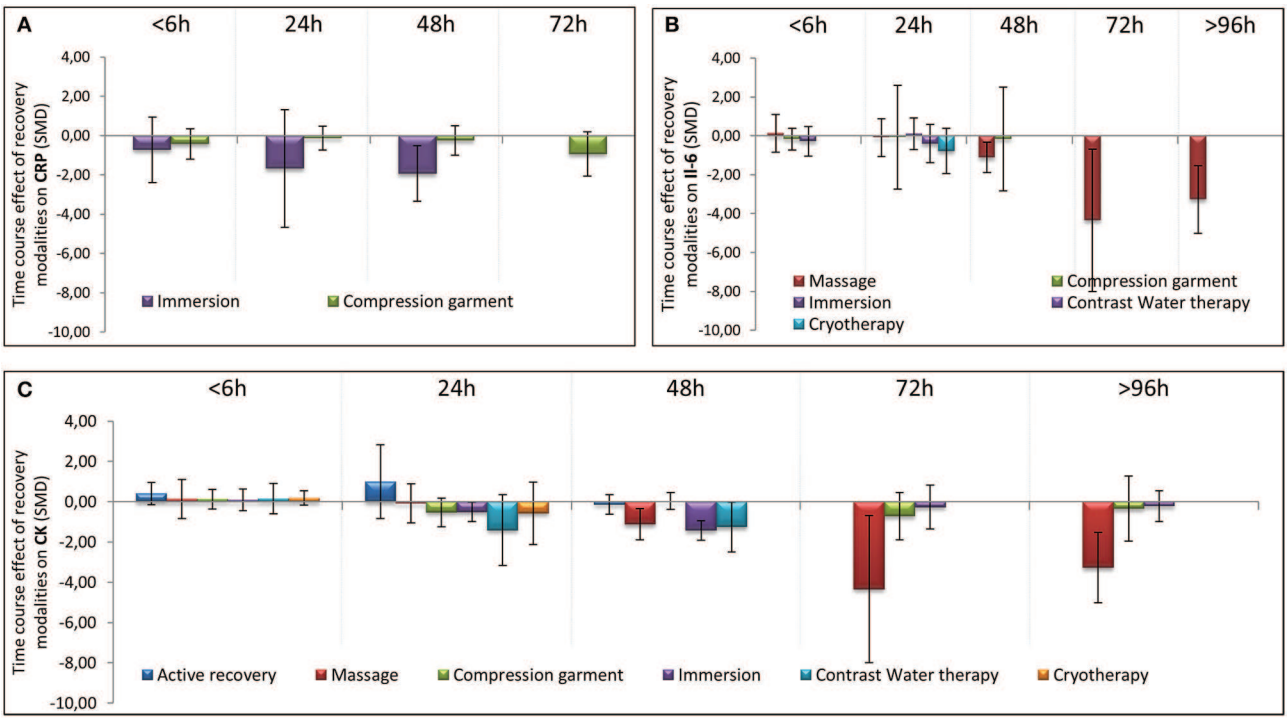


FIGURE 6 | Time course effect of recovery modalities on CRP **(A)**, IL-6 **(B),** and CK **(C)**. The results are presented as SMD ± IC (SMD, standardized mean differences; IC, interval of confidence).

TABLE 2 | Effects of the characteristics of immersion on the kinetics of DOMS and perceived fatigue.

	Subjects (*n*)	Experimental group (*n*)	SMD	IC	I^2
DOMS					
Whole Body	129	12	−0.50	−0.96; −0.04	*
Leg	271	25	−0.49	−0.78; −0.20	*
≤15°C	234	23	−0.62	−0.93; −0.32	*
≤15°C and ≥ 38°C	116	10	−0.40	−0.73; −0.07	*
≥ 36°	30	3	0.53	−0.44; 1.51	
PERCEIVED FATIGUE					
Whole Body	11	1	0.00	−1.03; 1.03	
Leg	80	9	−1.40	−2.22; −0.58	*
≤15°C	75	8	−1.16	−1.94; −0.39	*
≤15°C and ≥ 38°C	16	2	−0.04	−0.86; 0.79	

*SMD, standardized mean differences; IC, interval of confidence; NA, not available; * significant; − indicates a decrease and + indicates an increase in DOMS and perceived fatigue after the recovery strategy.*

Massage

Massage is a very traditional way to improve recovery after physical exercise both in sports and rehabilitation contexts, and we found a positive effect of this practice. DOMS is induced by muscle damage, and massage may increase muscle blood flow and reduce muscle oedema (Weerapong et al., 2005; Bakar et al., 2015). A 20–30 min massage that is performed immediately following or up to 2 h after exercise has been shown to effectively reduce DOMS for 24 h after exercise (Torres et al., 2012). Moreover, our results are in accordance with a recent meta-analysis that reported that massage decreases DOMS for 72 h after exercise (Guo et al., 2017). We even found a significant impact up to 96 h after exercise.

In elites athletes (ultra-marathon runners), massage generated a significant improvement in lowering perceived pain (Visconti et al., 2015). Such an improvement might impact perceived fatigue, and our meta-analysis revealed that massage was the most effective technique to reduce perceived fatigue. Following intense cycle pedaling, Ogai et al. (2008) clearly found that perceived fatigue was more effectively reduced by massage than by passive rest without massage. A reduction in circulating cortisol (Field et al., 2005) and an increase in the concentration of beta-endorphins (Kaada and Torsteinb, 1989) have been proposed to explain the reduction of perceived fatigue following massage. Indeed, a 16% rise in the concentration of beta-endorphins in the plasma has been reported following a 30-min massage after exercise (Kaada and Torsteinb, 1989).

Creatine kinase, interleukin-6 and C-reactive protein have often been evaluated in studies concerning DOMS and fatigue, as muscle damage and inflammation are involved (Connolly et al., 2003). In the present meta-analysis, we observed that massage was the most effective recovery technique for reducing the concentrations of circulating CK and IL-6 in the blood after exercise. A decrease in the CK concentration in the blood might reflect a reduction in muscle damage and also indicate a faster recovery after exercise (Bishop et al., 2008). Torres et al. (2012) showed that massage was effective in alleviating the symptoms of exercise-induced muscle damage and was associated with a decrease in plasma CK activity after eccentric exercise (Zainuddin et al., 2005). By increasing blood and lymph flow, massage treatment blunts the CK response due to enhanced CK efflux from damaged tissues and increased CK clearance from the blood (Smith et al., 1994). Furthermore, it has been assumed that massage improves the flushing of neutrophils from the injured area thereby preventing fiber necrosis and CK efflux (Zainuddin et al., 2005). Interestingly, a recent report showed a beneficial effect of massage in decreasing the CK level at 48 h and 72 h in male bodybuilders after intense exercise (Kargarfard et al., 2016), and this effect was confirmed in a recent meta-analysis (Guo et al., 2017).

Massage may also modulate immune compounds when applied after exercise, and these compounds may have a direct impact on fatigue and signs of exercise-induced muscle damage (Tejero-Fernández et al., 2015). In an elegant study in which subjects underwent a series a biopsies of the vastus lateralis following a period of rest after exercise combined with massage on one leg and passive recovery on the other, massage therapy was shown to attenuate inflammatory signaling and IL-6 expression in muscles after exercise-induced muscle damage (Crane et al., 2012). Almost no data are available concerning the effect of massage on CRP concentrations in the blood. Combining stretching with massage has recently been studied (Delextrat et al., 2014). A significant reduction in fatigue was shown. However, discrepancies in the results were found in males and females, with a faster and shorter reduction in fatigue in females (Delextrat et al., 2014).

Compression Garments

Similar to massage, both the use of compression garments and cold water immersion induced a significant and positive impact on DOMS and perceived fatigue but had a less pronounced effect. It has been previously reported in a narrative review (MacRae et al., 2011) and meta-analysis (Hill et al., 2014; Marqués-Jiménez et al., 2016) that the use of compressive garments after damaging exercise affected DOMS. Moreover, recent works confirmed these findings and showed that the effects were still significant at 96 h after exercise (Marqués-Jiménez et al., 2016). Our present study confirmed the significant impact of compression garments on DOMS at 96 h after exercise. We also found a significant decrease in perceived fatigue when compression garments were used. It has been shown that wearing a whole-body compression garment over a 24-h period after intense heavy resistance training significantly reduces perceived fatigue (Kraemer et al., 2010). The beneficial effect of compression garments on DOMS and perceived fatigue might be explained by a possible reduction in the space available for swelling and oedema due to the compression applied to the limb, smaller changes in osmotic pressure that might diminish fluid diffusion in the interstitial space and better venous return (Kraemer et al., 2001).

It has been suggested that using a compression garment may also reduce exercise-induced muscle damage and inflammation (Kraemer et al., 2004). However, in our meta-analysis, we

did not observe any significant changes in CK, IL-6, or CRP concentrations after the use of compression garments following exercise. This result is in contrast with a former meta-analysis that found that the use of compression garments was effective for reducing the CK concentration (Hedges' g = 0.44, 95% CI 0.17–0.70) (Hill et al., 2014). In the present meta-analysis, the inclusion criteria were quite stringent, and this certainly influenced the number and the quality of the selected studies. Additionally, in the scientific literature concerning CK concentration and compression garments, there is a very wide range of study protocols. Some discrepancies in the findings exist and may nevertheless be explained by the different recovery period lengths, the lengths of the applied compression (Rimaud et al., 2010), the amount of pressure applied and the place (upper limbs, lower limbs, and even on whole-body) where the compression is applied (Beliard et al., 2015; Brown et al., 2017; Hill et al., 2017). Additionally, individual variability in the sensitivity to blood flow changes may also be of importance (Bishop et al., 2008; Leeder et al., 2012). Similar remarks can be made for the absence of changes in IL-6 and CRP concentrations. Moreover, it previously been expressed that in the majority of the published works concerning the use of compression garments, the exercise protocols were not intense enough to induce a sufficient degree of muscle damage (Pruscino et al., 2013; Bieuzen et al., 2014b).

Immersion

The effect of cold water immersion (CWI) on DOMS and perceived fatigue was significant, but the effect size was small in terms of DOMS. A previous meta-analysis indicated that CWI induced a significant effect that was still observable at 96 h after exercise when compared with passive recovery (Bleakley et al., 2012). In the same publication, a lower rating of perceived fatigue was observed after CWI (Bleakley et al., 2012). The improvement in overall fatigue through the use of CWI has been reported in several circumstances after training and competition (e.g., soccer tournaments or basketball matches) (Rowsell et al., 2011; Delextrat et al., 2014). Another meta-analysis showed a positive effect (SMD = 0.52) of CWI on lowering DOMS after strenuous exercise in trained athletes and in untrained subjects or those who exercised recreationally (Leeder et al., 2012). An exposure of 11–15°C over 11–15 min was considered to be the optimal circumstance to obtain a positive impact of CWI after exercise to reduce DOMS (Machado et al., 2016). In our meta-analysis, we were able to detect significant differences depending on the water temperature. We observed that only immersion in water with a temperature lower than 15°C had a positive impact on inflammation. Depending on the type of exercise, the duration of immersion, the level of immersion and the water temperature, the outcomes were sometimes at variance.

Several mechanisms have been presented to explain the benefits of CWI on recovery (Ihsan et al., 2016). A common explanation of the impact of CWI on DOMS and fatigue is a reduction in exercise-induced inflammation and muscle damage. We found a significant positive effect of CWI on the CK concentration in the blood after intensive exercise, but the effect size was small. A moderate decrease of circulating CK has previously been reported with the use of CWI after exercise (Leeder et al., 2012; Sanchez-Ureña et al., 2015). Both the level of immersion and the cold temperature of the water may reduce the formation of oedema and pain sensation after exhaustive physical exercise (Wilcock et al., 2006a,b). Hydrostatic pressure may facilitate the transport of fluids from the muscle to the blood and therefore eliminate metabolites (Wilcock et al., 2006a,b; Leeder et al., 2012). Vasoconstriction due to cold temperature may also reduce fluid diffusion into the interstitial space (Eston and Peters, 1999) and locally diminish the inflammatory reaction (Coté et al., 1988), which in turn may reduce the feeling of pain (Smith, 1991). Cold alone has also a direct analgesic impact (Leppäluoto et al., 2008). However, some other authors did not detect any changes in the CK concentration after the use of CWI following exhaustive physical exercise (Bleakley et al., 2012; Hohenauer et al., 2015). No significant effect was observed in our meta-analysis concerning changes in IL-6 and CRP concentrations in the blood. A similar observation has already been presented (Halson et al., 2008; Hohenauer et al., 2015).

Contrast Water Therapy

Contrast water therapy (CWT) is often used for recovery purposes and consists of bathing alternately in warm and cold water. We found that CWT had a significant impact on DOMS (though the effect size was small) but not on perceived fatigue. A systematic review has previously expressed the significant impact of using this technique to improve recovery (Hing et al., 2008). A more recent work also showed the effectiveness of this technique after various forms of exhaustive and damaging exercises (Bieuzen et al., 2013). CWT was also able to significantly reduce the perception of pain at 24, 48, and 72 h post-eccentric exercise (Vaile et al., 2008). Alternating therapy with cold and warm water immersion induces successive peripheral vasoconstriction and vasodilation (Bieuzen et al., 2013) and may reduce the formation of oedema after exercise, influence inflammatory pathways and decrease the feeling of pain (Higgins and Kaminski, 1998). Additionally, in the present meta-analysis, we found that CWT reduced CK concentrations in the blood, indicating reduced muscle damage.

Active Recovery

Active recovery (AR) had a similar effect to CWT on DOMS (but with a larger effect size) with no impact on perceived fatigue. The effect of AR after exhaustive exercise on DOMS has been known for more than 30 years (Armstrong, 1984). However, the impact of AR is only significant during a short period after exercise (Zainuddin et al., 2006). In our meta-analysis, we were not able to show a superior influence of AR compared with the other recovery techniques we studied. Similarly, when scrutinizing the scientific literature, no extra beneficial effect of AR was observed after high-intensity eccentric exercise when compared with the benefits obtained from massage and electrostimulation (Weber et al., 1994). We were not able to detect any influence of AR on CK, IL-6, and CRP concentrations in the blood. However, the impact of AR on the CK concentration may depend on the duration of treatment. For instance, after a rugby contest, 1 h of low-intensity aquatic exercise had no impact on the circulating

CK concentration (Suzuki et al., 2004), whereas 7 min of low-intensity exercise enhanced CK clearance (Gill et al., 2006). The significant effect of AR may be explained through enhanced blood flow in muscle tissue, which facilitates the removal of metabolic waste, and may contribute to a reduction in muscle lesions and pain (Cheung et al., 2003).

Cryotherapy

Cryotherapy/cryostimulation was effective in reducing DOMS after exercise but had a rather low effect size. The impact may, however, be at variance. This is probably due to the large amount of heterogeneity among the cryostimulation methods that were used (e.g., exposure in a cold chamber or in a cryo-cabin where the head was not exposed; the timing of the exposure either immediately following or 24 h after exercise; the temperature that ranged from −30 to −195°C; and the number of cryostimulation treatments that were used after exercise) and the exhaustive exercises chosen to induce DOMS and fatigue. With a cryotherapy/cryostimulation exposure organized after a physical exercise, Fonda et al. (Fonda and Sarabon, 2013) found a positive effect of whole body cryotherapy (WBC) on DOMS after an exposure of 3 min exposure at −140 and −195°C. However, Guilhem et al. (2013) and Vieira et al. (2015) did not find such an effect. In their meta-analysis, Costello et al. (2015) did not have sufficient evidence to recommend WBC for preventing muscle soreness. However, our results were in accordance with the conclusions presented in a recent review by Lombardi et al. (2017), in which the use of WBC was associated with an improvement in muscle fatigue, pain, and well-being. However, the present meta-analysis revealed that the effect on DOMS exists shortly after exposure, as we found a positive effect <6 h after exercise. However, this effect is not present after 24 h or later. Thus, cryotherapy performed 24 h after the end of exercise is ineffective in alleviating DOMS. Additionally, it seems that a single cryostimulation treatment does not influence CK and CRP concentrations in the blood after exercise. However, the situation may change if a series of cryostimulation treatments are applied. It has previously been reported that the regular use of cryostimulation after training may lead to lowering concentrations of both CK (by 30–40%) (Wozniak et al., 2007; Banfi et al., 2009) and CRP in the blood (Pournot et al., 2011). In our meta-analysis, a single cryostimulation treatment after exercise induced a significant decrease in IL-6 concentration in the blood.

Stretching/Electrostimulation

In the present work, we did not find any significant influence of stretching or electrostimulation on DOMS and fatigue. For some time stretching has not been recommended after exercise (Herbert and Gabriel, 2002; Herbert et al., 2011), as it might even lead to an increase in DOMS (Smith et al., 1993). The overall SMD in our study confirmed that stretching had no positive impact on DOMS. Moreover, our results at <6 h after exercise indicated that stretching might even produce DOMS, as initially reported by Smith et al. (1993). In terms of electrostimulation, some studies showed positive effects on DOMS (Denegar and Huff, 1988; Denegar and Perrin, 1992), and some found no effect (Craig et al., 1996; Butterfield et al., 1997). However, the protocols used for electrostimulation were different, which may explain, in part, the discrepancy of the outcomes (Babault et al., 2011).

LIMITATIONS

Despite the scientific interest raised by this meta-analysis, the methodology is not free of limitations. Both publication and language restriction bias may have inflated estimates of the effect. Therefore, care was taken to control for these sources of bias. Two of the databases used in the literature search (*Kinpubs* and *Sport-Discus*) included theses and dissertations, thereby allowing access to "gray literature." Some other limitations specific to the topic of this meta-analysis probably limited the thoroughness of the analyses. For example, the efficiency of a particular recovery technique depends on the type of fatigue induced by previous exercise. Although we coded the characteristics of the training load, it was not possible to address its interaction with the magnitude of the effect, and it might constitute the cornerstone of the global efficiency of a particular recovery strategy. Additionally, the quality of the papers was evaluated according to the PEDro and Van Tulder scales, which are widely used for assessing the methodological quality of clinical tests. A completely blind procedure involving the participants or assessors was impossible for the recovery modalities that were applied. Thus, the attainable maximum score of these scales was 8. However, the quality heterogeneity (varying from 4 to 8) of the included studies was controlled by statistical analysis. A sensitive analysis was performed to determine whether the quality score of the included studies was of importance. We found that the outcomes of our analyses were similar when the studies of lower quality (quality score in Pedro scale lower than 5) and those of higher quality (quality score in Pedro scale higher than 5) were included. Therefore, no bias in our results stemmed from the quality of the included studies. Additionally, given the practical difficulty of blinding the participants, investigators, and outcome assessors from the recovery modalities, the beneficial effect arising from the placebo effect of recovery techniques could not be eliminated.

Some very recently described recovery techniques, such as laser therapy and vibration platforms, were not included in this work. The main reason was because there were a very low number of studies that fulfilled our inclusion criteria, which did not allow the calculation of an effect size to compare with the other recovery techniques.

Finally, in the present work, our main focus was to evaluate muscle damage, soreness, perceived fatigue and inflammation, since these variables are important in short- and long-term recovery processes. Changes in these variables during the recovery period might yield some insights about peripheral and central recovery mechanisms. Since there can be a mismatch between blood-based measures of inflammation or soreness and the recovery of short-term muscular performance (Minett and Duffield, 2014), performance would also have been an important outcome. However, this factor was not evaluated in this manuscript. Performance is a complex concept, and there are

many ways to measure it. In many studies, tests and measures used to assess performance capacity are often not reliable or comparable. Additionally, many studies do not provide performance data. As stipulated (Hausswirth and Le Meur, 2011), recovery can be defined as the return to homeostasis of various physiological systems following metabolic and inflammatory challenges and muscle damage induced by exercise training sessions. When the athlete can meet their previous level of performance, this does not mean that the athlete has fully recovered from the previous session of exercise, particularly if perceived fatigue, muscle damage, DOMS and inflammation persist.

Although these limitations should be accounted for, it is worth noting that this is the first meta-analysis to compare several recovery modalities. Additionally, this meta-analysis may be a widely applicable tool for sports scientists, coaches, and medical staff.

CONCLUSION

In conclusion, we were able to identify several recovery techniques that can be used after a single exercise session to induce a reduction in DOMS and/or perceived fatigue. Among them, massage seems to be the most effective for both DOMS and perceived fatigue. Water immersion and the use of compression garments also have a significant positive impact on these variables but with a less pronounced effect. Perceived fatigue can be effectively managed using compression techniques, such as compression garments, massage, or water immersion. Furthermore, the most powerful techniques that provide recovery from inflammation are massage and cold exposure, such as water immersion and cryotherapy. In this meta-analysis only one recovery session was examined. Further research should be conducted in order to obtain a clearer picture of possible recovery techniques that best match athlete performance. It is of importance to know if similar outcomes are obtained when the same recovery technique is used on a regular basis after exercise. Additionally, studies combining several recovery techniques should be undertaken to investigate whether synergetic phenomena occur.

AUTHOR CONTRIBUTIONS

WD, DT, and OD have realized the research literature. WD and DT have coded the studies. WD, DT, OD, LB and BD have written the manuscript.

ACKNOWLEDGMENTS

The authors thank Denis Arvisais, (Msc Kin, MSI), librarian at the University of Montreal, for his help with the bibliographic research.

REFERENCES

Andersson, H. M., Raastad, T., Nilsson, J., Paulsen, G., Garthe, I., and Kadi, F. (2008). Neuromuscular fatigue and recovery in elite female soccer: effects of active recovery. *Med. Sci. Sports Exerc.* 40, 372–380. doi: 10.1249/mss.0b013e31815b8497

Armstrong, R. B. (1984). Mechanisms of exercise-induced delayed onset muscular soreness: a brief review. *Med. Sci. Sports Exerc.* 16, 529–538. doi: 10.1249/00005768-198412000-00002

Babault, N., Cometti, C., Maffiuletti, N. A., and Deley, G. (2011). Does electrical stimulation enhance post-exercise performance recovery? *Eur. J. Appl. Physiol.* 111, 2501–2507. doi: 10.1007/s00421-011-2117-7

Bakar, Y., Coknaz, H., Karli, U., Semsek, O., Serin, E., and Pala, O. O. (2015). Effect of manual lymph drainage on removal of blood lactate after submaximal exercise. *J. Phys. Ther. Sci.* 27, 3387–3391. doi: 10.1589/jpts.27.3387

Banfi, G., Melegati, G., Barassi, A., Dogliotti, G., d'Eril, G. M., Dugué, B., et al. (2009). Effects of whole-body cryotherapy on serum mediators of inflammation and serum muscle enzymes in athletes. *J. Therm. Biol.* 34, 55–59. doi: 10.1016/j.jtherbio.2008.10.003

Barnett, A. (2006). Using recovery modalities between training sessions in elite athletes: does it help? *Sports Med.* 36, 781–796. doi: 10.2165/00007256-200636090-00005

Beliard, S., Chauveau, M., Moscatiello, T., Cros, F., Ecarnot, F., and Becker, F. (2015). Compression garments and exercise: no influence of pressure applied. *J. Sports Sci. Med.* 14, 75–83.

Bieuzen, F., Bleakley, C. M., and Costello, J. T. (2013). Contrast water therapy and exercise induced muscle damage: a systematic review and meta-analysis. *PLoS ONE* 8:e62356. doi: 10.1371/journal.pone.0062356

Bieuzen, F., Borne, R., Toussaint, J. F., and Hausswirth, C. (2014a). Positive effect of specific low-frequency electrical stimulation during short-term recovery on subsequent high-intensity exercise. *Appl. Physiol. Nutr. Metab.* 39, 202–210. doi: 10.1139/apnm-2013-0185

Bieuzen, F., Brisswalter, J., Easthope, C., Vercruyssen, F., Bernard, T., and Hausswirth, C. (2014b). Effect of wearing compression stockings on recovery after mild exercise-induced muscle damage. *Int. J. Sports Physiol. Perform.* 9, 256–264. doi: 10.1123/ijspp.2013-0126

Bishop, P. A., Jones, E., and Woods, A. K. (2008). Recovery from training: a brief review: brief review. *J. Strength Cond. Res.* 22, 1015–1024. doi: 10.1519/JSC.0b013e31816eb518

Bleakley, C., McDonough, S., Gardner, E., Baxter, D. G., Hopkins, T. J., Davison, G. W., et al. (2012). Cold-water immersion (cryotherapy) for preventing and treating muscle soreness after exercise. *Sao Paulo Med. J.* 130, 348–348. doi: 10.1590/S1516-31802012000500015

Borenstein, M., Hedges, L., Higgins, J., and Rothstein, H. (2009). *Introduction to Meta-Analysis*. Chichester: John Wiley and sons.

Brown, F., Gissane, C., Howatson, G., van Someren, K., Pedlar, C., and Hill, J. (2017). Compression garments and recovery from exercise: a meta-analysis. *Sports Med.* 47, 2245–2267. doi: 10.1007/s40279-017-0728-9

Brown, S. J., Child, R. B., Day, S. H., and Donnelly, A. E. (1997). Exercise-induced skeletal muscle damage and adaptation following repeated bouts of eccentric muscle contractions. *J. Sports Sci.* 15, 215–222. doi: 10.1080/026404197367498

Burt, D. G., and Twist, C. (2011). The effects of exercise-induced muscle damage on cycling time-trial performance. *J. Strength Cond. Res.* 25, 2185–2192. doi: 10.1519/JSC.0b013e3181e86148

Butterfield, D. L., Draper, D. O., Ricard, M. D., Myrer, J. W., Schulthies, S. S., and Durrant, E. (1997). The effects of high-volt pulsed current electrical stimulation on delayed-onset muscle soreness. *J. Athl. Train.* 32, 15–20.

Cheung, K., Hume, P., and Maxwell, L. (2003). Delayed onset muscle soreness: treatment strategies and performance factors. *Sports Med.* 33, 145–164. doi: 10.2165/00007256-200333020-00005

Cohen, J. (1988). *Statistical Power Analysis for the Behavioral Sciences*. Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum Associates.

Connolly, D. A., Sayers, S. E., and Mchugh, M. P. (2003). Treatment and prevention of delayed onset muscle soreness. *J. Strength Cond. Res.* 17, 197–208.

Costello, J. T., Baker, P. R., Minett, G. M., Bieuzen, F., Stewart, I. B., and Bleakley, C. (2015). Whole-body cryotherapy (extreme cold air exposure) for preventing and treating muscle soreness after exercise in adults. *Cochrane Database Syst. Rev*. CD010789. doi: 10.1002/14651858.CD010789.pub2

Coté, D. J., Prentice, W. E. Jr., Hooker, D. N., and Shields, E. W. (1988). Comparison of three treatment procedures for minimizing ankle sprain swelling. *Phys. Ther.* 68, 1072–1076. doi: 10.1093/ptj/68.7.1072

Craig, J. A., Cunningham, M. B., Walsh, D. M., Baxter, G. D., and Allen, J. M. (1996). Lack of effect of transcutaneous electrical nerve stimulation upon experimentally induced delayed onset muscle soreness in humans. *Pain* 67, 285–289. doi: 10.1016/0304-3959(96)03124-7

Crane, J. D., Ogborn, D. I., Cupido, C., Melov, S., Hubbard, A., Bourgeois, J. M., et al. (2012). Massage therapy attenuates inflammatory signaling after exercise-induced muscle damage. *Sci. Transl. Med.* 4:119ra113. doi: 10.1126/scitranslmed.3002882

Delextrat, A., Hippocrate, A., Leddington-Wright, S., and Clarke, N. D. (2014). Including stretches to a massage routine improves recovery from official matches in basketball players. *J. Strength Cond. Res.* 28, 716–727. doi: 10.1519/JSC.0b013e3182aa5e7c

Denegar, C. R., and Huff, C. B. (1988). High and low frequency TENS in the treatment of induced musculoskeletal pain: a comparison study. *Athl. Train.* 23, 235–237.

Denegar, C. R., and Perrin, D. H. (1992). Effect of transcutaneous electrical nerve stimulation, cold, and a combination treatment on pain, decreased range of motion, and strength loss associated with delayed onset muscle soreness. *J. Athl. Train.* 27, 200–206.

Dugué, B. M. (2015). An attempt to improve Ferreira-Junior model concerning the anti-inflammatory action of whole-body cryotherapy after exercise induced muscular damage (EIMD). *Front Physiol.* 6:35. doi: 10.3389/fphys.2015.00035

Eston, R., and Peters, D. (1999). Effects of cold water immersion on the symptoms of exercise-induced muscle damage. *J. Sports Sci.* 17, 231–238. doi: 10.1080/026404199366136

Field, T., Hernandez-Reif, M., Diego, M., Schanberg, S., and Kuhn, C. (2005). Cortisol decreases and serotonin and dopamine increase following massage therapy. *Int. J. Neurosci.* 115, 1397–1413. doi: 10.1080/00207450590956459

Fonda, B., and Sarabon, N. (2013). Effects of whole-body cryotherapy on recovery after hamstring damaging exercise: a crossover study. *Scand. J. Med. Sci. Sports* 23, e270–e278. doi: 10.1111/sms.12074

Friesenbichler, B., Stirling, L. M., Federolf, P., and Nigg, B. M. (2011). Tissue vibration in prolonged running. *J. Biomech.* 44, 116–120. doi: 10.1016/j.jbiomech.2010.08.034

Fröhlich, M., Faude, O., Klein, M., Pieter, A., Emrich, E., and Meyer, T. (2014). Strength training adaptations after cold-water immersion. *J. Strength Cond. Res.* 28, 2628–2633. doi: 10.1519/JSC.0000000000000434

Garber, C. E., Blissmer, B., Deschenes, M. R., Franklin, B. A., Lamonte, M. J., Lee, I. M., et al. (2011). American College of Sports Medicine position stand. Quantity and quality of exercise for developing and maintaining cardiorespiratory, musculoskeletal, and neuromotor fitness in apparently healthy adults: guidance for prescribing exercise. *Med. Sci. Sports Exerc.* 43, 1334–1359. doi: 10.1249/MSS.0b013e318213fefb

Gill, N. D., Beaven, C. M., and Cook, C. (2006). Effectiveness of post-match recovery strategies in rugby players. *Br. J. Sports Med.* 40, 260–263. doi: 10.1136/bjsm.2005.022483

Goodall, S., and Howatson, G. (2008). The effects of multiple cold water immersions on indices of muscle damage. *J. Sports Sci. Med.* 7, 235–241.

Guilhem, G., Hug, F., Couturier, A., Regnault, S., Bournat, L., Filliard, J.-R., et al. (2013). Effects of air-pulsed cryotherapy on neuromuscular recovery subsequent to exercise-induced muscle damage. *Am. J. Sports Med.* 41, 1942–1951. doi: 10.1177/0363546513490648

Guo, J., Li, L., Gong, Y., Zhu, R., Xu, J., Zou, J., et al. (2017). Massage alleviates delayed onset muscle soreness after strenuous exercise: a systematic review and meta-analysis. *Front Physiol.* 8:747. doi: 10.3389/fphys.2017.00747

Halson, S. L., Bartram, J., West, N., Stephens, J., Argus, C. K., Driller, M. W., et al. (2014). Does hydrotherapy help or hinder adaptation to training in competitive cyclists? *Med. Sci. Sports Exerc.* 46, 1631–1639. doi: 10.1249/MSS.0000000000000268

Halson, S. L., Quod, M. J., Martin, D. T., Gardner, A. S., Ebert, T. R., and Laursen, P. B. (2008). Physiological responses to cold water immersion following cycling in the heat. *Int. J. Sports Physiol. Perform.* 3, 331–346. doi: 10.1123/ijspp.3.3.331

Hausswirth, C., and Le Meur, Y. (2011). Physiological and nutritional aspects of post-exercise recovery: specific recommendations for female athletes. *Sports Med.* 41, 861–882. doi: 10.2165/11593180-000000000-00000

Hedges, L. (1981). Distribution theory for Glass's estimator of effect size and related estimators. *J. Educ. Stat.* 6, 107–128. doi: 10.3102/10769986006002107

Herbert, R. D., de Noronha, M., and Kamper, S. J. (2011). Stretching to prevent or reduce muscle soreness after exercise. *Cochrane Database Syst Rev.* CD004577. doi: 10.1002/14651858.CD004577.pub3

Herbert, R. D., and Gabriel, M. (2002). Effects of stretching before and after exercising on muscle soreness and risk of injury: systematic review. *Br. J. Sports Med.* 325:468. doi: 10.1136/bmj.325.7362.468

Higgins, D., and Kaminski, T. W. (1998). Contrast therapy does not cause fluctuations in human gastrocnemius intramuscular temperature. *J. Athl. Train.* 33, 336–340.

Higgins, J. P., Thompson, S. G., Deeks, J. J., and Altman, D. G. (2003). Measuring inconsistency in meta-analyses. *BMJ* 327, 557–560. doi: 10.1136/bmj.327.7414.557

Hill, J., Howatson, G., van Someren, K., Gaze, D., Legg, H., Lineham, J., et al. (2017). The effects of compression-garment pressure on recovery after strenuous exercise. *Int. J. Sports Physiol. Perform.* 12, 1078–1084. doi: 10.1123/ijspp.2016-0380

Hill, J., Howatson, G., van Someren, K., Leeder, J., and Pedlar, C. (2014). Compression garments and recovery from exercise-induced muscle damage: a meta-analysis. *Br. J. Sports Med.* 48, 1340–1346. doi: 10.1136/bjsports-2013-092456

Hing, W. A., White, S. G., Bouaaphone, A., and Lee, P. (2008). Contrast therapy—a systematic review. *Phys. Ther. Sport* 9, 148–161. doi: 10.1016/j.ptsp.2008.06.001

Hohenauer, E., Taeymans, J., Baeyens, J.-P., Clarys, P., and Clijsen, R. (2015). The effect of post-exercise cryotherapy on recovery characteristics: a systematic review and meta-analysis. *PLoS ONE* 10:e0139028. doi: 10.1371/journal.pone.0139028

Ihsan, M., Watson, G., and Abbiss, C. R. (2016). What are the physiological mechanisms for post-exercise cold water immersion in the recovery from prolonged endurance and intermittent exercise? *Sports Med.* 46, 1095–1109. doi: 10.1007/s40279-016-0483-3

Ispirlidis, I., Fatouros, I. G., Jamurtas, A. Z., Nikolaidis, M. G., Michailidis, I., Douroudos, I., et al. (2008). Time-course of changes in inflammatory and performance responses following a soccer game. *Clin. J. Sport Med.* 18, 423–431. doi: 10.1097/JSM.0b013e3181818e0b

Jadad, A. R., Moore, R. A., Carroll, D., Jenkinson, C., Reynolds, D. J., Gavaghan, D. J., et al. (1996). Assessing the quality of reports of randomized clinical trials: is blinding necessary? *Control. Clin. Trials* 17, 1–12. doi: 10.1016/0197-2456(95)00134-4

Kaada, B., and Torsteinb, O. (1989). Increase of plasma β-endorphins in connective tissue massage. *Gen. Pharmacol.* 20, 487–489. doi: 10.1016/0306-3623(89)90200-0

Kargarfard, M., Lam, E. T., Shariat, A., Shaw, I., Shaw, B. S., and Tamrin, S. B. (2016). Efficacy of massage on muscle soreness, perceived recovery, physiological restoration and physical performance in male bodybuilders. *J. Sports Sci.* 34, 959–965. doi: 10.1080/02640414.2015.1081264

Kenttä, G., and Hassmén, P. (1998). Overtraining and recovery. *A* conceptual model. *Sports Med.* 26, 1–16. doi: 10.2165/00007256-199826010-00001

Kovacs, M. S., and Baker, L. B. (2014). Recovery interventions and strategies for improved tennis performance. *Br. J. Sports Med.* 48, i18–i21. doi: 10.1136/bjsports-2013-093223

Kraemer, W. J., Bush, J. A., Wickham, R. B., Denegar, C. R., Gomez, A. L., Gotshalk, L. A., et al. (2001). Continuous compression as an effective therapeutic intervention in treating eccentric-exercise-induced muscle soreness. *J. Sport Rehabil.* 10, 11–23. doi: 10.1123/jsr.10.1.11

Kraemer, W. J., Flanagan, S. D., Comstock, B. A., Fragala, M. S., Earp, J. E., Dunn-Lewis, C., et al. (2010). Effects of a whole body compression garment on markers of recovery after a heavy resistance workout in men and women. *J. Strength Cond. Res.* 24, 804–814. doi: 10.1519/JSC.0b013e3181d33025

Kraemer, W. J., French, D. N., and Spiering, B. A. (2004). Compression in the treatment of acute muscle injuries in sport: review article. *Int. J. Sport Med.* 5, 200–208.

Leal Junior, E. C., de Godoi, V., Mancalossi, J. L., Rossi, R. P., De Marchi, T., Parente, M., et al. (2011). Comparison between cold water immersion therapy (CWIT) and light emitting diode therapy (LEDT) in short-term skeletal muscle recovery after high-intensity exercise in athletes–preliminary results. *Lasers Med. Sci.* 26, 493–501. doi: 10.1007/s10103-010-0866-x

Leeder, J., Gissane, C., van Someren, K., Gregson, W., and Howatson, G. (2012). Cold water immersion and recovery from strenuous exercise: a meta-analysis. *Br. J. Sports Med.* 46, 233–240. doi: 10.1136/bjsports-2011-090061

Leppäluoto, J., Westerlund, T., Huttunen, P., Oksa, J., Smolander, J., Dugué, B., et al. (2008). Effects of long-term whole-body cold exposures on plasma concentrations of ACTH, beta-endorphin, cortisol, catecholamines and cytokines in healthy females. *Scand. J. Clin. Lab. Invest.* 68, 145–153. doi: 10.1080/00365510701516350

Lombardi, G., Ziemann, E., and Banfi, G. (2017). Whole-body cryotherapy in athletes: from therapy to stimulation. An updated review of the literature. *Front Physiol.* 8:258. doi: 10.3389/fphys.2017.00258

Machado, A. F., Ferreira, P. H., Micheletti, J. K., de Almeida, A. C., Lemes, I. R., Vanderlei, F. M., et al. (2016). Can water temperature and immersion time influence the effect of cold water immersion on muscle soreness? A Systematic Review and Meta-Analysis. *Sports Med.* 46, 503–514. doi: 10.1007/s40279-015-0431-7

Mackey, A. L., Bojsen-Moller, J., Qvortrup, K., Langberg, H., Suetta, C., Kalliokoski, K. K., et al. (2008). Evidence of skeletal muscle damage following electrically stimulated isometric muscle contractions in humans. 105, 1620–1627. doi: 10.1152/japplphysiol.90952.2008

MacRae, B. A., Cotter, J. D., and Laing, R. M. (2011). Compression garments and exercise: garment considerations, physiology and performance. *Sports Med.* 41, 815–843. doi: 10.2165/11591420-000000000-00000

Maher, C. G., Sherrington, C., Herbert, R. D., Moseley, A. M., and Elkins, M. (2003). Reliability of the PEDro scale for rating quality of randomized controlled trials. *Phys. Ther.* 83, 713–721.

Marqués-Jiménez, D., Calleja-Gonzalez, J., Arratibel, I., Delextrat, A., and Terrados, N. (2016). Are compression garments effective for the recovery of exercise-induced muscle damage? A systematic review with meta-analysis. *Physiol. Behav.* 153, 133–148. doi: 10.1016/j.physbeh.2015.10 10.1027

Meeusen, R., Duclos, M., Foster, C., Fry, A., Gleeson, M., Nieman, D., et al. (2013). Prevention, diagnosis, and treatment of the overtraining syndrome: joint consensus statement of the European College of Sport Science and the American College of Sports Medicine. *Med. Sci. Sports Exerc.* 45, 186–205. doi: 10.1249/MSS.0b013e318279a10a

Minett, G. M., and Costello, J. T. (2015). Specificity and context in post-exercise recovery: it is not a one-size-fits-all approach. *Front Physiol.* 6:130. doi: 10.3389/fphys.2015.00130.

Minett, G. M., and Duffield, R. (2014). Is recovery driven by central or peripheral factors? A role for the brain in recovery following intermittent-sprint exercise. *Front Physiol.* 5:24. doi: 10.3389/fphys.2014.00024

Moher, D., Cook, D. J., Eastwood, S., Olkin, I., Rennie, D., and Stroup, D. F. (1999). Improving the quality of reports of meta-analyses of randomised controlled trials: the QUOROM statement. Quality of reporting of meta-analyses. *Lancet* 354, 1896–1900. doi: 10.1016/S0140-6736(99)04149-5

Moher, D., Liberati, A., Tetzlaff, J., and Altman, D. G. (2009). Preferred reporting items for systematic reviews and meta-analyses: the PRISMA statement. *PLoS Med.* 6:e1000097. doi: 10.1371/journal.pmed.1000097

Nédélec, M., McCall, A., Carling, C., Legall, F., Berthoin, S., and Dupont, G. (2013). Recovery in soccer: part ii-recovery strategies. *Sports Med.* 43, 9–22. doi: 10.1007/s40279-012-0002-0

Ogai, R., Yamane, M., Matsumoto, T., and Kosaka, M. (2008). Effects of petrissage massage on fatigue and exercise performance following intensive cycle pedalling. *Br. J. Sports Med.* 42, 834–838. doi: 10.1136/bjsm.2007.044396

Paschalis, V., Nikolaidis, M. G., Giakas, G., Jamurtas, A. Z., Pappas, A., and Koutedakis, Y. (2007). The effect of eccentric exercise on position sense and joint reaction angle of the lower limbs. *Muscle Nerve* 35, 496–503. doi: 10.1002/mus.20723

Poppendieck, W., Faude, O., Wegmann, M., and Meyer, T. (2013). Cooling and performance recovery of trained athletes: a meta-analytical review. *Int. J. Sports Physiol. Perform.* 8, 227–242. doi: 10.1123/ijspp.8.3.227

Pournot, H., Bieuzen, F., Louis, J., Mounier, R., Fillard, J.-R., and Barbiche, E. (2011). Time-course of changes in inflammatory response after whole-body cryotherapy multi exposures following severe exercise. *PLoS ONE* 6:e22748. doi: 10.1371/annotation/0adb3312-7d2b-459c-97f7-a09cfecf5881

Pruscino, C. L., Halson, S., and Hargreaves, M. (2013). Effects of compression garments on recovery following intermittent exercise. *Eur. J. Appl. Physiol.* 113, 1585–1596. doi: 10.1007/s00421-012-2576-5

Rimaud, D., Messonnier, L., Castells, J., Devillard, X., and Calmels, P. (2010). Effects of compression stockings during exercise and recovery on blood lactate kinetics. *Eur. J. Appl. Physiol.* 110, 425–433. doi: 10.1007/s00421-010-1503-x

Roberts, L. A., Raastad, T., Markworth, J. F., Figueiredo, V. C., Egner, I. M., Shield, A., et al. (2015). Post-exercise cold water immersion attenuates acute anabolic signalling and long-term adaptations in muscle to strength training. *J. Physiol.* 593, 4285–4301. doi: 10.1113/JP270570

Robson-Ansley, P. J., Gleeson, M., and Ansley, L. (2009). Fatigue management in the preparation of Olympic athletes. *J. Sports Sci.* 27, 1409–1420. doi: 10.1080/02640410802702186

Rowsell, G. J., Coutts, A. J., Reaburn, P., and Hill-Haas, S. (2011). Effect of post-match cold-water immersion on subsequent match running performance in junior soccer players during tournament play. *J. Sport Sci.* 29, 1–6. doi: 10.1080/02640414.2010.512640

Sanchez-Ureña, B. A., Barrantes-Brais, K., Ureña-Bonilla, P., Calleja-González, J., and Ostojic, S. (2015). Effect of water immersion on recovery from fatigue: a meta-analysis. *Eur. J. Hum. Mov.* 34, 1–14.

Saxton, J. M., Clarkson, P. M., James, R., Miles, M., Westerfer, M., Clark, S., et al. (1995). Neuromuscular dysfunction following eccentric exercise. *Med. Sci. Sports Exerc.* 27, 1185–1193. doi: 10.1249/00005768-199508000-00013

Smith, L. L. (1991). Acute inflammation: the underlying mechanism in delayed onset muscle soreness? *Med. Sci. Sports Exerc.* 23, 542–551. doi: 10.1249/00005768-199105000-00006

Smith, L. L., Brunetz, M. H., Chenier, T. C., McCammon, M. R., Houmard, J. A., Franklin, M. E., et al. (1993). The effects of static and ballistic stretching on delayed onset muscle soreness and creatine kinase. *Res. Q. Exerc. Sport* 64, 103–107. doi: 10.1080/02701367.1993.10608784

Smith, L. L., Keating, M. N., Holbert, D., Spratt, D. J., McCammon, M. R., Smith, S. S., et al. (1994). The effects of athletic massage on delayed onset muscle soreness, creatine kinase, and neutrophil count: a preliminary report. *J. Orthop. Sports Phys. Ther.* 19, 93–99. doi: 10.2519/jospt.1994.19.2.93

Soligard, T., Schwellnus, M., Alonso, J. M., Bahr, R., Clarsen, B., Dijkstra, H. P., et al. (2016). How much is too much? (Part 1) International Olympic Committee consensus statement on load in sport and risk of injury. *Br. J. Sports Med.* 50, 1030–1041. doi: 10.1136/bjsports-2016-096581

Stacey, D. L., Gibala, M. J., Martin Ginis, K. A., and Timmons, B. W. (2010). Effects of recovery method after exercise on performance, immune changes, and psychological outcomes. *J. Orthop. Sports Phys. Ther.* 40, 656–665. doi: 10.2519/jospt.2010.3224

Suzuki, M., Umeda, T., Nakaji, S., Shimoyama, T., Mashiko, T., and Sugawara, K. (2004). Effect of incorporating low intensity exercise into the recovery period after a rugby match. *Br. J. Sports Med.* 38, 436–440. doi: 10.1136/bjsm.2002.004309

Tejero-Fernández, V., Membrilla-Mesa, M., Galiano-Castillo, N., and Arroyo-Morales, M. (2015). Immunological effects of massage after exercise: a systematic review. *Phys. Ther.* 16, 187–192. doi: 10.1016/j.ptsp.2014.07.001

Torres, R., Ribeiro, F., Alberto Duarte, J., and Cabri, J. M. (2012). Evidence of the physiotherapeutic interventions used currently after exercise-induced muscle damage: systematic review and meta-analysis. *Phys. Ther.* 13, 101–114. doi: 10.1016/j.ptsp.2011.07.005

Twist, C., and Eston, R. G. (2009). The effect of exercise-induced muscle damage on perceived exertion and cycling endurance performance. *Eur. J. Appl. Physiol.* 105, 559–567. doi: 10.1007/s00421-008-0935-z

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. Sport Sci.* 26, 431–440. doi: 10.1080/02640410701567425

van Tulder, M., Furlan, A., Bombardier, C., and Bouter, L. (2003). Updated method guidelines for systematic reviews in the cochrane collaboration back review group. *Spine* 28, 1290–1299. doi: 10.1097/01.BRS.0000065484.95996.AF.

Vieira, A., Bottaro, M., Ferreira-Junior, J. B., Vieira, C., Cleto, V. A., Cadore, E. L., et al. (2015). Does whole-body cryotherapy improve vertical jump recovery following a high-intensity exercise bout? *Open Access J. Sports Med.* 6, 49–54. doi: 10.2147/OAJSM.S70263

Visconti, L., Capra, G., Carta, G., Forni, C., and Janin, D. (2015). Effect of massage on DOMS in ultramarathon runners: a pilot study. *J. Bodyw. Mov. Ther.* 19, 458–463. doi: 10.1016/j.jbmt.2014.11.008

Weber, M. D., Servedio, F. J., and Woodall, W. R. (1994). The effects of three modalities on delayed onset muscle soreness. *J. Orthop. Sports Phys. Ther.* 20, 236–242. doi: 10.2519/jospt.1994.20.5.236

Weerapong, P., Hume, P. A., and Kolt, G. S. (2005). The mechanisms of massage and effects on performance, muscle recovery and injury prevention. *Sports Med.* 35, 235–256. doi: 10.2165/00007256-200535030-00004

Wilcock, I. M., Cronin, J. B., and Hing, W. A. (2006a). Water immersion: does it enhance recovery from exercise. *Int. J. Sports Physiol. Perform.* 1, 195–206.

Wilcock, I. M., Cronin, J. B., and Hing, W. A. (2006b). Physiological response to water immersion. *Sport Med.* 36, 747–765. doi: 10.2165/00007256-200636090-00003

Wozniak, A., Wozniak, B., Drewa, G., Mila-Kierzenkowska, C., and Rakowski, A. (2007). The effect of whole-body cryostimulation on lysosomal enzyme activity in kayakers during training. *Eur. J. Appl. Physiol.* 100, 137–142. doi: 10.1007/s00421-007-0404-0

Zainuddin, Z., Newton, M., Sacco, P., and Nosaka, K. (2005). Effects of massage on delayed-onset muscle soreness, swelling, and recovery of muscle function. *J. Athl. Train* 40, 174–180.

Zainuddin, Z., Sacco, P., Newton, M., and Nosaka, K. (2006). Light concentric exercise has a temporarily analgesic effect on delayed-onset muscle soreness, but no effect on recovery from eccentric exercise. *Appl. Physiol. Nutr. Metab.* 31, 126–134. doi: 10.1139/h05-010

Conflict of Interest Statement: The authors declare that the research was conducted in the absence of any commercial or financial relationships that could be construed as a potential conflict of interest.

Copyright © 2018 Dupuy, Douzi, Theurot, Bosquet and Dugué. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (CC BY). The use, distribution or reproduction in other forums is permitted, provided the original author(s) and the copyright owner are credited and that the original publication in this journal is cited, in accordance with accepted academic practice. No use, distribution or reproduction is permitted which does not comply with these terms.

3.5. Étude 5 : (post-cooling)

a) Résumé:

Cryostimulation after training improves sleep quality in professional soccer players

Douzi W, Dupuy O, Theurot D, Boucard G, Dugué B

❖ **Objectif**

Examiner l'effet de la cryostimulation corps *partiel* sur la qualité du sommeil des joueurs de football professionnels en comparant différentes durées d'exposition au froid (-180°C pendant 90 s, 2 fois 90s, et 180 s).

❖ **Méthodes**

9 footballeurs professionnels de Ligue 2 (Chamois Niortais), ont participé à cette étude. Après une séance standardisée d'entraînement, les sujets ont effectué dans un ordre aléatoire, soit une récupération passive ou des sessions de cryothérapie (cryosauna) de différentes durées (180 s, 90 s, 2 expositions de 90 s interceptées de 5 minutes). Toutes les nuits après la récupération passive ou la session de cryothérapie, les participants portent des accéléromètres triaxiaux pour quantifier leurs mouvements (Counts/min) sur les trois axes spatiaux (horizontal, vertical et perpendiculaire) pendant le sommeil. La température cutanée du quadriceps a été mesurée avant et immédiatement après chaque exposition à la cryothérapie. La perception de la sensation thermique a été mesurée après chaque exposition en utilisant une échelle de 10 points graduée de 0 (« neutre ») jusqu'à 10 (« insupportablement froid »).

❖ **Résultats**

Toutes les durées d'exposition entraînent une diminution significative de la température cutanée de quadriceps mais la plus forte diminution a été observée après l'exposition de 180 s ($p<0.001$). Le nombre de mouvements pendant la nuit suivant la cryostimulation a été significativement réduit uniquement dans la condition d'exposition de 180s ($p <0,05$) par rapport à la condition contrôle **(Figure 45)**.

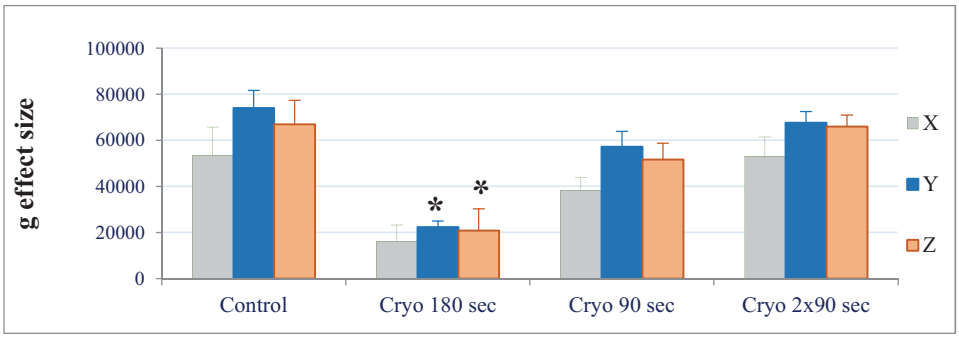


Figure 45 *: Somme des mouvements (counts) par minute sur les 3 axes de mouvement (x -horizontal-, y- vertical- et z -perpendiculaire-) pendant la nuit suivant l'exposition à la cryostimulation (180s, 90s et 2x90s) et la session contrôle. * signifie une différence significative par rapport au contrôle à p*

La taille d'effet de l'exposition de 180s a été considérée comme large à très large ($g> -1,24$). Or les autres temps d'exposition ont des effets de petite voire moyenne amplitude **(Figure 46)** :

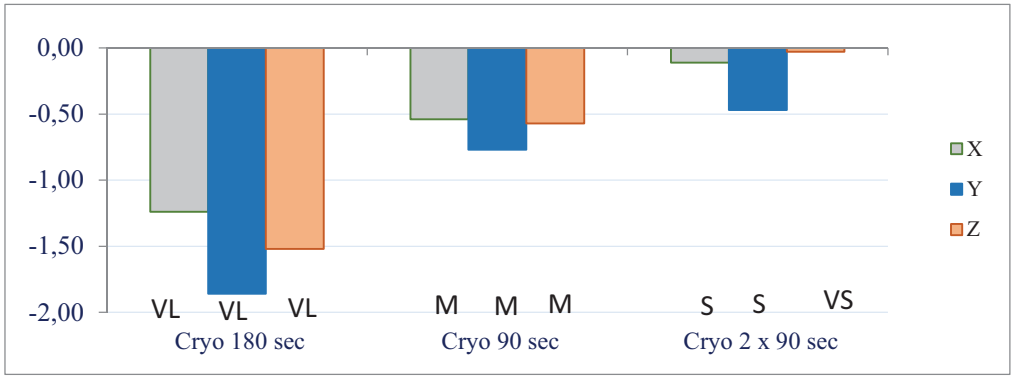


Figure 46 *: Taille de l'effet (g de Hedges) des changements de l'activité des "counts" dans les trois axes de l'espace (x -horizontal-, y- vertical- et z -perpendiculaire-) pendant la nuit suivant les expositions à la cryostimulation (180s, 90S et 2x90s) par rapport à la session de contrôle. VL : Very Large ; M : Medium ; S : Small ; VS : Very Small.*

❖ Discussion

La cryostimulation améliore la qualité de sommeil, déduite par à une réduction significative du nombre de mouvements pendant le sommeil. Cette étude est la première à comparer différentes durées d'exposition au froid sur la qualité du sommeil chez des athlètes professionnels après des séances d'entraînement similaires et standardisées. L'exposition de 180 s à -180 ° C a permis d'améliorer la qualité du sommeil des footballeurs professionnels. Cependant, les autres durées d'exposition semblent être inefficaces à cet égard donc un effet dose-réponse peut être possible. La plus grande diminution de la température cutanée du quadriceps (environ -15 ° C) a été observée après l'exposition de 180 s. Un effet analgésique contribuant à une meilleure qualité de sommeil pourrait être ici impliqué.

La cryothérapie devrait être recommandée comme technique de récupération pour améliorer la qualité de sommeil à la suite d'une séance d'entraînement chez des footballeurs professionnels. Une exposition de 3 minutes semble être la durée la plus efficace pour atteindre cet objectif.

b) Article:

CRYOSTIMULATION AFTER TRAINING IMPROVES SLEEP QUALITY IN PROFESSIONAL SOCCER PLAYERS

Brief Report

Wafa Douzi[1], Olivier Dupuy[1], Dimitri Theurot[1], Geoffroy Boucard[2], Benoit Dugué[1]
1 : University of Poitiers, Laboratoire Mobilité Vieillissement Exercice (MOVE)-EA6314, Faculty of Sport Sciences, Poitiers, France
2 : Centre de Recherches sur la Cognition et l'Apprentissage (UMR7295), Université de Poitiers and Université François-Rabelais de Tours, Poitiers, France

(Article soumis et en revision dans Journal of)

Preferred running head: Cryostimulation improves sleep quality
Abstract word count: 167
Text-only word count: 1917
Number of figures: 2

Corresponding author:
Benoit Dugué, PhD, Université de Poitiers, Faculté des Sciences du Sport et Laboratoire "Mobilité, Vieillissement, Exercice" ; 8 allée Jean Monnet, 86000, Poitiers, France.
E-mail : benoit.dugue@univ-poitiers.fr

Abstract

Background. Cryostimulation is commonly used in athletes after physical exercise for recovery purposes although the benefits may be varied. To date, the majority of the research has focused on muscular functioning, although other variables may be critically important for recovery purposes and subsequent physical performance. Among them, sleep has been scarcely investigated.

Purpose. The aim of the present investigation was therefore to determine whether using cryostimulation impacts sleep quality in professional soccer players.

Methods. Different exposure durations at −180°C were tested randomly after standardized training sessions in 7 professional soccer players (no cryostimulation, 180-s exposure, two 90-s exposures separated by a 5-min rest at room temperature, and 90-s exposure), and the effects on sleep quality using 3-dimensional accelerometers worn during sleep were assessed.

Results. The number of movements during the night after cryostimulation was significantly reduced only in the 180-s exposure condition ($p<0.05$, very large effect size) compared with the control condition.

Conclusion. Cryostimulation seems to induce a positive impact on sleep quality that may be dose-dependent.

Keywords: cryostimulation, cryotherapy, exercise recovery, sleep, soccer

Introduction

Currently, cryostimulation is commonly used in athletes for recovery purposes after physical exercise. This practice consists of short exposure (usually 3 min) in minimal clothing at very low temperature (−110°C to −180°C) in a special chamber. Two types of cryochambers are available: whole-body and partial-body (the head is not exposed) cryochambers. The benefits of being exposed at low temperature concern pain, fatigue, delayed onset of muscle soreness, oxidative stress, and inflammation (for a review, see work by Bouzigon et al (3) and Dupuy et al (7)). However, several recent discussions have argued the usefulness of cryostimulation concerning subsequent physical performance, especially during training for muscle development (6). Nevertheless, physical performance does not only refer (although, of course, very important) to muscle physiology. Many factors may interfere with physical performance, such as nutrition, hydration, a delicate and appropriate balance between training load and competition stresses, other psychological/physical stresses (unrelated to the competition) and recovery. In the context of recovery, sleep is absolutely essential, both for cognitive processes and metabolic functions. An earlier study demonstrated that an increase in the training volume in elite swimmers may lead to increases in poorer sleep quality and in the number of movements during sleep (20). A recent review explored the links between stress, sleep and recovery in elite soccer players (17). During the different sleep stages, tissue regeneration may occur through the elimination of neurotoxic wastes, and a good sleep quality promotes the recovery of cognitive functions (13). A decrease in psychomotor functions has been observed already after a single night of reduced sleep (18). However, there is presently a lack of information concerning the link between cold exposure after exercise and its impact on the quality of sleep. Additionally, data collected from competitive athletes are missing. It seems that there are only two studies on that topic (one was published only as an abstract). Both studies showed an improvement in the quality of sleep in ten elite synchronized female swimmers (19) and in 27 professional basketball players (4). In these two reports, a 3-min exposure was investigated because such a duration was commonly used in sport activities for recovery purposes. To date, the exposure duration has never been studied, and in the context of sleep recovery, a dose-response effect may be possible.

The aim of the present investigation was, therefore, to determine whether the use of cryostimulation has an impact on sleep quality in professional soccer players. Different exposure durations at −180°C (according to the device manufacturer) were tested randomly after standardized training sessions (no cryostimulation, 180-s exposure, twice 90-s exposures separated by a 5-min rest at room temperature, and 90-s exposure), and the effects on sleep quality were studied using 3-dimensional accelerometers worn during sleep.

Subjects and Methods

Subjects.

Seven male football (soccer) professional players (24.8 ± 5.5 years; 76.7 ± 7.3 kg; 184 ± 0.1 cm) from the Niort Football Club (French National Championship Ligue 2) participated in the study. After medical examination and receipt of informed consent, the subjects were enrolled in the investigation (commissioned by the club), which conformed to the Code of Ethics of the World Medical Association (Declaration of Helsinki), and were accepted by the local ethics committee.

Experimental design.

The experiment was organized during one month, and each session took place once a week on the same week day and at the same time during the day. After a standardized, 90-min training session, each player experienced different exposure durations at −180°C in a partial-body chamber (Cryotechno®, Castelnau le Lez, France) in a random order (no cryostimulation, 180-s exposure, twice 90-s exposure separated by a 5-min rest at room temperature, and 90-s exposure). In the cabin, the subjects wore bathing suits, a pair of gloves, socks, and slippers. The subjects were instructed to turn around continuously in the cabin during the exposure period. During the experiment, the players had a 90-min training session daily six times per week and one official match.

Measurements.

Sleep quality assessment using accelerometry: Every night after cryotherapy exposure or control session, the subjects were instructed to wear a wrist actigraph (WGT3X-BT monitor, Pensacola, USA) to monitor their sleep patterns (16). They were also instructed to behave similarly each time their sleep was monitored. The recording was manually started by the subjects at the time they went to bed, and the recording was stopped when they woke up. The accelerometer measured movement acceleration across the horizontal, vertical, and perpendicular axes. The raw data were recorded with an epoch length of 60 s and were extracted as the sum of vector magnitude in counts/minute (calculated as the square root of the sum of the square of acceleration for each of the three axes) using actiLife software 6.11.0.

Temperature measurements and estimations: The surface temperature of quadriceps was measured using an infrared thermometer after the subjects left the PBC device. Additionally, the subjects were asked to rate their perceptual thermal sensation using a 10-point scale (12). According to their response to the question "How cold do you feel right now?", the subjects were scored from 0 ("neutral") to 10 ("unbearably cold").

Statistics.

The results are expressed as mean and standard deviation (SD) values or standard error when specified. The Gaussian distribution was tested for each variable using the Shapiro–Wilk test. Changes in the different variables were evaluated using repeated-measures ANOVA followed by Tukey post hoc test when appropriate. The effect size of the changes was assessed by the Hedges' g (g) as presented by Dupuy et al (8) and was considered to be either small ($0.2 < g \leq 0.5$), moderate ($0.5 < g \leq 0.8$), or large ($g > 0.8$) according to the Cohen scale (5). A $p<0.05$ was considered to be statistically significant. The required sample size was calculated from our control data using G*Power version 3.1, according to Beck (2). Using an a priori repeated-measures design with a desired power (1-beta) set at 0.80, and an alpha risk of 0.05, six subjects represent a sufficient number of subjects to detect a significant difference.

Results

Exposure at −180°C led to a significant decrease ($p<0.001$) in skin temperature at the quadriceps level. The highest decrease was seen at the 180-s exposure (from 30.4 ± 1.0°C to 15.4 ±2.0°C) which was significantly higher ($p<0.001$) than similar decreases observed for the 90-s and the 2 × 90-s exposures (from 29.6 ± 1.0°C to 20.7 ± 1.6°C and from 29.3 ± 1.4°C to 19.3 ±1.0°C, respectively). Similarly, the perception of cold was significantly higher ($p<0.001$) after the 180-s exposure (8.0 ± 1.2°C) than after the 90-s and the 2 × 90-s exposures (4.6 ± 1.8°C and 5.3 ± 1.2°C, respectively). The night following the exposure, the number of accelerations detected on the vertical and perpendicular axes during sleep were significantly lower after the 180-s exposure than in the control and in other tested conditions (p values ranged from 0.01 to 0.05) (Fig. 1). The size of the effects was considered to be very large after the 180-s exposure ($g>-1.24$) (Fig. 2).

Discussion

The main finding in this study is that the use of cryostimulation after training improves the night sleep quality in professional soccer players. This improvement in sleep quality was deduced from a significant reduction in the number of movements during sleep (16). We used 3-dimensional accelerometer-based activity monitors (actigraph) to detect this reduction in movements. Previous studies have shown that the actigraphic technique is validated and reliable for measuring sleep quality and providing insight into light and deep sleep quality (9, 11, 15, 21). During sleep, low motor activity levels and prolonged episodes of uninterrupted immobility are associated with increasing sleep depth, whereas high activity levels are related to intermittent wakefulness during sleep (14). Interestingly, a decrease in the number and frequency of rotational motions (rollovers) depicted from a perpendicular axis seems linked to an increase in deep sleep (15). The deep sleep stage is considered essential for recovering from mental and physical fatigue. Thus, we detected that a decrease in the number of movements — especially those from the perpendicular axis — in the night following cryostimulation may be related to an increase in a deeper sleep in our subjects. Recently, several attempts to evaluate the effect of slightly decreasing

body temperature on sleep quality have been performed. Cold immersion near bedtime have been shown to improve sleep propensity by accelerating the decline rate in human internal temperature (10). Al Haddad et al. found that a 5-min immersion in cold water (15°C) following daily training improved subjective sleep quality in athletes (1).

Our results are consistent with these observations. Moreover, they strengthen the preliminary observations on sleep quality after cryostimulation reported by Schaal et al. and Bouzigon et al. (4, 19). The first study showed a positive effect in a series of 14 3-min whole-body cryostimulation (WBC) exposures at −110°C (one per day for 14 consecutive days) on sleep latency and efficiency (estimated using 3-dimensional accelerometers) in ten elite synchronized female swimmers during an intense training period leading to overreaching (19). The authors suggested that cold exposure improved sleep quality and promoted relaxation and the onset of sleepiness, especially during phases of increased workload (19).

The second brief communication described that 27 elite basketball players reported an enhancement in their perception of sleep quality during international competitions when a 3-min partial-body cryostimulation (PBC) exposure at −130°C was used (4). In these two investigations, a 3-min exposure was investigated because such a duration is commonly used in sport activities for recovery purposes. To the best of our knowledge, the present investigation is the first to compare different cold exposure durations on sleep quality in professional athletes after similar and standardized training sessions (the training load and subsequent fatigue were also indirectly checked using heart rate variability which was found to be similar in all tested situations — data not shown). Among the durations we tested, the 180-s exposure at −180°C could induce an improvement in the sleep quality of professional soccer players. The other durations investigated (90 s and 2 x 90 s) were unable to induce such a change. The cold stimulation in these latter exposures was certainly not strong enough as observed in the relatively modest decrease in skin temperature (approximately −10°C), whereas the 180-s exposure induced a larger decrease (approximately −15°C). Therefore, in the context of cryostimulation after training and sleep recovery, a dose-response effect may be possible.

Practical application

There is a high incidence of psychological and physical strain in professional athletes. Competition, media, public relations, and requirements for performance achievement from the professional team and sponsors may be stressful. Due to a busy schedule on competition day (training, tactic meetings, traveling from hotels to competition venues, the competition itself, recovery and meals), it is also difficult for athletes to go to bed early. Professional athletes, therefore, often experience sleep problems that interfere with their recovery after training and competition. As sleep enables a good recovery for both cognitive processes and metabolic functions, our data indicate that sleep quality can be essentially improved by using cryostimulation.

Conclusion

Use of cryostimulation (180 s at −180°C) after training improves sleep quality in professional soccer players.

Acknowledgments

We are grateful to the Niort Football Club and the players who participated in this study. We thank the club staff, Emmanuel Zaccheo, MD; Quentin Charbonnier, PT; Denis Renaud, head trainer; and Fabrice Fontaine, adjunct trainer, for their continuous help and support. We appreciate the excellent assistance of Quentin Bretonneau and Nihel Ghoul.

The authors declare that they have no potential conflicts of interest to disclose.

References

1. Al Haddad H, Parouty J, and Buchheit M. Effect of daily cold water immersion on heart rate variability and subjective ratings of well-being in highly trained swimmers. *Int J Sports Physiol Perform* 7: 33-38, 2012
2. Beck T. The importance of a priori sample size estimation in strength and conditioning research. *J Strength Cond Res* 27: 2323-2337, 2013
3. Bouzigon R, Grappe F, Ravier G, and Dugue B. Whole- and partial-body cryostimulation/cryotherapy: Current technologies and practical applications. *J Therm Biol* 61: 67-81, 2016.
4. Bouzigon R, Ravier G, Dugue B, and Grappe F. The use of whole-body cryostimulation to

improve the quality of sleep in athletes during high level standard competitions. *Br J Sports Med* 48 572-572, 2014.

5. Cohen J. *Statistical Power Analysis for the Behavioral Sciences.* Erlbaum, 1988.
6. Costello J, Baker P, Minett G, Bieuzen F, Stewart I, and Bleakley C. Whole-body cryotherapy (extreme cold air exposure) for preventing and treating muscle soreness after exercise in adults. *Cochrane Database Syst Rev* 9: CD010789, 2015.
7. Dupuy O, Douzi W, Theurot D, Bosquet L, and Dugué B. An evidence-based approach for choosing post-exercise recovery techniques to reduce markers of muscle damage, soreness, fatigue and inflammation: a systematic review with meta-analyses. *Frontiers in Physiology* 9: 403, 2018.
8. Dupuy O, Lussier M, Fraser S, Bherer L, Audiffren M, and Bosquet L. Effect of overreaching on cognitive performance and related cardiac autonomic control. *Scand J Med Sci Sports* 24: 234-242, 2014.
9. Kaartinen J, Erkinjutti M, and Rauhala E. Automatic SCSB analysis of motor and autonomic nervous functions compared with sleep stages. *Neuroreport* 7: 1102-1106, 1996
10. Kräuchi K. The thermophysiological cascade leading to sleep initiation in relation to phase of entrainment. *Sleep Med Rev* 11: 439-451, 2007
11. Kushida C, Chang A, Gadkary C, Guilleminault C, Carrillo O, and Dement W. Comparison of actigraphic, polysomnographic, and subjective assessment of sleep parameters in sleep-disordered patients. *Sleep Med* 5: 389-396, 2001
12. Lundgren P, Henriksson O, Kuklane K, Holmér I, Naredi P, and Björnstig U. Validity and reliability of the Cold Discomfort Scale: a subjective judgement scale for the assessment of patient thermal state in a cold environment. *J Clin Monit Comput* 28: 287-291, 2014
13. Martin J, Song Y, Hughes J, Jouldjian S, Dzierzewski J, Fung C, Rodriguez Tapia J, Mitchell M, and Alessi C. A Four-Session Sleep Intervention Program Improves Sleep for Older Adult Day Health Care Participants: Results of a Randomized Controlled Trial. *Sleep* 40: 8, 2017
14. Middelkoop H, Van Hilten B, Kramer C, and Kamphuisen H. Actigraphically recorded motor activity and immobility across sleep cycles and stages in healthy male subjects. *J Sleep Res* 1: 28-33, 1993
15. Miwa H, Sasahara S, and Matsui T. Roll-over detection and sleep quality measurement using a wearable sensor. *Conf Proc IEEE Eng Med Biol Soc*: 1507-1510, 2007.
16. Mullaney D, Kripke D, and Messin S. Wrist-actigraphic estimation of sleep time. *Sleep* 3: 83-92, 1980.
17. Nédélec M, Halson S, Abaidia A, Ahmaidi S, and Dupont G. Stress, Sleep and Recovery in Elite Soccer: A Critical Review of the Literature. *Sports Med* 45: 1387-1400, 2015
18. Reilly T and Edwards B. Altered sleep-wake cycles and physical performance in athletes. *Physiol Behav* 90: 274-284, 2007
19. Schaal K, Le Meur Y, Louis J, Filliard J-R, Hellard P, Casazza G, and Hausswirth C. Whole-Body Cryostimulation Limits Overreaching in Elite Synchronized Swimmers. *Med Sci Sports Exerc* 47: 1416-1425, 2015
20. Taylor S, Rogers G, and Driver H. Effects of training volume on sleep, psychological, and selected physiological profiles of elite female swimmers. *Med Sci Sports Exerc* 29: 688-693, 1997
21. Wang D, Wong K, Dungan G, Buchanan P, Yee B, and Grunstein R. The validity of wrist actimetry assessment of sleep with and without sleep apnea. *J Clin Sleep Med* 4: 450-455, 2008

Figure captions

Figure 1: The sum of the counts per minute on the 3 movement axes (x, horizontal; y, vertical; and z, perpendicular) during the night following cryostimulation exposure (180 s, 90 s, and 2 × 90 s) and the control session. *, significant difference from the control at $p < 0.01$. The data are expressed as the mean ± SE values.

Figure 2: Effect size (Hedges' g) of changes in activity counts in three spatial axes (x, horizontal; y, vertical; and z, perpendicular) during the night following cryostimulation exposures (180 s, 90 s, and 2 × 90 s) compared with the control session. VL, very large effect size; M, medium effect size; S, small effect size; VS, very small effect size.

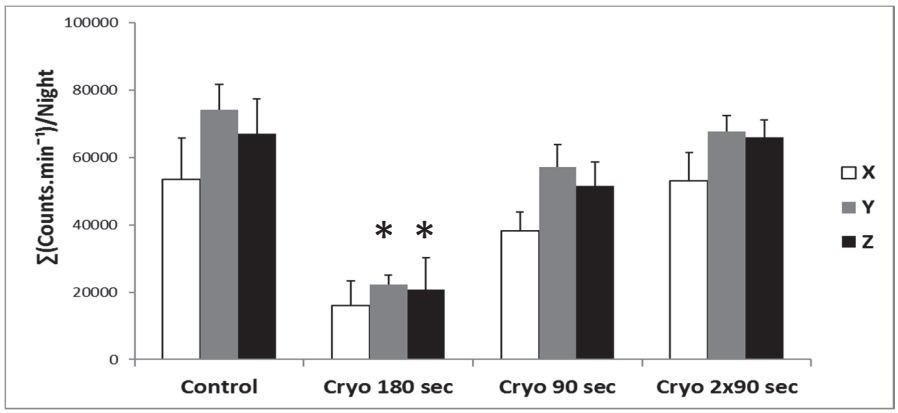


Figure 1: The sum of the counts per minute on the 3 movement axes (x, horizontal; y, vertical; and z, perpendicular) during the night following cryostimulation exposure (180 s, 90 s, and 2 × 90 s) and the control session. *, significant difference from the control at $p < 0.01$. The data are expressed as the mean ± SE values.

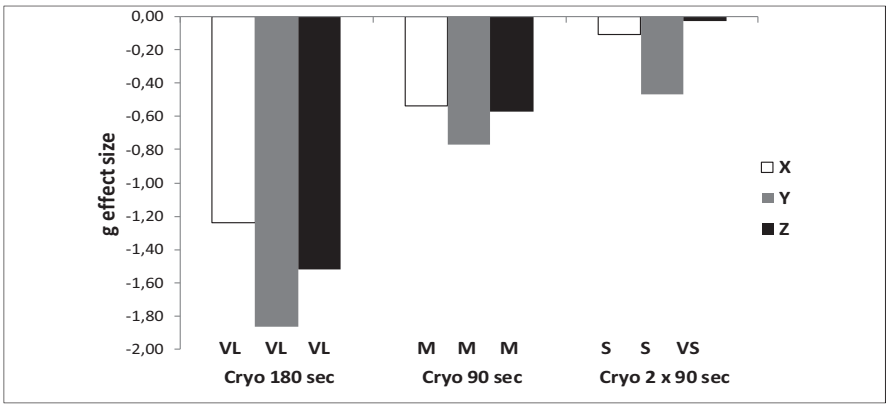


Figure 2: Effect size (Hedges's g) of changes in activity counts in three spatial axes (x, horizontal; y, vertical; and z, perpendicular) during the night following cryostimulation exposures (180 s, 90 s, and 2 × 90 s) compared with the control session. VL, very large effect size; M, medium effect size; S, small effect size; VS, very small effect size.

3.6. Étude 6 : (Post-cooling)

a) Résumé :

3-min whole body cryotherapy/cryostimulation after training in the evening improves sleep quality in physically active men

Douzi W, Dupuy O, Tanneau M, Boucard G, Bouzigon R, Dugué B

❖ Objectif

Étudier l'effet de l'exposition à la cryothérapie corps *entier* le soir, après un entraînement standardisé, sur la qualité de sommeil et l'activité nerveuse parasympathique cardiaque chez des sujets sains et actifs.

❖ Méthode

22 hommes physiquement actifs et en bonne santé (âge :29,9 ± 7,7 ans ; poids : 74,4 ± 4,5 kg, taille : 177,3 ± 7,1 cm ; vitesse aérobie maximale (VMA) ≥ 15 km / h) ont volontairement participé à l'étude. Suite à une séance d'entraînement standardisée de 50 minutes (course continue à 65 % VMA et course intermittente : 3 séries de 7 min à 85 % VMA), les sujets ont effectué aléatoirement une récupération passive ou 3 minutes de cryothérapie corps entier à -50 °C (accompagnée d'un système de ventilation). Toutes les nuits, chaque participant a porté un accéléromètre pour enregistrer les mouvements pendant le sommeil et un moniteur de fréquence cardiaque pour enregistrer la variabilité de fréquence cardiaque. La variabilité de la fréquence cardiaque a été analysée avec 3 méthodes : nuit entière, 4 premières heures de sommeil et le premier épisode (15 min) de sommeil profond. Le lendemain, la qualité subjective du sommeil et de la douleur ressentie ont été recueillies par questionnaires.

❖ Résultats

Perception de la douleur ressentie :

Nous avons constaté que l'exposition à la cryothérapie entraîne une diminution significative de la douleur perçue par rapport à la récupération passive ($p \leq 0{,}001$). Ceci se traduit par une réduction de 58 % des valeurs le lendemain de l'exposition au froid, alors que la récupération passive n'a entrainé qu'une réduction de 20 % de la douleur ressentie **(figure 47).**

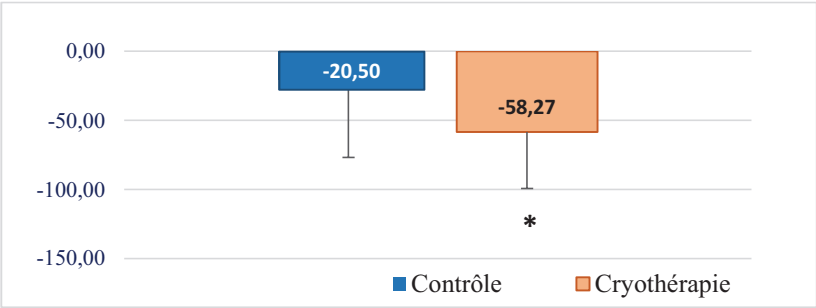


***Figure 47** : Pourcentage de réduction de la douleur perçue le jour suivant l'exposition à la WBC ou la récupération passive. * Différence significative par rapport au témoin à p<0.01.*

Mesures de sommeil (accéléromètre et questionnaire) :

Nous avons trouvé que le nombre de mouvements pendant le sommeil sur les trois axes spatiaux était significativement plus faible la nuit suivant la CE [X (p = 0,0015), Y (p =

0,0045) et Z (p=0,0049)] **(figure 48)**. Nous avons également trouvé une meilleure qualité subjective du sommeil après CE par rapport au contrôle (p<0.05).

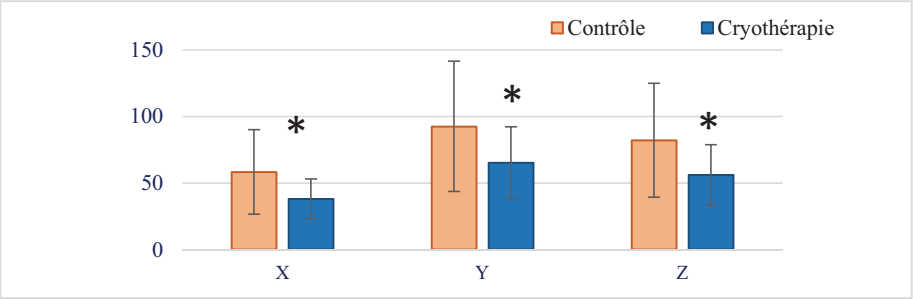


Figure 48 *: Moyenne des mouvements (count/min) sur les trois axes (X, Y et Z)*

Variabilité de la fréquence cardiaque pendant la nuit :

Il n'y avait pas de différence significative entre les deux conditions pour l'analyse de la VFC de toute la nuit ou des 4 premières heures. En revanche, nous avons observé une meilleure activité parasympathique cardiaque au cours du premier épisode de sommeil profond après la CE. En effet, nous avons trouvé lors de cet épisode une valeur moyenne plus élevée de HFnu et des valeurs moyennes plus faibles de LFnu et du rapport LF / HF dans la condition CE par rapport à la condition contrôle (p<0.05).

❖ Discussion

L'exposition à la CE (3 min à -50°C) après un effort physique vigoureux réduit le nombre de mouvements sur les 3 axes spatiaux pendant le sommeil, augmente l'efficience du sommeil, améliore la qualité subjective du sommeil, résultant d'un meilleur état de forme du lendemain matin. Ces résultats confirment les observations préliminaires de Bouzigon et al (2014) chez les basketteurs de haut niveau et les résultats de Schaal et al (2015) chez les nageuses élites. L'amélioration de la qualité de sommeil est expliquée, en partie, par l'effet analgésique du froid et par une meilleure réactivation parasympathique pendant le sommeil profond.

Une seule session de CE (3 minutes à -50°C) améliore la qualité subjective et objective de sommeil chez des hommes sains et physiquement actifs (VMA ≥ 15 Km/h) suite à un exercice physique vigoureux. Cette amélioration s'est expliquée par une réduction de 58 % de douleur ressentie et une meilleure activation parasympathique pendant le sommeil profond.

b) Article:

3-min whole body cryotherapy/cryostimulation after training in the evening improves sleep quality in physically active men

Douzi W[1], Dupuy O[1], Tanneau M[1], Boucard G[2], Bouzigon R[3], Dugué B[1]

1 : University of Poitiers, Laboratoire Mobilité Vieillissement Exercice (MOVE)-EA6314, Faculty of Sport Sciences, Poitiers, France
2 : Centre de Recherches sur la Cognition et l'Apprentissage (UMR7295), Université de Poitiers and Université François-Rabelais de Tours, Poitiers, France
3 : Université de Franche Comté, Laboratoire C3S (EA 4660), Unité de Promotion, de Formation et de Recherche (UPFR) des Sports, 31 rue de l'Epitaphe, 25000 Besançon, France

(Article soumis)

Running head: Cryostimulation improves sleep quality
Corresponding author : Benoit Dugué, PhD
Benoit Dugué, PhD, Université de Poitiers, Faculté des Sciences du Sport et Laboratoire "Mobilité, Vieillissement, Exercice" ; 8 allée Jean Monnet, 86000, Poitiers, France.
E-mail : benoit.dugue@univ-poitiers.fr

Abstract:
Objectives: Exercise training during evening may disturb sleep patterns and hinder recovery process. The present study aimed to examine the effect of whole body cryotherapy (WBC) exposure after training in the evening on sleep quality and night heart rate variability (HRV).
Design:
Randomized trial.
Method:
A total of 22 physically active men were randomized to undergo either WBC or passive recovery (control) following an evening training consisting of 25 min of continuous running at 65 % of the maximal aerobic speed (MAS) followed by intermittent running at 85 % of the MAS. Each night following the training, the number of movements and HRV during sleeping time were recorded. The next morning, perceived pain and subjective sleep quality were assessed.
Results:
Pain was significantly reduced following WBC compared to the control ($p<0.01$). The number of movements during the night following WBC was significantly reduced ($p<0.05$) compared with the control condition. Subjective sleep quality following WBC was significantly better than the control group ($p<0.05$). During the estimated slow-wave sleep (SWS), the high frequency power (HF) was higher in the WBC group than the control group ($p<0.05$), and the low frequency power (LF) and the LF/HF ratio were lower than the control group ($p<0.05$).
Conclusion:
Use of 3-min WBC after training in the evening improves the subjective and objective sleep quality in physically active subjects, which may be due to greater pain relief and improved parasympathetic nervous activity during the SWS period.

Key words: Cryotherapy, cold exposure, sleep, heart rate variability, parasympathetic system, pain.

Introduction

Sleep is considered as a recovery phase due to its physiological restorative effects for reinstating molecular homeostasis, synaptic plasticity and cellular maintenance [1]. Therefore, adequate sleep is essential for maintaining high levels of mental and physical performance in professional athletes [2]

However, sportsmen and high-level athletes often travel or train in the evening and at night due to their busy schedules, which can easily disrupt normal sleep-wake cycles and may even cause poor sleep quality. It is assumed that performing physical exercise less than 4 hours before bedtime induces sleep disturbances [2]. In professional soccer players, late-night exercise induces a greater number of sleep disturbances compared to daylight exercise [3]. Similarly, 53 % of elite Australian athletes (n=283) reported increased sleep disturbances after a night match or training [4]. Furthermore, high intensity exercise conducted in the evening for judo competitors results in an increased number of awakenings and delayed sleep onset. Disturbed sleep following late-night exercise is explained either by increased arousal and prolonged wakefulness induced by physical exercise [3] or an increase in perceived pain induced by the physical exercise [1].

Inadequate sleep quality and quantity likely hinders psychological and physical recovery and limits training adaptations by impeding muscle protein accumulation[1]. From a psychological point of view, sleep loss disrupts mood, confidence and perceptual awareness [5]. In addition, athletes with sleep loss are more likely to suffer from exercise-related injuries [2]. Indeed, maintaining good sleep quality to facilitate the recovery process has been a concern for athletes over the last decade.

In this context, several studies have been conducted to evaluate the effect of slightly decreasing the body temperature on sleep quality [6–8]. A previous study showed that cold water immersion [6] following daily training for one week improved sleep quality.

It was recently shown that a 3-min exposure to cryotherapy, which consists of short exposure to very cold air (from -110 to -195 °C) in special rooms (cryo chambers or cryo cabins) following training sessions promotes good sleep quality in elite synchronized female swimmers and professional basketball players [7,8].

Cryotherapy/cryostimulation is commonly used for analgesic and anti-inflammatory purposes [9]. Nevertheless, the effect of cold exposure in the evening and quite near bedtime on sleep quality has not been investigated. Therefore, it is unclear whether whole body cryotherapy can mitigate sleep disturbances resulting from evening exercise. Also, autonomic nervous activity has not been investigated during sleep following evening cryotherapy exposure. Nevertheless, there are several investigations reporting an increase of parasympathetic activity from 5 to 20 minutes following cold exposure [10,11]. Heart rate changes during sleep are related to sleep stage, awakenings, and body movements [12]. Also, it was recognized that parasympathetic function, quantified by heart rate variability indices, is strongly correlated with sleep quality [11]. As shown in a previous study, poor sleep quality was associated with a disturbance in heart rate variability (HRV) [11]. However, as sleep is characterized by large variations in HRV signals that decrease in non-REM (*Rapid Eye Movement*) sleep and increase in REM sleep [13]. Previous studies [14–16] used HRV analyses, particularly in slow wave sleep episodes (SWS) in which there are fewer body movements, decreased arousal and a more regular respiratory pattern [14].

The present study aimed to examine the effect of 3-min whole body cryotherapy exposure on subjective and objective sleep quality and night HRV analysis following a standardized training session in physically active men.

Methods

Twenty-two physically active (regularly training) and healthy men (age: 28.5±7.3 years; weight: 71.7±12.4 kg; height: 176.1±6.1 cm; maximal aerobic speed (MAS): 17.2±1.3 km/h) participated in the study. They provided their written informed consent, which conformed to the code of ethics of the Declaration of Helsinki. The study was accepted by the local ethics

committee. Participants refrained from heavy exercise for one day before the experiment, and coffee and alcohol were forbidden 24 hours before and after the experiment. They were instructed not to perform any recovery procedure, such as massage or the use of compression garments, other than cryotherapy.

Concerning the experimental design, the experiment was held for two weeks. Each session occurred once per week on the same weekday and at the same time during the day (starting at 7 pm). Subjects undertook a standardized training session for 55 minutes. Then, each subject was assigned to a 3-min whole-body cryotherapy session using a recently described chamber (AuroreConcept®, Noisels, France) [15] or passive recovery in a random order. The night following the recovery (cryotherapy or passive), subjects wore accelerometers and heart rate monitors and recorded their bedtime and waking time in a logbook.

In both trials, the 55 min standardized training session consisted of a 5-min warm up, followed by a continuous exercise bout at 65% MAS for 25 min and an intermittent exercise bout consisting of 3 sets of 7 min at 85 % MAS separated by 2 min of active recovery at 60 % MAS. During the exercise bouts, all participants adjusted their speed using a heart rate monitor (Polar V800 GPS, Finland).
Thirty minutes after the training session, subjects underwent either passive recovery or a 3-min cryotherapy session in a whole-body cryotherapy chamber with technology based on forced convection. This cryotherapy chamber was recently validated, and it was shown that a 3-minute exposure induced the same skin temperature decreases as a 3-minute exposure between -60 °C and -160 °C in previous technologies (whole body or partial body cryotherapy chambers). Before exposure to cryotherapy, the blood pressure of each participant was measured, and further assessments were performed to determine whether the subject had any contraindications to cryotherapy. The cryotherapy chamber was housed in a truck trailer and was composed of two chambers. First, the subject spent 30 s at -25 °C in the first chamber and then 3 min in the main chamber at an exposure temperature of -40 °C and with an average wind speed of 2.3 $m.s^{-1}$. During the exposure, the participant wore a surgical mask, a headband over his ears, underwear, socks, gloves and slippers. The main cryotherapy chamber was equipped with three probes to measure the skin temperature at the trunk, abdomen and thighs every 30 seconds during the exposure time.

Perceived pain and fatigue were assessed before and after the exercise session, and the next day using a visual analogue scale (VAS) ranging from 0 to 10 in which 0 corresponds to no pain or perceived fatigue and 10 represents pain or extreme fatigue.

Participants wore a heart rate monitor (Polar V800 GPS sport watch, Finland) each night after exposure to cryotherapy or control session. They were asked to manually start recording the R-R intervals at bedtime and stop when they woke up. Data files were transferred to the computer using the *Polar Flow Sync software* and were analysed using *Kubios HRV software*. For each subject, the night HRV was assessed during the entire sleep night, the first 4 hours of sleep and the first 10-min stationary segment in the first slow-wave sleep (SWS) episode. As reported in previous study [16], the 4-hour analysis started 30 minutes after the recorded bedtime. The SWS episode was determined according to the method of Brandenberger et al[13] . This segment was characterized by a stable HRV signal of 15 min with a round Poincaré plot and a low standard deviation of normal-to-normal intervals (SDNN). The Kubios HRV software provided a spectral analysis of low frequency (LF: 0.04-0.15 Hz) and high frequency (HF: 0.15 to 0.40 Hz) bands. Other time and frequency domain measures were obtained, such as the mean heart rate (HRmean), R-R interval (RRI), square root of the mean-squared differences of RRI (RMSSD), standard deviation (SD), total power (LF+ HF) and LF/HF power ratio.

Concerning the sleep quality assessment, each night after exposure to cryotherapy or passive recovery, all participants wore a wrist actigraph

(WGT3X-BT monitor, Pensacola, USA) to record movements during sleep. Volunteers were asked to start the recording at bedtime and stop it when waking up the next morning. They were instructed to note in a logbook, the hour at which they went to bed and woke up. This actigraph is equipped with a receiver that captures movements on the horizontal, vertical and perpendicular axes. Data were sampled over a constant interval (epoch length of 60 s) and were extracted as the sum of the vector magnitude in counts/minute (calculated as the square root of the sum of the square of acceleration for each of the three axes) using actiLife software 6.11.0. The total sleep time was estimated from the provided bedtime and wake up time, and the movements during sleep were calculated for each participant as follows: total counts in each axis (x, y, and z)/total sleep time. For the sleep analysis, sleep efficiency [(actual sleep time/total sleep time) *100] was recorded.
Also, subjective sleep quality was assessed using the Spiegel Sleep Quality Perception Questionnaire [17] completed in the morning following WBC exposure or passive recovery. Subjects answered six items, with scores that range from 0 to 5, for sleep time, quality of sleep, nocturnal awakenings, dreams and morning form state. The total score of the Spiegel questionnaire determined the subjective sleep quality.

Statistical analysis:
All data were stored in an electronic database and analysed using specialized statistical software (Statistica 7.0). The Gaussian distribution was tested for each variable using the Shapiro–Wilk test. Paired t-test or non-parametric Wilcoxon test were used to assess the significant difference between the two conditions [cryotherapy (WBC) vs passive recovery (control)]. The results of the tests were considered significant at $p \leq 0.05$. The Hedges' g parameter (g) was used to assess the effect size of the changes [26] and was then interpreted with the Cohen's criteria [27] as a small ($0.2 < g \leq 0.5$), moderate ($0.5 < g \leq 0.8$), or large ($g > 0.8$) effect. The results were expressed as the means with the standard deviation (SD).

Results
After the exercise session, perceived fatigue was similar between the conditions (WBC: 6.3±0.8 vs control: 5.2±2.0, p=0.41). However, when calculating the changes ((morning – evening score)/evening score) in the pain scores, we observed a significant larger decrease in the WBC (-58%) than in the control (-20%) condition (p<0.01).

Skin temperature was assessed in the main cryotherapy chamber and at the end of the exposure, the skin temperature reached 15.0°C ± 1.7°C for the chest, 14.1°C ± 2.1°C for the abdomen and 12.4°C ± 1.6°C for the upper thighs.

As shown in Figure 1, the number of movements detected in the three spatial axes during sleep was significantly lower the night following WBC compared to the control condition [X (p<0.01), Y (p<0.01); Z (p<0.01)]. The effects size of these changes in the three spatial axes ranged from medium to large effects (-0.6<g<0.8). Sleep efficiency after WBC exposure (88.8±6.3) was significantly higher than the control (84.3±6.5) (p<0.05).

The next morning after WBC exposure, Spiegel's total questionnaire score was significantly higher than after passive recovery (WBC: 20.9±3.5 vs control: 23.1±2.5, p<0.05), which indicated improved subjective sleep quality. For the questionnaire items, WBC induced a better morning form state (p<0.05) than the control condition.

The time and frequency domain analyses of HRV during sleep are presented in Table 1. There were no significant differences between the two conditions for any parameter of heart rate variability recorded during the entire night sleep and the first 4-hour period. In contrast, when HRV was assessed during the first 10-min SWS episode, we found that HF in the WBC condition was significantly higher than in the control condition (p<0.05), and the LF and LF/HF were significantly lower than in the control condition. We found no differences for other HRV analyses.

Discussion

The main finding of this study was that a single session of whole body cryotherapy in the evening improves the subjective and objective sleep quality and reduces the perceived pain 24 hours after a standardized exercise regimen in physically active men.

Whole body cryotherapy exposure improved subjective sleep quality and enhanced the morning form state. These results were consistent with previous studies investigating the effect of cooling interventions (cold water immersion and cryotherapy) on subjective sleep quality [5,6]. The beneficial effect of cryotherapy may be explained by a reduction of muscle soreness and improvement of well-being[8], which together lead to improved mood and subjective sleep quality. A previous study examined the relationship between sleep disturbances and perceived pain and reported that an increase in pain levels disrupts sleep by increasing arousal and triggering other neurobiological sequelae of stress [19]. These authors suggested that greater pain relief enhances sleep quality and prevents its disturbance. Therefore, the observed pain reduction in the present study, likely due to the analgesic effect of cryotherapy, may promote better sleep quality and a less disturbed sleep pattern. However, a recent study [20] examining the effect of cold-water immersion on subjective and objective sleep quality reported improved subjective sleep quality without a change in the objective sleep characteristics, which may suggest a placebo effect for the cooling intervention.

The objective sleep quality was evaluated in the present study by assessing sleep efficiency and the number of movements during sleep on the three spatial axes. These variables were recorded with a wrist actigraph validated against laboratory polysomnography, and considered as an accurate tool for measuring and quantifying sleep [21]. As shown in Figure 1, WBC exposure in the evening induced lower motor activity during sleep across the three spatial axes (horizontal, vertical, and perpendicular) than in the passive recovery. As reported in previous studies, the decrease of motor activity levels is indicative of deeper sleep[22,23]. A previous study investigating the effect of training load on sleep quality showed that high levels of motor activity were associated with an increased number of awakenings during sleep, whereas low levels of motor activity indicated deeper sleep [22]. Based on the frequency of rotational motion (roll-overs) during sleep, Miwa et al. [23] proposed that recorded movements increased during light sleep and decreased during deep sleep. Accordingly, the observed lower motor activity levels following WBC exposure may be explained by deeper sleep and better sleep quality. Furthermore, sleep efficiency was improved following WBC exposure. This finding was consistent with a recent study [7] conducted during an intense training period associated with a disruption in sleep quantity and quality. It was demonstrated that the daily use of WBC for two weeks improved swimmers' tolerance to training load by preserving sleep quantity and promoting the onset of sleepiness, particularly during periods of increased physical and psychological stress. Interestingly, the reduced body temperature may have potentially affected sleep by improving sleep propensity [24].

In addition, the perceived pain was reduced by 58 % following cold exposure. This finding confirmed the analgesic effect of cryotherapy reported in recent studies [8,25]. It is recognized that the exposure to cold stimulates the production of beta-endorphin, a neurotransmitter exerting analgesic effects, responsible for a sense of well-being [26], which may explain the improved morning form state and reduced muscle soreness. Also, noradrenalin is produced and also has analgesic properties [26]. Moreover, skin temperatures reached 12 °C at the end of exposure in some body areas. It was shown that a reduction of skin temperature below 13.6 °C stimulates the analgesic effect of cryotherapy by blunting nerve conduction and acetylcholine formation [27].

The heart rate (HR) and heart rate variability (HRV) were considered physiological biomarkers related to sleep stages [28]. From a global view of the entire sleep night and the first 4-hour analysis, HRV was unaffected by cold exposure. By contrast, HRV analysis during the first detected SWS episode was dominated by parasympathetic activity in the WBC group. This finding was determined from a higher HF power

(variations at normal respiratory frequencies, 9-24 times/min, 0.15-0.4 Hz), which is modulated by parasympathetic nervous systems inputs, and a decrease in the LF/HF ratio that indicates decreased sympathetic activity [12]. In this sense, our results showed greater parasympathetic and lower sympathetic activity during the SWS episode following cold exposure. It is known that cold exposure prompted parasympathetic activity reactivation after physical exercise by increasing central blood volume and blood pressure [29], which stimulates arterial and cardiopulmonary baroreceptors [30] that reduce sympathetic nerve activity and increase parasympathetic activity [30].These results were consistent with previous studies investigating the effect of cold exposure on the autonomic nervous system [6,9]. Al Haddad et al [6] observed that daily cold water immersion during a week of normal training in highly trained swimmers induced greater parasympathetic activity in the morning associated with better sleep quality. Similarly, Schaal et al. [8] found that repeated WBC exposure reduced sympathetic activity following late night training, and these authors suggested that improved objective sleep quality may be related to decreased sympathetic activity and lowered arousal that may facilitate sleep onset. Finally, we proposed that the improved subjective and objective sleep quality following cold exposure in athletes undergoing evening training may occur both from reduced perceived pain and greater parasympathetic activity that promotes a swift recovery. However, the physiological mechanisms underlying these improvements remain to be elucidated.

Conclusion:

In conclusion, a 3-min single session of whole body cryotherapy in the evening improved the subjective and objective sleep quality in physically active men, but the physiological mechanisms responsible for this improvement are unclear. Further investigations are warranted to examine the relationship between heart rate variability changes during sleep and cold exposure with an accurate classification of sleep stages.

Acknowledgements:

The authors would like to thank the volunteers who participated in this study. We are also grateful to Quentin Bretonneau and Helene Jarahi for their excellent assistance.

References:

1 Fullagar HH, Duffield R, Skorski S, et al. Sleep and recovery in team sport: current sleep-related issues facing professional team-sport athletes. *Int J Sports Physiol Perform* 2015 ; 10(8) :950–957.

2 Chennaoui M, Arnal PJ, Sauvet F, et al. Sleep and exercise: a reciprocal issue? *Sleep Med Rev* 2015; 20:59–72.

3 Meyer T, Wegmann M, Poppendieck W, et al. Regenerative interventions in professional football. *Sport-Orthop-Sport-Traumatol-Sports Orthop Traumatol* 2014; 30(2):112–118.

4 Juliff LE, Halson SL, Peiffer JJ. Understanding sleep disturbance in athletes prior to important competitions. *J Sci Med Sport* 2015; 18(1):13–18.

5 Reilly T, Edwards B. Altered sleep–wake cycles and physical performance in athletes. *Physiol Behav* 2007; 90(2):274–284.

6 Haddad HA, Parouty J, Buchheit M. Effect of daily cold-water immersion on heart rate variability and subjective ratings of well-being in highly trained swimmers. *Int J Sports Physiol Perform* 2012 :33–38.

7 Bouzigon R, Ravier G, Dugue B, et al. The Use of Whole-Body Cryostimulation to Improve the Quality of Sleep in Athletes During High Level Standard Competitions. *Br J Sports Med* 2014 ; 48(7) :572–572. Doi : 10.1136/bjsports-2014-093494.33.

8 Schaal K, LE Meur Y, Louis J, et al. Whole-Body Cryostimulation Limits Overreaching in Elite Synchronized Swimmers. *Med Sci Sports Exerc* 2015:1416–1425.

9 Dupuy O, Douzi W, Theurot D, et al. An Evidence-Based Approach for Choosing Post-exercise Recovery Techniques to Reduce Markers of Muscle Damage, Soreness, Fatigue, and Inflammation: A Systematic Review with Meta-Analysis. *Front Physiol* 2018; 9: 403. Doi: 10.3389/fphys.2018.00403.

10 Hausswirth C, Schaal K, Le Meur Y, et al. Parasympathetic activity and blood catecholamine responses following a single partial-body cryostimulation and a whole-body cryostimulation. *Plos One* 2013 : e72658.

11 Schaal K, Le Meur Y, Bieuzen F, et al. Effect of recovery mode on postexercise vagal reactivation in elite synchronized swimmers. *Appl Physiol Nutr Metab* 2012:126–133.

12 Johns MW, Thornton C, Doré C. Heart rate and sleep latency in young men. *J Psychosom Res* 1976; 20(6):549–553.

13 Stein PK, Pu Y. Heart rate variability, sleep and sleep disorders. *Sleep Med Rev* 2012; 16(1):47–66.

14 Brandenberger G, Buchheit M, Ehrhart J, et al. Is slow wave sleep an appropriate recording condition for heart rate variability analysis? *Auton Neurosci Basic Clin* 2005 ; 121(1–2):81–86. Doi : 10.1016/j.autneu.2005.06.002.

15 Buchheit M, Simon C, Piquard F, et al. Effects of increased training load on vagal-related indexes of heart rate variability: a novel sleep approach. *Am J Physiol Heart Circ Physiol* 2004; 287(6):H2813-2818. Doi: 10.1152/ajpheart.00490.2004.

16 Al Haddad H, Laursen PB, Ahmaidi S, et al. Nocturnal heart rate variability following supramaximal intermittent exercise. *Int J Sports Physiol Perform* 2009 ; 4(4) :435–447.

17 Bouzigon R, Arfaoui A, Grappe F, et al. Validation of a new whole-body cryotherapy chamber based on forced convection. *J Therm Biol* 2017; 65:138–144. Doi: 10.1016/j.jtherbio.2017.02.019.

18 Costello JT, Algar LA, Donnelly AE. Effects of whole-body cryotherapy (-110 °C) on proprioception and indices of muscle damage. *Scand J Med Sci Sports* 2012; 22(2):190–198. Doi: 10.1111/j.1600-0838.2011.01292. x.

19 Petrofsky JS, Khowailed IA, Lee H, et al. Cold Vs. Heat After Exercise-Is There a Clear Winner for Muscle Soreness. *J Strength Cond Res* 2015; 29(11):3245–3252. Doi: 10.1519/JSC.0000000000001127.

20 Myllymäki T, Rusko H, Syväoja H, et al. Effects of exercise intensity and duration on nocturnal heart rate variability and sleep quality. *Eur J Appl Physiol* 2012 ; 112(3) :801–809. Doi : 10.1007/s00421-011-2034-9.

21 Dupuy O, Bherer L, Audiffren M, et al. Night and postexercise cardiac autonomic control in functional overreaching. *Appl Physiol Nutr Metab* 2013; 38(2):200–208. Doi: 10.1139/apnm-2012-0203.

22 Freedson PS, Melanson E, Sirard J. Calibration of the Computer Science and Applications, Inc. accelerometer. *Med Sci Sports Exerc* 1998; 30(5):777–781. Doi: 10.1097/00005768-199805000-00021.

23 Jaeschke L, Luzak A, Steinbrecher A, et al. 24 h-accelerometry in epidemiological studies: automated detection of non-wear time in comparison to diary information. *Sci Rep* 2017; 7. Doi: 10.1038/s41598-017-01092-w.

24 Sadeh A, Sharkey M, Carskadon MA. Activity-based sleep-wake identification: an empirical test of methodological issues. *Sleep* 1994; 17(3):201–207.

25 Spiegel R. sleep and sleeplessness in advanced age (advances in sleep research, vol 5). New York, SP Medical and Scientific Books, 1981, 272 pp, illustrated, $35.00. *Ann Neurol* 1982; 12(2):190–190. Doi : 10.1002/ana.410120223.

26 Dupuy O, Lussier M, Fraser S, et al. Effect of overreaching on cognitive performance and related cardiac autonomic control. *Scand J Med Sci Sports* 2014; 24(1):234–242.

27 Cohen J. Statistical power analysis for the behavioral sciences. Hilsdale. *NJ Lawrence Earlbaum Assoc* 1988; 2.

28 Lombardi G, Ziemann E, Banfi G. Whole-body cryotherapy in athletes: from therapy to stimulation. An updated review of the literature. *Front Physiol* 2017; 8.

29 Lautenbacher S, Kundermann B, Krieg J-C. Sleep deprivation and pain perception. *Sleep Med Rev* 2006; 10(5):357–369.

30 Skein M, Wingfield G, Gale R, et al. Sleep quantity and quality during consecutive day heat training with the inclusion of cold-water immersion recovery. *J Therm Biol* 2018; 74:63–70.

31 Cole RJ, Kripke DF, Gruen W, et al. Automatic sleep/wake identification from wrist activity. *Sleep* 1992; 15(5):461–469.

32 Thorpy M, Chesson S, Derderian. Practice parameters for the use of actigraphy in the clinical assessment of sleep disorders. *Sleep* 1995; 18(4):285–287.

33 Middelkoop Huub a. M., Hilten Bob J., Kramer Cor G. S., et al. Actigraphically recorded motor activity and immobility across sleep cycles and stages in healthy male subjects. *J Sleep Res* 1993; 2(1):28–33. Doi: 10.1111/j.1365-2869.1993. tb00057. x.

34 Miwa H, Sasahara S, Matsui T. Roll-over detection and sleep quality measurement

using a wearable sensor. *Eng. Med. Biol. Soc. 2007 EMBS 2007 29th Annu. Int. Conf. IEEE*. IEEE, 2007. p. 1507–1510.

35 O'Connor PJ, Breus MJ, Youngstedt SD. Exercise-induced increase in core temperature does not disrupt a behavioral measure of sleep. *Physiol Behav* 1998; 64(3):213–217.

36 Leppäluoto J, Westerlund T, Huttunen P, et al. Effects of long-term whole-body cold exposures on plasma concentrations of ACTH, beta-endorphin, cortisol, catecholamines and cytokines in healthy females. *Scand J Clin Lab Invest* 2008; 68(2):145–153.

37 Bugaj R. The cooling, analgesic, and rewarming effects of ice massage on localized skin. *Phys Ther* 1975; 55(1):11–19.

38 Lan L, Tsuzuki K, Liu YF, et al. Thermal environment and sleep quality: A review. *Energy Build* 2017; 149:101–113.

39 Mourot L, Bouhaddi M, Gandelin E, et al. Cardiovascular autonomic control during short-term thermoneutral and cool head-out immersion. *Aviat Space Environ Med* 2008; 79(1):14–20.

40 Zalewski P, Bitner A, S\lomko J, et al. Whole-body cryostimulation increases parasympathetic outflow and decreases core body temperature. *J Therm Biol* 2014; 45:75–80.

41 Pump B, Shiraishi M, Gabrielsen A, et al. Cardiovascular effects of static carotid baroreceptor stimulation during water immersion in humans. *Am J Physiol* 2001; 280(2):H2607–H2615.

42 Zalewski P, Klawe JJ, Pawlak J, et al. Thermal and hemodynamic response to whole-body cryostimulation in healthy subjects. *Cryobiology* 2013; 66(3):295–302.

Figure and table captions:

Figure 1: Counts per minute on the 3 movement axes (x: horizontal, y: vertical, and z: perpendicular) during sleep following whole body cryotherapy (WBC) or passive recovery (control). * Significant difference from the control at $p < 0.01$.

Table 1: Averages of the indices of heart rate variability during sleep after exposure to WBC or passive recovery (control).

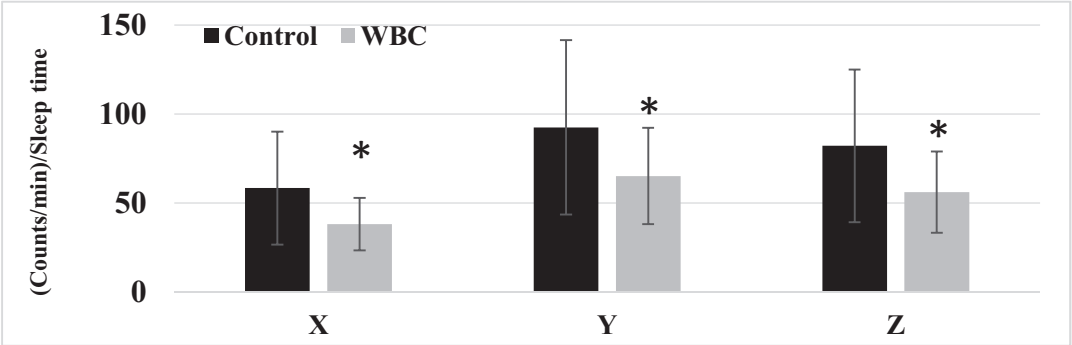


Figure 1: Counts per minute on the 3 movement axes (x: horizontal, y: vertical, and z: perpendicular) during sleep following whole body cryotherapy (WBC) or passive recovery (control). * Significant difference from the control at p <0.01.

Table 1: Averages of HRV analyses during the entire night sleep, the first four hours and the SWS episode after exposure to WBC or passive recovery (control)

	Whole Night		4 hours		SWS	
	Control	**WBC**	**Control**	**WBC**	**Control**	**WBC**
Mean RR	1148 ± 174	1098 ± 283	1125 ± 180	1053 ± 288	1112 ± 167	1137 ± 159
Mean HR	53 ± 9	53,1± 8	54 ± 10	52 ± 12	55± 9	54 ± 8
SDNN	67 ± 16	69 ± 19	136 ± 216	113 ± 86	31 ± 10	39 ± 27
RMSSD	71 ± 27	73 ± 26	140 ± 195	117 ± 93	32 ± 16	44 ± 35
HF nu	36 ± 124	37 ± 10	32 ± 19	30 ± 15	34 ± 16	43 ± 17 *
LF nu	64 ± 12	63 ± 10	68 ± 19	70 ± 15	66 ± 16	57 ± 17 *
Total Power	4479 ± 1908	4738 ± 2227	215827 ± 1908	44534 ± 81171	954 ± 569	1932 ± 3263
LF/HF	2 ± 1	2 ± 1	6 ± 11	4 ± 5	3 ± 2	2 ± 2 *
SD1	50 ± 19	51 ± 18	99 ± 138	82 ± 66	22 ± 11	32 ± 25
SD2	81 ± 17	83 ± 20	163 ± 275	136 ± 105	38 ± 10	44 ± 29

*Significantly different from control. *Abbreviations: RR, R-R interval; HR, Heart rate; SDNN, standard deviation of normal-to-normal intervals; RMSSD, square root of the mean-squared difference of R-R interval;* HF, high-frequency bands; LF, low-frequency bands; Total power, LFnu + HFnu; LF/HF, *LF/HF power ratio*; SD1, standard deviation 1 of Poincaré plot; SD2, standard deviation 2 of Poincaré plot.

Discussion générale

Notre discussion s'intéressera dans un premier temps au per-cooling puis au post-cooling avant d'aborder de manière plus globale nos réflexions quant à la portée de nos résultats.

1. Per-cooling :

La première partie de la thèse porte sur les problèmes associés à un exercice physique effectué dans un environnement chaud (problèmes de santé, dégradation de la performance...) et sur les solutions possibles pour pallier à ces problèmes tel que l'utilisation du froid au cours de l'exercice physique (per-cooling). Dans ce cadre, une première étude de méta-analyse (1) a été conçue pour étudier l'effet du per-cooling sur la performance physique lors d'exercices aérobies et anaérobies. Puis, deux études expérimentales ont permis d'étudier les réponses physiologiques et perceptives au per-cooling lors d'un exercice physique sous-maximal effectué dans des conditions thermo-neutres (2) ou chaudes (3).

1.1. Effet du per-cooling sur la performance aérobie et anaérobie :

Bien que le froid soit de plus en plus utilisé par les athlètes pour atténuer la température corporelle et empêcher l'apparition des troubles liés à la chaleur (les coups de chaleur), assez peu d'études se sont intéressées à l'utilisation du froid au cours de l'exercice physique (per-cooling) et leurs conclusions semblent être parfois contradictoires. Pour pallier à cette situation, une première méta-analyse a été réalisée pour déterminer l'effet du per-cooling sur la performance aérobie et anaérobie, déterminer la technique de refroidissement la plus optimale ainsi que la zone du corps qui devrait être refroidie préférentiellement pour obtenir les meilleurs résultats.

Nous avons constaté que le per-cooling permet d'améliorer la performance des exercices aérobies et anaérobies mais avec un impact plus important pour les exercices aérobies. De nombreuses études ont évalué l'effet du "per-cooling" sur la performance aérobie en utilisant des tests de Tlim (Tyler et Sunderland 2011a; Mündel et al. 2006) ou CM (Teunissen et al. 2013 ; Hsu et al. 2005). La plupart de ces travaux ont rapporté une amélioration de la performance une fois que le froid est appliqué au cours de l'exercice physique. Cet effet positif du per-cooling a également été observé lors d'exercices intenses de courtes durées (anaérobies) (Sunderland et al. 2015 ; Webborn et al. 2010). Cependant, l'effet du per-cooling sur la performance anaérobie est conditionné par le niveau de la température interne et la durée de l'exercice. Des études précédentes expliquent le manque d'effet positif sur la performance anaérobie par le fait que les températures centrales des participants n'atteignaient pas une température suffisamment élevée. En ce sens, il semble qu'il y ait un seuil de température corporelle à atteindre pour obtenir un bénéfice en performance anaérobie suite à l'utilisation du "per-cooling" (Tyler et al .2010). Des études précédentes ont démontré que le refroidissement est efficace à partir d'un seuil bien défini de température interne (39,5 ° C) au cours d'un exercice anaérobie (MVC) (Morrison et al .2004 ; Morrison et al. 2009).

L'effet bénéfique du per-cooling observé dans cette méta-analyse est expliqué dans des études précédentes par des ajustements aux niveaux cardiovasculaires, thermiques et perceptifs (Stevens et al. 2017 ; Tyler et al. 2015). Les ajustements cardio-vasculaires induits par le per-cooling résulte d'une augmentation du volume sanguin central, du flux sanguin musculaire et de l'apport d'oxygène aux muscles actifs, optimisant ainsi la performance (Bongers et al. 2017), ainsi que d'autres ajustements centraux tels que la réduction de la

concentration sanguine de prolactine qui semble être associée à la réduction de la fatigue centrale (Ansley et al. 2008 ; Mündel et Jones 2010). De plus, les feedbacks sensoriels provenant de la diminution de la température cutanée (grâce au per-cooling) peuvent permettre une meilleure activité motrice et une meilleure activité musculaire (Christopher J. Stevens, Kittel, et al. 2017).

Concernant les techniques de refroidissement utilisées lors d'exercices aérobies, nous avons trouvé que les vêtements de refroidissement (type liquide, à changement de phase, par évaporation), les gilets refroidissants (avec des packs de glace) et les systèmes de ventilation sont les techniques les plus efficaces pour améliorer la performance. Nos résultats sont en accord avec ceux rapportés par des travaux précédents de méta-analyses mentionnant que les gilets refroidissants « Ice vest », (Bongers et al. 2015), les vêtements de refroidissement (Chan et al. 2015) et les systèmes de ventilation (Bongers et al .2017) sont des moyens de refroidissement efficaces pour améliorer la performance aérobie. En ce qui concerne la partie du corps refroidie, le refroidissement interne par l'ingestion d'eau froide ainsi que le refroidissement externe du visage, du cou et du tronc induisent les meilleurs gains de performance aérobie. L'impact positif du refroidissement interne sur la performance aérobie peut être dû à la réduction importante de la température interne telle que rapporté dans des travaux précédents (LaFata et al. 2012 ; Mündel et al. 2006). Le refroidissement externe (visage, cou et tronc) a également été bénéfique grâce à la haute sensibilité de ces régions au froid et à leur grande vascularisation, permettant ainsi le refroidissement de quantités substantielles de sang (ESAR Shvartz 1976; Cotter et Taylor 2005).

Quant à la performance anaérobie, cette méta-analyse montre que porter des vêtements de refroidissement recouvrant entièrement le corps est le seul moyen pour améliorer les performances dans des exercices de type anaérobie. Il a été reconnu que ces vêtements de refroidissement réduisent la température cutanée sans pour autant réduire la température musculaire (Racinais et al. 2015). Cela peut améliorer le confort thermique sans compromettre la performance musculaire.

En conclusion, cette première étude montre que le per-cooling améliore la performance aérobie et anaérobie, mais avec un impact plus important pour les exercices aérobies. Cet effet positif semble dépendre de la technique de refroidissement utilisée et de la partie du corps refroidie.

1.2. Les réponses physiologiques et perceptives au per-cooling :

Après avoir étudié l'effet du per-cooling sur les performances aérobies et anaérobies, nous avons constaté que le port d'un gilet refroidissant est l'une des meilleures techniques de refroidissement qui pourrait améliorer les performances aérobies. De ce fait, nous avons testé l'effet du port d'un nouveau gilet refroidissant (APTS-P5, Canada) proposé par l'entreprise Mawashi (Canada) sur les réponses physiologiques (la fréquence cardiaque, les échanges gazeux, la température cutanée et l'oxygénation cérébrale et musculaire) et perceptives (RPE, perception de la température, d'humidité et de bien-être) lors d'un exercice sous-maximal, (70% Fc max) réalisé initialement dans une condition thermo-neutre et dans une condition chaude et humide dans un second temps.

Les résultats de cette étude ont montré que le port de ce système de refroidissement dans un environnement thermo-neutre a un impact positif sur certains paramètres physiologiques et perceptifs. Nous avons observé : (1) une réduction de la température cutanée du tronc au cours de l'exercice et de la récupération, (2) une amélioration du confort thermique grâce à un meilleur sentiment de bien-être et une perception plus faible de la température et de l'humidité, (3) une accélération de la récupération de la fréquence cardiaque et (4) une meilleure oxygénation cérébrale.

L'impact du gilet refroidissant sur la température cutanée du tronc, de la tête et des bras a été évalué pendant l'exercice et la récupération. Dans ce contexte, la température du tronc a été réduite au cours de l'exercice (à partir de la 20ème minute) et pendant la récupération. Les températures mesurées sur les autres sites n'ont pas évolué différemment. Ces résultats concordent avec ceux d'autres études indiquant que la réduction de la température du tronc est plus prononcée que d'autres zones du corps telles que la tête et les bras (Ciuha et al. 2016; Eijsvogels et al. 2014) lors du port d'une veste de refroidissement. De plus, le tronc se caractérise par une grande vascularisation (ESAR Shvartz 1976). De ce fait, le port d'un gilet refroidissant permet de refroidir des quantités substantielles de sang, expliquant ainsi la réduction de la température cutanée du tronc.

Le gilet refroidissant utilisé dans cette étude implique un système de ventilation c'est-à-dire un refroidissement actif qui stimule la perte de chaleur et procure une sensation de fraîcheur (Chan et al. 2017), expliquant probablement l'amélioration des réponses perceptives (perception de la température, d'humidité et de bien-être). Le refroidissement de la peau stimule l'activité des récepteurs cutanés sensibles au froid, qui interviennent ensuite dans la diminution des sensations thermiques (Cheung 2010) et l'amélioration du ressenti des sujets telle que nous l'avons observé. Ces résultats sont en accord avec de nombreuses études utilisant des gilets refroidissants, pendant l'exercice et la récupération, et en particulier ceux impliquant des systèmes de ventilation (Hadid et al. 2009; Chinevere et al. 2008). De plus, il a déjà été montré que le changement de la température cutanée génère des rétroactions sensorielles qui peuvent intervenir dans les ajustements comportementaux et l'amélioration des sentiments de la personne. (D. Filingeri et al. 2015). Néanmoins, la perception de la difficulté de l'effort (RPE) ne semble pas être affectée, tel qu'observé dans les travaux précédents menés dans des conditions thermo-neutres (Eijsvogels et al. 2014) ou chaudes (Luomala et al. 2012).

Nous avons également constaté que le port du gilet refroidissant ne modifie pas la fréquence cardiaque moyenne pendant l'exercice, mais permet une récupération plus rapide de la fréquence cardiaque par rapport à la condition contrôle. Ces résultats concordent avec ceux d'autres études signalant aucun effet bénéfique du gilet refroidissant sur la fréquence cardiaque au cours de l'exercice mais une légère diminution à la fin de l'exercice et pendant la récupération (Luomala et al. 2012; House et al. 2013). L'absence de réduction de la fréquence cardiaque pendant l'exercice s'explique par le fait que le refroidissement superficiel tel qu'utilisé dans la présente étude n'ait pas été suffisant pour réduire le stress cardiovasculaire (Cleary et al. 2014). Concernant la récupération plus rapide de la fréquence cardiaque, nous pouvons émettre l'hypothèse selon laquelle ce phénomène est attribué à une

meilleure réactivation parasympathique cardiaque, probablement induite par une meilleure sensation thermique.

L'effet du refroidissement sur l'oxygénation tissulaire n'a pas été suffisamment étudié dans la littérature scientifique. Cette étude est la première à examiner l'effet du port d'un gilet refroidissant sur l'oxygénation cérébrale et musculaire. En ce qui concerne les changements d'oxygénation cérébrale, nous avons observé une augmentation significative des concentrations relatives d'hémoglobine totale (ThB) tout en portant le gilet refroidissant activé. Cela peut refléter une meilleure oxygénation cérébrale. Le port du gilet refroidissant permet de réduire le flux sanguin cutané (Bogerd et al. 2010) en raison d'une vasoconstriction périphérique induite par le froid. En effet, le flux sanguin peut être dirigé de la peau vers les organes centraux et le cerveau (Castellani et al. 1998), modifiant ainsi le flux sanguin cérébral. Il a été démontré que les signaux NIRS et les modifications de l'oxygénation cérébrale dépendent des changements du débit sanguin cutané (Davis et al. 2006; Ogoh et al. 2009). Des travaux lors d'exercices modérés (60% HR max) ont confirmé ces observations (Miyazawa et al. 2013). Nous pouvons donc conclure que les signaux NIRS étaient fortement influencés par les changements thermiques du flux sanguin cutané. Une autre étude (Julien D. Périard et al. 2013) vient appuyer cette constatation en examinant les changements de l'oxygénation cérébrale dans différentes conditions environnementales. Ces auteurs ont observé que la saturation d'oxygène au niveau du cortex préfrontal (TSI) était maintenue dans la condition froide (18 °C) mais diminuée dans un environnement chaud (40°C) au cours de l'exercice. En ce qui concerne l'oxygénation musculaire, nous n'avons pas observé de différence significative entre les deux conditions. L'absence de changements peut s'expliquer par la faible capacité de refroidissement du gilet qui ne peut ne pas induire de changements périphériques. De plus, la température ambiante n'était que de 22°C. Il a déjà été démontré que la capacité de refroidissement du gilet est plus prononcée avec une charge thermique plus élevée (Eijsvogels et al. 2014). Il est possible que les effets bénéfiques du gilet refroidissant soient plus visibles dans un environnement extrême en termes de température et d'humidité.

Un second travail a été réalisé dans un environnement chaud et humide (30°C, 60% d'humidité) pour examiner l'effet du port d'un gilet refroidissant sur les réponses physiologiques et perceptives. Cette étude montre que le port d'un gilet refroidissant réduit significativement la FC et la température interne à partir de la 20ème minute de l'exercice. Ces résultats montrent que l'impact positif du gilet refroidissant est plus prononcé dans un environnement extrême en termes de température et d'humidité. Cette étude confirme également nos résultats de méta-analyse qui mettent en évidence un impact plus important du per-cooling dans un environnement chaud (> 28°C) que dans un environnement thermo-neutre (<25°C). Il a récemment été confirmé que plus la température ambiante est élevée, plus le taux de refroidissement du tronc (gilet) est important (Cuttell et al. 2016). En ce sens, il peut y avoir un seuil de température ambiante qui doit être atteint pour obtenir un avantage de refroidissement au cours de l'exercice. En ce qui concerne les paramètres perceptifs, comme observé dans l'étude réalisée en thermo-neutre, le refroidissement au cours de l'exercice permet d'améliorer la sensation de bien-être et de diminuer la perception de la chaleur et de l'humidité. En effet, l'utilisation de cette stratégie de refroidissement, chez des personnes travaillant dans des environnements chauds et humides, améliore les conditions de travail en réduisant le stress physiologique et en favorisant le confort thermique.

2. Post-cooling :

La deuxième partie de la thèse porte sur l'effet du froid sur les principaux marqueurs de récupération (objectifs et subjectifs). Pour identifier l'effet du froid sur la récupération sportive, nous avons mené trois études : une méta-analyse visant à comparer différentes techniques de récupération, y compris le froid, sur la diminution des douleurs musculaires, de la fatigue et de l'inflammation ; ainsi que deux autres travaux expérimentaux consacrés à l'étude du post-cooling (cryothérapie) sur la qualité du sommeil et l'activité nerveuse parasympathique cardiaque.

2.1. Effet du post-cooling sur les DOMS, la fatigue perçue et les marqueurs des dommages musculaires et de l'inflammation :

L'objectif de cette méta-analyse était de comparer l'effet des différentes techniques de récupération les plus couramment utilisées par les athlètes (récupération active, étirement, massage, vêtements de compression, électrostimulation, immersion dans l'eau froide ou contrastée, cryothérapie / cryostimulation et stimulation hyperbare) sur la diminution des DOMS, de la fatigue perçue et des marqueurs des dommages musculaires (CK) et d'inflammation induite par l'exercice physique. Les travaux issus de la littérature scientifique ont comparé l'efficacité de ces techniques mais séparément. Cette méta-analyse clarifie le rôle de chaque technique sur plusieurs paramètres de la récupération, les plus mesurées dans le domaine sportif après une séance d'entraînement ou une compétition.

Nos résultats montrent que le massage semble être la technique la plus efficace pour réduire les douleurs musculaires à apparition retardée (DOMS), la fatigue perçue et les marqueurs des dommages musculaires et d'inflammation. L'atténuation des douleurs musculaires peut s'expliquer par l'effet puissant du massage sur la réduction de l'œdème musculaire (Bakar et al. 2015). Il s'ajoute à cela la diminution de la fatigue ressentie suite à l'application d'un massage qui a été expliquée dans la littérature scientifique par une réduction du cortisol circulant (Field et al. 2005) ou/et une augmentation de la concentration des endorphines (Kaada et Torsteinb 1989). De plus, la récupération avec un massage permet une réduction significative des marqueurs des dommages musculaires et d'inflammation, ceci a été confirmé récemment dans de nombreuses études (Kargarfard et al. 2016 ; Guo et al. 2017). D'autres techniques de récupération, tels que l'immersion dans l'eau (froide ou contrastée) et le port de vêtements compressifs, ont également un impact positif sur les mêmes variables mais avec un effet moins prononcé.

Par ailleurs, cette méta-analyse a montré que le post-cooling, soit par l'exposition à l'air très froid (cryothérapie) ou l'immersion en eau froide, réduit les DOMS, la fatigue perçue et les marqueurs des dommages musculaires (CK) et d'inflammation (IL6). Ces résultats soutiennent des études récentes recommandant l'utilisation du post-cooling comme moyen de récupération (Machado et al. 2016 ; Ihsan et al. 2016 ; Lombardi et al. 2017).

Il a été reconnu dans la littérature scientifique que l'exposition au froid stimule l'activité des récepteurs cutanés sensibles au froid et au menthol (TRPM8) qui interviennent ensuite dans l'inhibition de la douleur ressentie (Knowlton et al. 2013). Cela explique l'efficacité du post-cooling pour réduire les douleurs musculaires et la fatigue perçue jusqu'à 24 à 96 heures suite à l'exercice (Hohenauer et al. 2015). En outre, le post-cooling est caractérisé par un effet

analgésique dû à la réduction de la vitesse de conduction nerveuse sensorielle et motrice (Herrera et al. 2010), ce qui pourrait conduire à la réduction de la douleur ressentie (Algafly et George 2007).

Cette méta-analyse confirme les résultats rapportés par deux méta-analyses publiées en 2012 montrant que ***l'immersion en eau froide*** est plus efficace que la récupération passive pour réduire les douleurs musculaires et la fatigue perçue (Bleakley et al. 2012 ; Leeder et al. 2012). L'immersion en eau froide est également efficace pour réduire les marqueurs de dommages musculaires (CK), grâce à l'effet combiné de la vasoconstriction induite par le froid et de la pression hydrostatique qui facilitent ensemble l'élimination des déchets métaboliques (Ihsan et al. 2016) et donc une meilleure récupération. Néanmoins, bien que l'immersion en eau froide réduise localement la réaction inflammatoire (Cote et al. 1988), nous n'avons observé aucun effet de cette technique sur les marqueurs inflammatoires (IL6, CRP). Ces résultats étaient en accord avec des études précédentes ne signalant aucun changement des marqueurs inflammatoires après immersion en eau froide (Hohenauer et al. 2015 ; Halson et al. 2008).

Cette méta-analyse montre également que l'exposition à ***la cryothérapie*** après un exercice physique réduit les douleurs musculaires (DOMS) et l'inflammation (IL6). Il a été démontré dans 80% des études que la cryothérapie réduit la douleur musculaire induite par un EIDM (Rose et al. 2017). En outre, la cryothérapie avec ses deux formes (corps entier ou partiel) (Ferreira-Junior et al. 2015 ; Fonda et Sarabon 2013) réduit la douleur musculaire après un EIDM jusqu'à 72 heures après l'exercice. Ces résultats positifs sont en accord avec les résultats d'études récentes (Lombardi et al. 2017 ; Bouzigon et al. 2016) qui montrent que la cryothérapie s'accompagne d'une diminution de la douleur musculaire et d'une amélioration du bien-être. Cette réduction de la douleur est due à de nombreux mécanismes tels que la réduction du métabolisme cellulaire et l'inhibition des lésions musculaires (Merrick et al. 1999). Il a été rapporté que des sessions répétées de cryothérapie réduisent les taux de CK (Banfi et al. 2009) et de CRP (Pournot et al. 2011) à l'issue d'un exercice physique. Cependant, les études de cryothérapie incluses dans la présente méta-analyse intègrent une seule exposition au froid, ce qui peut- expliquer l'absence d'un effet positif de la cryothérapie sur les valeurs de CK et CRP. En ce qui concerne les marqueurs inflammatoires, nous avons trouvé qu'une seule exposition à la cryothérapie est suffisante pour réduire les taux d'interleukine 6 à l'issue d'un exercice physique. Néanmoins, les résultats concernant l'effet du CE sur l'IL-6 ne sont pas toujours concordants dans la littérature scientifique, probablement en raison de l'hétérogénéité des protocoles de cryothérapie (durée, température, nombre des expositions) et d'exercices utilisés.

2.2. Effet du post-cooling (cryothérapie) sur la qualité de sommeil :

La cryothérapie/cryostimulation a été couramment utilisée à des fins analgésiques, anti-inflammatoires et anti-oxydantes. Or, le lien entre cette technique de post-cooling et la qualité du sommeil n'a pas été suffisamment étudié. Pour ce faire, deux études expérimentales ont été conçues pour examiner l'effet de la cryothérapie corps partiel ou corps entier sur la qualité de sommeil et la variabilité de la fréquence cardiaque.

L'objectif de la première étude a été de comparer l'effet de différentes durées d'exposition à la cryothérapie corps partiel à -180°C (3min, 1min 30 s, 2 fois 1min30s séparés par 5 min à une température ambiante) sur la qualité de sommeil chez des footballeurs professionnels. Les mesures de sommeil ont été réalisées à l'aide d'accéléromètres tridimensionnels, qui sont des outils fiables et valides pour quantifier et qualifier le sommeil (Wang et al. 2008). Nous avons observé qu'une session de 3 minutes de cryothérapie, à l'issue d'une séance d'entraînement de football, améliore la qualité de sommeil, tandis que les autres durées n'induisaient aucun changement. L'amélioration de la qualité de sommeil était déduite d'une réduction significative de mouvements. Une ancienne étude de Taylor et al (Taylor et al. 1997) a montré qu'une augmentation de nombre de mouvements pendant le sommeil est révélatrice d'une mauvaise qualité du sommeil. Ces auteurs ont expliqué cette mauvaise qualité de sommeil par une augmentation de la douleur et de la fatigue musculaire induites par les charges d'entraînement élevées. D'autres travaux, utilisant les accéléromètres pour mesurer le sommeil, ont rapporté que la diminution du nombre de mouvements est associée à une meilleure qualité du sommeil profond (Middelkoop et al. 1993 ; Miwa et al. 2007). Le stade de sommeil profond est essentiel pour récupérer d'une fatigue mentale et physique. En effet, une diminution du nombre de mouvements la nuit suivant la cryostimulation peut être liée à un sommeil plus profond et moins perturbé chez les footballeurs. Cette étude a également confirmé les résultats de deux travaux récents rapportant un effet bénéfique de la cryothérapie sur la qualité de sommeil. La première étude a montré qu'une seule exposition de cryothérapie corps partiel de 3 min à -130°C permet une amélioration de 15% de la qualité du sommeil chez des joueurs professionnels de basket-ball (Bouzigon et al. 2014). La deuxième (Schaal et al. 2015) a été réalisée chez des nageuses de haut niveau pendant une période d'entraînement intense associée à des symptômes de surentraînement. Il a été montré que des sessions répétées de cryothérapie corps entier (14 expositions, une par jour) améliorent la qualité de sommeil en préservant la quantité de sommeil et limitant la latence du sommeil (estimée à l'aide d'accéléromètres tridimensionnels). De surcroît, l'exposition à la cryothérapie à l'issue d'une activité physique, promeut la relaxation et l'envie de dormir (la somnolence) (Schaal et al. 2015) grâce à la diminution de la fatigue et la douleur musculaire.

En ce qui concerne les durées d'exposition, la session de 3 minutes a permis d'améliorer la qualité du sommeil, tandis que les autres durées (90 et 2x 90) n'étaient pas capables d'induire un tel changement. La stimulation par le froid dans ces dernières expositions n'était probablement pas assez importante. Elles ont induit une diminution relativement modérée de la température cutanée du quadriceps (environ -10 ° C) alors que l'exposition de 3 minutes a entraîné une diminution plus importante (-15 ° C). Par conséquent, un effet dose-réponse peut être possible dans ce contexte.

Après avoir montré que 3 minutes d'exposition à la cryothérapie est la durée la plus optimale pour réduire les mouvements pendant le sommeil chez des footballeurs professionnels, une deuxième étude a été réalisée. Cette étude vise à étudier l'effet d'une seule session de cryothérapie corps entier (3 min à -40 °C) sur la qualité subjective et objective du sommeil après une séance d'entraînement standardisée chez des sujets actifs (VMA est supérieure ou égale à 15 km/h). La technologie de cryothérapie utilisée dans cette étude est basée sur la convection forcée (la ventilation d'air froid) qui induit des diminutions de températures cutanées similaires aux autres technologies dont la température d'exposition

va de -60 à -160 °C. Nous avons constaté qu'une seule session de cryothérapie corps entier (3 min à -40 °C) après un entraînement le soir, réduit le nombre de mouvements pendant le sommeil, associé à une meilleure qualité subjective du sommeil, une augmentation de l'activité nerveuse parasympathique cardiaque pendant le sommeil profond et une réduction de la douleur ressentie de 58 % le lendemain matin.

La qualité subjective du sommeil a été mesurée à l'aide d'un questionnaire de perception de la qualité du sommeil. Nous avons constaté une meilleure qualité subjective du sommeil la nuit suivant l'exposition au froid. Ces résultats confirment ceux d'autres études examinant l'effet de l'immersion en eau froide (Haddad et al. 2012) ou de cryothérapie (Bouzigon et al. 2014) sur le sommeil. Ces effets positifs peuvent s'expliquer par la capacité puissante de la cryothérapie à réduire la douleur musculaire, comme l'ont récemment confirmé certaines revues scientifiques (Lombardi et al . 2017; Dupuy et al. 2018). Dans ce contexte, une étude précédente examinant la relation entre les troubles du sommeil et la douleur perçue, a montré qu'un niveau élevé de douleur perçue perturbe le sommeil en augmentant l'excitation et en déclenchant d'autres séquelles neurobiologiques du stress (Lautenbacher et al. 2006). En ce sens, la réduction de la douleur observée dans la présente étude peut améliorer la qualité de sommeil. Cette étude a confirmé l'effet analgésique de la cryothérapie recueillie dans de nombreuses études récentes (Lombardi et al . 2017; Dupuy et al. 2018). L'exposition au froid stimule la sécrétion de noradrénaline (Leppäluoto et al. 2008) et ralentit la vitesse de conduction nerveuse (Bugaj 1975), diminuant ainsi la douleur ressentie.

L'exposition au froid à proximité de l'heure du sommeil diminue le nombre de mouvements, ceci confirmant nos résultats de l'étude préliminaire, menée chez les footballeurs. La diminution de nombre de mouvements pendant le sommeil est révélatrice d'un sommeil plus profond, tel que présenté dans des études précédentes utilisant les accéléromètres pour qualifier le sommeil (Middelkoop et al. 1993 ; Miwa et al. 2007). De surcroit, nous avons observé une meilleure efficience du sommeil la nuit suivant l'exposition au froid. Comme l'ont démontré Schaal et al (Schaal et al. 2015), l'exposition répétée à la cryothérapie a amélioré la tolérance des athlètes à la charge d'entraînement et a préservé la quantité de sommeil en facilitant l'endormissement. De plus, la diminution de la température corporelle près du coucher pourrait améliorer l'endormissement (O'Connor et al . 1998).

2.3. Effet du post-cooling sur la variabilité de la fréquence cardiaque :

La variabilité de la fréquence cardiaque (VFC) a été évaluée dans les deux études examinant l'effet de la cryothérapie sur la qualité de sommeil afin de déterminer si l'amélioration de la qualité du sommeil est associée à une augmentation de l'activité nerveuse parasympathique cardiaque.

Dans la première étude, la VFC a été évaluée juste après l'exposition au froid et le lendemain matin. Aucune différence n'a été observée entre les conditions. La fonction du système nerveux autonome dépend de la position du corps, il a été montré que l'enregistrement en position allongée induit une récupération plus rapide de la fréquence cardiaque que la position assise (Buchheit et al. 2009). Les participants dans cette étude ont adopté une position assise lors de l'enregistrement de la VFC, et cela peut affecter les

résultats. De plus, ces sujets (les footballeurs) ont l'habitude d'utiliser la cryothérapie à des fins de récupération, ce qui peut entraîner une adaptation du système nerveux autonome et ainsi limiter la réactivation parasympathique (Westerlund et al. 2006)

La deuxième étude est la première à évaluer l'effet de la cryothérapie sur la variabilité de fréquence cardiaque pendant le sommeil. La fréquence cardiaque et la variabilité de la fréquence cardiaque ont été considérées comme des marqueurs physiologiques liés aux stades du sommeil et de manière générale à la qualité du sommeil (Lan et al. 2017). Nous n'avons observé aucune différence entre les conditions cryothérapie et contrôle pour les méthodes d'analyse de la VFC de la nuit entière et des premières 4 heures du sommeil. Néanmoins, en analysant la VFC sur les premières 10 minutes estimées du sommeil lent profond, nous avons observé une meilleure activité parasympathique la nuit qui suit l'exposition à la CE. Ceci s'est matérialisé par une augmentation de l'énergie spectrale des hautes fréquences (HF) et une diminution de l'énergie spectrale des basses fréquences (LF) et du rapport LF/HF. En ce sens, nos résultats ont montré une plus grande activité parasympathique au cours du premier épisode du sommeil profond suite à l'exposition au froid. L'amélioration de l'activité parasympathique peut être expliquée par la capacité du froid à générer une vasoconstriction périphérique et à augmenter le volume sanguin central qui pourrait stimuler les barorécepteurs artériels et cardio-pulmonaires (Zalewski, Bitner, et al. 2014), provoquant ainsi une stimulation de l'activité parasympathique et une inhibition de l'activité sympathique (Pump et al. 2001).

Cette étude confirme les résultats des travaux précédents (Schaal et al. 2015 ; Haddad, Parouty, et Buchheit 2012) rapportant un effet bénéfique du post-cooling sur la réactivation nerveuse parasympathique. Al Haddad et al (Haddad et al . 2012) ont observé que le CWI quotidien pendant une semaine d'entraînement normal chez des athlètes de très haut niveau, induit une plus grande activité parasympathique associée à une meilleure qualité de sommeil. De même, Schaal et ses collaborateurs (Schaal et al. 2015) ont constaté que l'exposition répétée à la CE a réduit l'activité sympathique après l'entraînement nocturne. Ces auteurs ont suggéré que l'amélioration de la qualité objective du sommeil pourrait être liée à une diminution de l'activité sympathique et donc un endormissement plus facile.

L'amélioration de la qualité de sommeil que l'on observe dans les deux études du post-cooling peut être ainsi expliquée par l'augmentation de l'activité parasympathique cardiaque qui facilite en partie la récupération.

Limites des études de thèse

Les études de cette thèse peuvent présenter des limites malgré les résultats inédits et très encourageants.

❖ En ce qui concerne les études bibliographiques (les méta-analyses), les études incluses ne présentent pas toutes une bonne qualité méthodologique selon les échelles d'évaluation utilisées (Pedro et Van Tulder). Nous avons inclus quelques études dont le score est inférieur à 5 (au score de la Pedro Scale) et cela pourrait influencer la qualité de nos résultats. Cependant, l'hétérogénéité de la qualité méthodologique (scores de 4 à 8) des études incluses a été contrôlée par une analyse statistique. Une analyse a été effectuée afin de déterminer si les études de faible qualité méthodologiques ont influencé nos résultats. Nous avons constaté que les résultats de nos analyses étaient similaires lorsque les études de qualité inférieure (score de qualité à l'échelle de Pedro inférieur à 5) et celles de qualité supérieure (score de qualité à l'échelle de Pedro supérieure à 5) ont été incluses. Par conséquent, aucun biais dans nos résultats ne découle de la qualité des études incluses. De plus, que ce soit pour la méta-analyse sur la récupération ou sur le « cooling », le bénéfice provenant de l'effet placebo des techniques de récupération ou de refroidissement ne peut pas être totalement éliminé.

❖ En ce qui concerne la méta-analyse comparant les différentes techniques de récupération, nous avons inclus les techniques de récupération couramment utilisées chez les athlètes. Or, il manquait d'autres techniques de récupération telles que les stratégies nutritionnelles et pharmacologiques. Il s'ajoute à cela une autre limite à cette méta-analyse concernant le choix des marqueurs de récupération. En effet, nous n'avons pas étudié l'effet de ces techniques sur la performance physique en raison de la complexité de ce concept et l'hétérogénéité des tests utilisés pour évaluer la performance dans les études. L'objectif de cette méta-analyse était d'évaluer les changements au niveau des dommages musculaires, la douleur, la fatigue perçue et l'inflammation, car ces variables sont bien impliquées dans les processus de récupération à court et à long terme. En ce sens nous considérons que même si l'athlète revient à son niveau initial de performance, cela ne signifie pas qu'il a totalement récupéré.

❖ En ce qui concerne les études expérimentales, une des limites est la petite taille d'échantillon qui va de 7 à 22 participants. Par ailleurs, en ce qui concerne les protocoles de ces études, nous ne pouvons pas sous-estimer l'effet placebo résultant d'une exposition à la cryothérapie ou d'un gilet refroidissant puisque les sujets sont conscients d'avoir participé ou pas à l'intervention à cause du froid ressenti.

❖ Au cours de ce travail de thèse, nous avons utilisé des accéléromètres pour évaluer le sommeil. Malgré la fiabilité et la validité de cet outil dans la mesure du sommeil, il ne fournit pas de classification concernant les différents stades du sommeil et surestime parfois les mesures par rapport à la normale. Malheureusement nous n'avons pas accès à des outils tels que la polysomnographie qui est le test le plus valide et approprié pour mesurer et évaluer le sommeil.

❖ Egalement nous sommes conscients que les systèmes de veste et de chambre de cryothérapie ne sont pas les mêmes d'une étude à l'autre, pouvant rendre plus complexe la comparaison des résultats. Néanmoins des explications logistiques et scientifiques nous ont amenés à choisir telle ou telle technique de refroidissement.

Conclusion générale

Les travaux scientifiques réalisés au cours de cette thèse visaient à étudier certains aspects physiologiques et perceptifs de l'utilisation du froid dans le contexte de l'exercice physique (per-cooling) et de la récupération (post-cooling).

En ce qui concerne l'utilisation du froid au cours de l'exercice physique, un travail de méta-analyse a été réalisé dans un premier temps et nous a permis de montrer que :

- Le per-cooling permet d'améliorer les performances des exercices aérobies et anaérobies mais avec un plus grand impact pour les exercices aérobies.
- Les vêtements de refroidissement (type liquide, à changement de phase, par évaporation), les gilets refroidissants (avec poches de glace) et les systèmes de ventilation sont les techniques les plus efficaces pour améliorer la performance aérobie.
- Les parties du corps les plus intéressantes à refroidir pour obtenir un gain de performance aérobie sont : le refroidissement interne (ingestion des boissons froides et glacées) et le refroidissement externe (visage, cou et tronc).
- L'utilisation de vêtements de refroidissement recouvrant l'ensemble du corps est le seul moyen pour améliorer les performances anaérobies.

Cette méta-analyse nous a permis de constater que le port de gilet refroidissant améliore la performance aérobie. En ce sens, un travail expérimental a été réalisé pour étudier l'effet du port d'un nouveau gilet refroidissant (utilisant un système de ventilation) proposé par l'entreprise Mawashi (Canada) sur les réponses physiologiques et perceptives. Ce travail a montré que le port du gilet refroidissant au cours de l'exercice permet de :

- Réduire la température cutanée du tronc au cours de l'exercice et pendant la récupération.
- Améliorer le confort thermique grâce à un meilleur sentiment de bien-être et une perception plus faible de la température et de l'humidité.
- Accélérer la récupération de la fréquence cardiaque.
- Améliorer l'oxygénation cérébrale.

Une deuxième étude expérimentale a fait l'objet d'une continuité de ce travail mais dans un environnement chaud et humide (chambre climatique : 30°C, 60 % d'humidité) avec un gilet refroidissant basé sur une technologie hybride combinant une détente gazeuse et de la ventilation. Ce travail a montré que le port d'un gilet refroidissant dans cette condition climatique difficile permet de :

- Diminuer la température interne et la fréquence cardiaque au cours de l'exercice ;
- Réduire la perception de la difficulté de l'exercice, la perception de la température et de l'humidité ;
- Améliorer la sensation de bien-être.

En ce qui concerne l'utilisation du froid comme moyen de récupération, une autre méta-analyse a été réalisée pour comparer l'effet des différentes techniques de récupération y compris le post-cooling (cryothérapie et immersion en eau froide) sur la gestion des DOMS, de la fatigue perçue et des marqueurs des dommages musculaires et de l'inflammation. Cette étude nous a permis de rapporter que :

- Le massage est la technique la plus efficace pour réduire les DOMS, la fatigue et les marqueurs des dommages musculaires et de l'inflammation. D'autres techniques de récupération, telles que l'immersion dans l'eau (froide ou contrastée) et le port de vêtements compressifs, ont également un impact positif sur les mêmes variables mais avec un effet moins prononcé.
- L'exposition à la cryothérapie à l'issue d'un exercice physique réduit les douleurs musculaires (DOMS) et l'inflammation (IL6).
- L'immersion dans l'eau froide (post-cooling) réduit les DOMS, la fatigue perçue et les marqueurs des dommages musculaires (CK).

Cette méta-analyse a permis d'identifier l'effet du post-cooling sur la douleur, la fatigue, les marqueurs de dommages musculaires et l'inflammation. Le sommeil est un des marqueurs de récupération les plus importants mais le lien entre celui-ci et le post-cooling n'était pas suffisamment étudié. Pour ce faire, deux travaux expérimentaux ont étudié l'effet de la cryothérapie corps partiel et corps entier sur la qualité du sommeil. Le premier a eu pour objectif de comparer l'effet des différentes durées d'exposition à la cryothérapie corps partiel à -180°C (3min, 1min 30 s, 2x1min30s séparés par 5 min à une température ambiante) sur la qualité de sommeil de footballeurs professionnels à l'issue d'une séance d'entraînement standardisée. Ce travail a montré que :

- Une session de 3 minutes de cryothérapie corps partiel améliore la qualité de sommeil à travers une diminution du nombre de mouvements pendant le sommeil, mais les autres durées n'ont pas provoqué de changement.
- La variabilité de la fréquence cardiaque juste après l'exposition à la cryothérapie et le jour suivant n'a pas été affectée.

La deuxième étude expérimentale de post-cooling a permis de montrer que l'exposition à la cryothérapie corps entier (3 minutes) le soir ,après un exercice physique standardisé, chez des sujets sains et actifs (VMA > 15 km/h) permet de :

- Diminuer le nombre de mouvements pendant le sommeil.
- Améliorer la qualité subjective de sommeil et l'état de forme du matin.
- Réduire la douleur ressentie le lendemain matin (58 % de réduction).
- Augmenter l'activité nerveuse parasympathique durant la première période du sommeil profond.

Cette thèse a permis de clarifier l'effet de l'utilisation du froid sur quelques aspects physiologiques et perceptifs dans le contexte de l'exercice physique et de la récupération. Les résultats des travaux scientifiques réalisés au cours de cette thèse représentent un outil très pratique pour les acteurs du domaine sportif (chercheur, entraîneur, préparateur physique, athlètes…) et du domaine industriel. Les recommandations fournies par les travaux de méta-analyses et les travaux expérimentaux pourraient contribuer à la réussite des programmes d'entraînement à travers une optimisation de la performance et un choix optimal de la technique de récupération ainsi que d'optimiser les conditions de travail des travailleurs.

Perspectives

De nombreuses études rapportent un impact positif du refroidissement sur les fonctions cognitives (mémoire, vigilance…). Néanmoins, la littérature scientifique autour de ce thème est encore peu développée jusqu'à présent. Il serait donc intéressant d'examiner l'effet du « cooling » sur les capacités cognitives chez les athlètes dans le contexte de l'exercice physique et de la récupération.

Il s'avère que le massage et le post-cooling sont des techniques de récupération efficaces pour réduire la douleur musculaire, la fatigue perçue et les marqueurs de l'inflammation. Néanmoins, la combinaison des deux techniques à des fins de récupération mérite d'être examinée. Par ailleurs, la performance physique pourrait être un marqueur très important de la récupération. Cependant, il n'existe pas dans la littérature scientifique, une conclusion claire concernant l'effet du post-cooling sur la performance physique. Un travail de méta-analyse pourrait être pertinent pour examiner ce lien.

Très peu d'études ont étudié l'effet du « cooling » sur la performance physique chez les athlètes de très haut niveau. Il convient de noter que plus le niveau de forme physique est élevé, plus la capacité à perdre de la chaleur est importante grâce à une augmentation de la sudation (Cheung et McLellan 1998). Cela pourrait potentiellement réduire les effets positifs du « cooling ». Il serait donc intéressant d'examiner l'effet du per-cooling ou du post-cooling sur la performance physique et les réponses physiologiques chez les athlètes de très haut niveau dans un environnement chaud. En outre, il existe très peu d'études examinant l'effet du refroidissement chez les femmes, d'autres études sont donc nécessaires pour vérifier si l'effet du refroidissement dépend du sexe.

Il semble clair que le « cooling » a un impact positif sur la qualité du sommeil. Mais les mécanismes physiologiques responsables de cette amélioration ne sont pas clairs, peut-être un dosage de mélatonine et une mesure de température interne pendant le sommeil sont nécessaires pour clarifier cet effet positif de l'exposition au froid. De plus, un examen de polysomnographie pourrait être intéressant pour qualifier et quantifier le sommeil tout au long d'une nuit entière, ainsi que de l'activité électrique cérébrale (EEG), cardiaque (ECG), musculaire (EMG), et respiratoire.

Références

Abedelmalek, Salma, Nizar Souissi, Hamdi Chtourou, Meriam Denguezli, Chirine Aouichaoui, Monia Ajina, Asma Aloui, Mohamed Dogui, Samy Haddouk, et Zouhair Tabka. 2013. « Effects of partial sleep deprivation on proinflammatory cytokines, growth hormone, and steroid hormone concentrations during repeated brief sprint interval exercise ». *Chronobiology international* 30: 502–509.

Adam, Kirstine, et I. A. N. Oswald. 1983. « Protein synthesis, bodily renewal and the sleep-wake cycle ». *Clinical Science* 65: 561–567.

Adams, William M., Yuri Hosokawa, et Douglas J. Casa. 2016. « Body-cooling paradigm in sport: maximizing safety and performance during competition ». *Journal of sport rehabilitation* 25: 382–394.

Adams, William M., Brendon P. McDermott, Cyril Schmit, et Glen P. Kenny. 2018. « Body Cooling ». In , 59–81. Springer.

Algafly, Amin A., et Keith P. George. 2007. « The Effect of Cryotherapy on Nerve Conduction Velocity, Pain Threshold and Pain Tolerance ». *British Journal of Sports Medicine* 41: 365‑69; discussion 369.

Almeida, Aline C., Aryane F. Machado, Maíra C. Albuquerque, Lara M. Netto, Franciele M. Vanderlei, Luiz Carlos M. Vanderlei, Jayme Netto Junior, et Carlos M. Pastre. 2016. « The effects of cold water immersion with different dosages (duration and temperature variations) on heart rate variability post-exercise recovery: A randomized controlled trial ». *Journal of Science and Medicine in Sport* 19: 676–681.

Amorim, Fabiano T., Paulette M. Yamada, Robert A. Robergs, et Suzanne M. Schneider. 2010. « Palm Cooling Does Not Reduce Heat Strain during Exercise in a Hot, Dry Environment ». *Applied Physiology, Nutrition, and Metabolism = Physiologie Appliquee, Nutrition Et Metabolisme* 35: 480‑89.

Ansley, Les, Gary Marvin, Anita Sharma, Martin J. Kendall, David A. Jones, et Matthew W. Bridge. 2008. « The effects of head cooling on endurance and neuroendocrine responses to exercise in warm conditions ». *Physiological research* 57: 863.

Armstrong, Lawrence E. Armstrong, Douglas J. Casa, Mindy Millard-Stafford, Daniel S. Moran, Scott W. Pyne, et William O. Roberts. 2007. « American College of Sports Medicine Position Stand. Exertional Heat Illness during Training and Competition ». *Medicine and Science in Sports and Exercise* 39: 556‑72.

Armstrong, Lawrence E. 2003. *Exertional Heat Illnesses*. Human Kinetics pp.17-28.

Arnaudo, Bernard, Isabelle Magaud-Camus, Nicolas Sandret, Thomas Coutrot, Marie-C. Floury, Nicole Guignon, Sylvie Hamon-Cholet, et Dominique Waltisperger. 2004. « L'exposition aux risques et aux pénibilités du travail de 1994 à 2003. Premiers résultats de l'enquête SUMER 2003 ». *Prem Inf. Prem Synth* 52: 1–8.

Arngrïmsson, Sigurbjörn Á, Darby S. Petitt, Matthew G. Stueck, Dennis K. Jorgensen, et Kirk J. Cureton. 2004. « Cooling vest worn during active warm-up improves 5-km run performance in the heat ». *Journal of applied physiology* 96: 1867–1874.

Ascensao, Antonio, Marco Leite, António N. Rebelo, Sérgio Magalhães, et José Magalhães. 2011. « Effects of cold water immersion on the recovery of physical performance and muscle damage following a one-off soccer match ». *Journal of sports sciences* 29: 217–225.

Bain, A. R., N. C. Lesperance, et O. Jay. 2012. « Body heat storage during physical activity is lower with hot fluid ingestion under conditions that permit full evaporation ». *Acta physiologica* 206: 98–108.

Bain, Anthony R., Kurt J. Smith, Nia C. Lewis, Glen E. Foster, Kevin W. Wildfong, Christopher K. Willie, Geoffrey L. Hartley, Stephen S. Cheung, et Philip N. Ainslie. 2013. « Regional Changes in Brain Blood Flow during Severe Passive Hyperthermia: Effects of PaCO2 and Extracranial Blood Flow ». *Journal of Applied Physiology* 115: 653‑59.

Bakar, Yesim, Hakkı Coknaz, Ümid Karlı, Önder Semsek, Erdinc Serın, et Ömer Osman Pala. 2015. « Effect of manual lymph drainage on removal of blood lactate after submaximal exercise ». *Journal of physical therapy science* 27: 3387–3391.

Banfi, Giuseppe, Giovanni Lombardi, Alessandra Colombini, et Gianluca Melegati. 2010. « Whole-body cryotherapy in athletes ». *Sports medicine* 40: 509–517.

Banfi, Giuseppe, Gianluca Melegati, Alessandra Barassi, Giada Dogliotti, Gianvico Melzi d'Eril, Benoit Dugué, et Massimiliano M. Corsi. 2009. « Effects of whole-body cryotherapy on serum mediators of inflammation and serum muscle enzymes in athletes ». *Journal of Thermal Biology* 34: 55–59.

Barr, David, Warren Gregson, et Thomas Reilly. 2010. « The thermal ergonomics of firefighting reviewed ». *Applied ergonomics* 41: 161–172.

Barwood, M. J., J. Corbett, K. Thomas, et P. Twentyman. 2015. « Relieving Thermal Discomfort: Effects of Sprayed L-Menthol on Perception, Performance, and Time Trial Cycling in the Heat ». *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports* 25: 211‑18.

Barwood, M. J., J. Corbett, et D. K. White. 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: 595‑604.

Barwood, Martin J., Phillip S. Newton, et Michael J. Tipton. 2009. « Ventilated Vest and Tolerance for Intermittent Exercise in Hot,

Dry Conditions With Military Clothing ». *Aviation, Space, and Environmental Medicine* 80: 353‑59.

Barwood, Martin James, Jo Corbett, Danny White, et Jason James. 2011. « Early Change in Thermal Perception Is Not a Driver of Anticipatory Exercise Pacing in the Heat ». *Br J Sports Med* 46:936-42.

Barwood, Martin James, Sarah Davey, James R. House, et Michael J. Tipton. 2009. « Post-exercise cooling techniques in hot, humid conditions ». *European journal of applied physiology* 107: 385.

Battu, Valérie. 2013. « L'apnée du sommeil ». *Actualités Pharmaceutiques* 52: 57‑60.

Belval, Luke N., Douglas J. Casa, William M. Adams, George T. Chiampas, Jolie C. Holschen, Yuri Hosokawa, John Jardine, Shawn F. Kane, Michele Labotz, et Renée S. Lemieux. 2018. « Consensus Statement-Prehospital Care of Exertional Heat Stroke ». *Prehospital Emergency Care*, 1–6.

Bentley, Steve. 1996. « Exercise-Induced Muscle Cramp ». *Sports Medicine* 21: 409‑20..

Bergeron, M. F. 2003. « Heat cramps: fluid and electrolyte challenges during tennis in the heat ». *Journal of Science and Medicine in Sport* 6: 19‑27.

Bergh, U., et B. Ekblom. 1979. « Physical Performance and Peak Aerobic Power at Different Body Temperatures ». *Journal of Applied Physiology* 46: 885‑89.

Best, Russ, Stephen Payton, Iain Spears, Florence Riera, et Nicolas Berger. 2018. « Topical and Ingested Cooling Methodologies for Endurance Exercise Performance in the Heat ». *Sports* 6: 11.

Bettoni, Lorenzo, Felice Giulio Bonomi, Viviana Zani, Luigia Manisco, Annamaria Indelicato, Patrizia Lanteri, Giuseppe Banfi, et Giovanni Lombardi. 2013. « Effects of 15 consecutive cryotherapy sessions on the clinical output of fibromyalgic patients ». *Clinical rheumatology* 32: 1337–1345.

Bieuzen, F., J. Louis, et C. Hausswirth. 2015. « Cryothérapie corps entier et exercice ». *Science & Sports* 30: 113–118.

Binkley, Helen M., Joseph Beckett, Douglas J. Casa, Douglas M. Kleiner, et Paul E. Plummer. 2002. « National Athletic Trainers' Association Position Statement: Exertional Heat Illnesses ». *Journal of Athletic Training* 37: 329‑43.

Bleakley, Chris M., François Bieuzen, Gareth W. Davison, et Joseph Costello. 2014. « Whole-body cryotherapy: empirical evidence and theoretical perspectives ». *Open access journal of sports medicine* 5: 25–36.

Bleakley, Chris M., et Gareth W. Davison. 2009. « What is the biochemical and physiological rationale for using cold water immersion in sports recovery? A systematic review ». *British journal of sports medicine* 44:179-187

Bleakley, Chris, Suzanne McDonough, Evie Gardner, David G. Baxter, Ty J. Hopkins, Gareth W. Davison, et Marco Túlio Costa. 2012. « Cold-water immersion (cryotherapy) for preventing and treating muscle soreness after exercise ». *Sao Paulo Medical Journal* 130: 348–348.

Bogerd, Nina, Claudio Perret, Cornelis P. Bogerd, René M. Rossi, et Hein AM Daanen. 2010. « The effect of pre-cooling intensity on cooling efficiency and exercise performance ». *Journal of sports sciences* 28: 771–779.

Bolster, D. R., et LE ARMSTRONG. 2000. « Exercise, thermoregulation, and precooling ». *Am. J. Med. Sports* 2: 155–164.

Bongers, Coen C. W. G., Maria T. E. Hopman, et Thijs M. H. Eijsvogels. 2017. « Cooling interventions for athletes: An overview of effectiveness, physiological mechanisms, and practical considerations ». *Temperature* 4: 60‑78.

Bongers, Coen C W G, Dick H J Thijssen, Matthijs T W Veltmeijer, Maria T E Hopman, et Thijs M H Eijsvogels. 2015a. « Precooling and Percooling (Cooling during Exercise) Both Improve Performance in the Heat: A Meta-Analytical Review ». *British Journal of Sports Medicine* 49: 377‑84.

Bongers, Coen C. W. G., Dick H. J. Thijssen, Matthijs T. W. Veltmeijer, Maria T. E. Hopman, et Thijs M. H. Eijsvogels. 2015b. « Precooling and Percooling (Cooling during Exercise) Both Improve Performance in the Heat: A Meta-Analytical Review ». *Br J Sports Med* 49:377-84

Borg, G. A. 1982. « Psychophysical Bases of Perceived Exertion ». *Medicine and Science in Sports and Exercise* 14: 377‑81.

Bouchama, Abderrezak, et James P. Knochel. 2002. « Heat stroke ». *New England Journal of Medicine* 346: 1978–1988.

Bouzigon, R., G. Ravier, B. Dugue, et F. Grappe. 2014. « The Use of Whole-Body Cryostimulation to Improve the Quality of Sleep in Athletes During High Level Standard Competitions ». *Br J Sports Med* 48: 572‑572.

Bouzigon, Romain, Frederic Grappe, Gilles Ravier, et Benoit Dugue. 2016. « Whole-and partial-body cryostimulation/cryotherapy: Current technologies and practical applications ». *Journal of Thermal Biology* 61: 67–81.

Brancaccio, Paola, Nicola Maffulli, et Francesco Mario Limongelli. 2007. « Creatine kinase monitoring in sport medicine ». *British medical bulletin* 81: 209–230.

Brearley, Matt. 2012. « Crushed ice ingestion-a practical strategy for lowering core body temperature ». *Journal of Military and Veterans Health* 20: 25.

Bridge, Mathew W., Andrew S. Weller, Mark Rayson, et David A. Jones. 2003. « Responses to Exercise in the Heat Related to Measures of

Hypothalamic Serotonergic and Dopaminergic Function ». *European Journal of Applied Physiology* 89: 451‑59.

Brion, Richard, Laurent Chevalier, Stéphane Doutreleau, Jean Gauthier, Jean-Michel Guy, Gaelle Kervio, Vincent Lafay, et al. 2013. *Cardiologie du sport*. De Boeck Superieur.

Brooks, George A., KARL J. Hittelman, JOHN A. Faulkner, et ROBERT E. Beyer. 1971. « Temperature, skeletal muscle mitochondrial functions, and oxygen debt ». *American Journal of Physiology-Legacy Content* 220: 1053–1059.

Brophy-Williams, Ned, Grant Landers, et Karen Wallman. 2011. « Effect of immediate and delayed cold water immersion after a high intensity exercise session on subsequent run performance ». *Journal of sports science & medicine* 10: 665.

Buchheit, M., H. Al Haddad, P. B. Laursen, et S. Ahmaidi. 2009. « Effect of body posture on postexercise parasympathetic reactivation in men ». *Experimental physiology* 94: 795–804.

Budd, Grahame M. 2008. « Wet-bulb globe temperature (WBGT)—its history and its limitations ». *Journal of Science and Medicine in Sport* 11: 20–32.

Bugaj, Ronald. 1975. « The cooling, analgesic, and rewarming effects of ice massage on localized skin ». *Physical Therapy* 55: 11–19.

Buono, Michael J., et Pedro Cabrales. 2016. « Hyperthermia during exercise–a double-edged sword ». *Temperature: Multidisciplinary Biomedical Journal* 3: 512.

Burdon, Catriona A., Matthew W. Hoon, Nathan A. Johnson, Phillip G. Chapman, et Helen T. O'Connor. 2013. « The Effect of Ice Slushy Ingestion and Mouthwash on Thermoregulation and Endurance Performance in the Heat ». *International Journal of Sport Nutrition and Exercise Metabolism* 23: 458‑69.

Burdon, Catriona A., Nathan A. Johnson, Phillip G. Chapman, et Helen T. O'Connor. 2012. « Influence of beverage temperature on palatability and fluid ingestion during endurance exercise: a systematic review ». *International journal of sport nutrition and exercise metabolism* 22: 199–211.

Burdon, Catriona, Helen O'Connor, Janelle Gifford, Susan Shirreffs, Phillip Chapman, et Nathan Johnson. 2010. « Effect of drink temperature on core temperature and endurance cycling performance in warm, humid conditions ». *Journal of sports sciences* 28: 1147–1156.

Butts, Cory L., Cody R. Smith, Matthew S. Ganio, et Brendon P. McDermott. 2017. « Physiological and perceptual effects of a cooling garment during simulated industrial work in the heat ». *Applied Ergonomics* 59: 442–448.

Cadarette, Bruce S., Samuel N. Cheuvront, Margaret A. Kolka, Lou A. Stephenson, Scott J. Montain, et Michael N. Sawka. 2006. « Intermittent microclimate cooling during exercise-heat stress in US army chemical protective clothing ». *Ergonomics* 49: 209–219.

Cámara-Lemarroy, Carlos R., José R. Azpiri-López, Luis A. Vázquez-Díaz, et Dionicio A. Galarza-Delgado. 2017. « Abdominal Aortic Dissection and Cold-Intolerance After Whole-Body Cryotherapy: A Case Report ». *Clinical Journal of Sport Medicine* 27: e67.

Carballeira, Eduardo, José Morales, David H. Fukuda, María L. Granada, Vicente Carratalá-Deval, A. L. de Durana Díaz, et Jeffrey R. Stout. 2018. « Intermittent Cooling During Judo Training in A Warm/Humid Environment Reduces Autonomic and Hormonal Impact. » *Journal of strength and conditioning research*. https://doi.org/10.1519/JSC.0000000000002443.

Carcano, Yves, Bernard Isembrand, Grégory Wieczorek, et Béchir Boudjemaa. 2010. « Le ressenti de sportifs lors d'un massage de récupération en termes de douleur et fatigue musculaires et de bien-être ». *Kinésithérapie, la Revue*, Rôle et place des bandages adhésifs actifs de couleurs, 10: 46‑50.

Carrard, Justin, Anne Chantal Lambert, et Daniel Genné. 2017. « Transient Global Amnesia Following a Whole-Body Cryotherapy Session ». *BMJ Case Reports* pii: bcr-2017-221431

Casa, Douglas J., Julie K. DeMartini, Michael F. Bergeron, Dave Csillan, E. Randy Eichner, Rebecca M. Lopez, Michael S. Ferrara, Kevin C. Miller, Francis O'Connor, et Michael N. Sawka. 2015. « National Athletic Trainers' Association position statement: exertional heat illnesses ». *Journal of athletic training* 50: 986–1000.

Casa, Douglas J., Brendon P. McDermott, Elaine C. Lee, Susan W. Yeargin, Lawrence E. Armstrong, et Carl M. Maresh. 2007. « Cold water immersion: the gold standard for exertional heatstroke treatment ». *Exercise and sport sciences reviews* 35: 141–149.

Castellani, John W., Andrew J. Young, Michael N. Sawka, et Kent B. Pandolf. 1998. « Human thermoregulatory responses during serial cold-water immersions ». *Journal of Applied Physiology* 85: 204–209.

Castle, Paul C., Neil Maxwell, Alan Allchorn, Alexis R. Mauger, et Danny K. White. 2012. « Deception of ambient and body core temperature improves self paced cycling in hot, humid conditions ». *European journal of applied physiology* 112: 377–385.

Centers for Disease Control and Preventionol, Centers for Disease, Prevention, et others. 1995. « Heat–related illnesses and deaths-United States, 1994-1995 ». *MMWR: Morbidity and mortality weekly report* 44: 465–468.

Chan, Albert P. C., Y. Yang, Francis K. W. Wong, Michael C. H. Yam, Del P. Wong, et W. F. Song. 2017. « Reduction of physiological strain under a hot and humid environment by a hybrid cooling vest. » *The Journal of Strength & Conditioning Research* https://doi.org/10.1519/JSC.0000000000001837.

Chan, Albert PC, Wenfang Song, et Yang Yang. 2015. « Meta-analysis of the effects of microclimate cooling systems on human performance under thermal stressful environments : potential applications to occupational workers ». *Journal of thermal biology* 49: 16–32.

Chatzinikolaou, Athanasios, Ioannis G. Fatouros, Vassilios Gourgoulis, Alexandra Avloniti, Athanasios Z. Jamurtas, Michalis G. Nikolaidis, Ioannis Douroudos, et al. 2010. « Time course of changes in performance and inflammatory responses after acute plyometric exercise ». *The Journal of Strength & Conditioning Research* 24: 1389–1398.

Che Muhamed, Ahmad Munir, Kerry Atkins, Stephen R. Stannard, Toby Mündel, et Martin William Thompson. 2016. « The effects of a systematic increase in relative humidity on thermoregulatory and circulatory responses during prolonged running exercise in the heat ». *Temperature* 3: 455–464.

Cheng, Arthur J., Sarah J. Willis, Christoph Zinner, Thomas Chaillou, Niklas Ivarsson, Niels Ørtenblad, Johanna T. Lanner, Hans-Christer Holmberg, et Håkan Westerblad. 2017. « Post-Exercise Recovery of Contractile Function and Endurance in Humans and Mice Is Accelerated by Heating and Slowed by Cooling Skeletal Muscle ». *The Journal of Physiology* 595: 7413‑26.

Cheung, Karoline, Patria A. Hume, et Linda Maxwell. 2003. « Delayed onset muscle soreness ». *Sports Medicine* 33: 145–164.

Cheung, S. S., et T. M. McLellan. 1998. « Heat Acclimation, Aerobic Fitness, and Hydration Effects on Tolerance during Uncompensable Heat Stress ». *Journal of Applied Physiology* 84: 1731‑39.

Cheung, Stephen S. 2010. « Interconnections between Thermal Perception and Exercise Capacity in the Heat ». *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports* 20: 53‑59.

Cheung, Stephen S., Jason K. W. Lee, et Juha Oksa. 2016. « Thermal Stress, Human Performance, and Physical Employment Standards ». *Applied Physiology, Nutrition, and Metabolism = Physiologie Appliquee, Nutrition Et Metabolisme* 41: S148-164.

Cheung, Stephen S., Tom M. McLellan, et Sandra Tenaglia. 2000. « The thermophysiology of uncompensable heat stress ». *Sports Medicine* 29: 329–359.

Cheung, Stephen S., et Alicia M. Robinson. 2004. « The influence of upper-body pre-cooling on repeated sprint performance in moderate ambient temperatures ». *Journal of sports sciences* 22: 605–612.

Cheuvront, Samuel N., et Emily M. Haymes. 2001. « Thermoregulation and marathon running ». *Sports Medicine* 31: 743–762.

Chinevere, Troy D., Bruce S. Cadarette, Daniel A. Goodman, Brett R. Ely, Samuel N. Cheuvront, et Michael N. Sawka. 2008. « Efficacy of body ventilation system for reducing strain in warm and hot climates ». *European journal of applied physiology* 103: 307–314.

Choi, Jeong-Wha, Myung-Ju Kim, et Joo-Young Lee. 2008. « Alleviation of Heat Strain by Cooling Different Body Areas during Red Pepper Harvest Work at WBGT 33℃ ». *Industrial Health* 46: 620‑28.

Choo, Hui C., Kazunori Nosaka, Jeremiah J. Peiffer, Mohammed Ihsan, Chow C. Yeo, et Chris R. Abbiss. 2018. « EFFECT OF WATER IMMERSION TEMPERATURE ON HEART RATE VARIABILITY FOLLOWING EXERCISE IN THE HEAT ». *Kinesiology* 50 (1).

Chung, Yeonseung, Youn-Hee Lim, Yasushi Honda, Yue-Liang Leon Guo, Masahiro Hashizume, Michelle L. Bell, Bing-Yu Chen, et Ho Kim. 2015. « Mortality related to extreme temperature for 15 cities in northeast Asia ». *Epidemiology* 26: 255–262.

Ciuha, Ursa, Mikael Grönkvist, Igor B. Mekjavic, et Ola Eiken. 2016. « Strategies for increasing evaporative cooling during simulated desert patrol mission ». *Ergonomics* 59: 298–309.

Cleary, Michelle A., Michelle G. Toy, et Rebecca M. Lopez. 2014. « Thermoregulatory, cardiovascular, and perceptual responses to intermittent cooling during exercise in a hot, humid outdoor environment ». *The Journal of Strength & Conditioning Research* 28: 792–806.

Clements, Julie M., Douglas J. Casa, J. Chad Knight, Joseph M. McClung, Alan S. Blake, Paula M. Meenen, Allison M. Gilmer, et Kellie A. Caldwell. 2002. « Ice-water immersion and cold-water immersion provide similar cooling rates in runners with exercise-induced hyperthermia ». *Journal of athletic training* 37: 146.

Clifford, Tom, Will Abbott, Susan Y. Kwiecien, Glyn Howatson, et Malachy P. McHugh. 2017. « Cryotherapy re-invented: application of phase change material for recovery in elite soccer ». *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 1–21.

Cole, Roger J., Daniel F. Kripke, William Gruen, Daniel J. Mullaney, et J. Christian Gillin. 1992. « Automatic sleep/wake identification from wrist activity ». *Sleep* 15: 461–469.

Commission for Thermal Physiology of the International Union of Physiological Sciences. 1987. « Glossary of Terms for

Thermal Physiology : Second Edition ». *Pflugers Archiv: European Journal of Physiology* 410 567‑87.

Coris, Eric E., Arnold M. Ramirez, et Daniel J. Van Durme. 2004. « Heat Illness in Athletes ». *Sports Medicine* 34: 9‑16.

Costello, J. T., L. A. Algar, et A. E. Donnelly. 2012. « Effects of Whole-Body Cryotherapy (-110 °C) on Proprioception and Indices of Muscle Damage ». *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports* 22: 190‑98.

Costello, Joseph T., Philip RA Baker, Geoffrey M. Minett, Francois Bieuzen, Ian B. Stewart, et Chris Bleakley. 2015. « Whole-body cryotherapy (extreme cold air exposure) for preventing and treating muscle soreness after exercise in adults ». *Journal of Evidence-Based Medicine*. Cochrane Database Syst Rev 18;9:CD010789.

Cote, Debra J., W. E. Prentice Jr, D. N. Hooker, et E. W. Shields. 1988. « Comparison of three treatment procedures for minimizing ankle sprain swelling. » *Physical Therapy* 68: 1072–1076.

Cotter, James D., et Nigel A. S. Taylor. 2005. « The Distribution of Cutaneous Sudomotor and Alliesthesial Thermosensitivity in Mildly Heat-Stressed Humans: An Open-Loop Approach ». *The Journal of Physiology* 565: 335‑45.

Crowe, M. J., D. O'Connor, et D. Rudd. 2007. « Cold water recovery reduces anaerobic performance ». *International journal of sports medicine* 28: 994–998.

Crowther, Fiona, Rebecca Sealey, Melissa Crowe, Andrew Edwards, et Shona Halson. 2017. « Team sport athletes' perceptions and use of recovery strategies: a mixed-methods survey study ». *BMC Sports Science, Medicine and Rehabilitation* 9: 6.

Crystal, Naomi J., David H. Townson, Summer B. Cook, et Dain P. LaRoche. 2013. « Effect of cryotherapy on muscle recovery and inflammation following a bout of damaging exercise ». *European journal of applied physiology* 113: 2577–2586.

Cuddy, John S., Walter S. Hailes, et Brent C. Ruby. 2014. « A Reduced Core to Skin Temperature Gradient, Not a Critical Core Temperature, Affects Aerobic Capacity in the Heat ». *Journal of Thermal Biology* 43: 7‑12.

Cuttell, Saul A., Victor Kiri, et Christopher Tyler. 2016. « A Comparison of 2 Practical Cooling Methods on Cycling Capacity in the Heat ». *Journal of Athletic Training* 51: 525‑32.

Daily, William M., Tinsley R. Harrison, et others. 1948. « A study of the mechanism and treatment of experimental heat pyrexia. » *American Journal of Medical Sciences* 215: 42–55.

Darwent, David, Nicole Lamond, et Drew Dawson. 2008. « The sleep and performance of train drivers during an extended freight-haul operation ». *Applied ergonomics* 39: 614–622.

Datta, Avijit, et Michael Tipton. 2006. « Respiratory responses to cold water immersion: neural pathways, interactions, and clinical consequences awake and asleep ». *Journal of Applied Physiology* 100: 2057–2064.

Davis, J. M., et S. P. Bailey. 1997. « Possible Mechanisms of Central Nervous System Fatigue during Exercise ». *Medicine and Science in Sports and Exercise* 29: 45‑57.

Davis, Scott L., Paul J. Fadel, Jian Cui, Gail D. Thomas, et Craig G. Crandall. 2006. « Skin blood flow influences near-infrared spectroscopy-derived measurements of tissue oxygenation during heat stress ». *Journal of applied physiology* 100: 221–224.

Dawson, B. 1994. « Exercise Training in Sweat Clothing in Cool Conditions to Improve Heat Tolerance ». *Sports Medicine (Auckland, N.Z.)* 17 (4): 233‑44.

De Carvalho, M. V., M. T. De Andrade, G. P. Ramos, A. Maia-Lima, E. R. Pereira, T. T. Mendes, J. C. Marins, F. T. Amorim, et E. Silami-Garcia. 2015. « The Temperature of Water Ingested Ad Libitum Does Not Influence Performance during a 40-Km Self-Paced Cycling Trial in the Heat ». *The Journal of Sports Medicine and Physical Fitness* 55: 1473‑79.

Debold, Edward P. 2012. « Recent Insights into Muscle Fatigue at the Cross-Bridge Level ». *Frontiers in Physiology* 3: 151.

Delextrat, Anne, Julio Calleja-González, Audrey Hippocrate, et Neil David Clarke. 2013. « Effects of sports massage and intermittent cold-water immersion on recovery from matches by basketball players ». *Journal of sports sciences* 31: 11–19.

Demartini, Julie K., Douglas J. Casa, Rebecca Stearns, Luke Belval, Arthur Crago, Rob Davis, et John Jardine. 2015. « Effectiveness of Cold Water Immersion in the Treatment of Exertional Heat Stroke at the Falmouth Road Race ». *Medicine and Science in Sports and Exercise* 47: 240‑45.

Dewhurst, Susan, Andrea Macaluso, Leonardo Gizzi, Francesco Felici, Dario Farina, et Giuseppe De Vito. 2010. « Effects of altered muscle temperature on neuromuscular properties in young and older women ». *European journal of applied physiology* 108: 451–458.

Dinges, David F., Frances Pack, Katherine Williams, Kelly A. Gillen, John W. Powell, Geoffrey E. Ott, Caitlin Aptowicz, et Allan I. Pack. 1997. « Cumulative Sleepiness, Mood Disturbance, and Psychomotor Vigilance Performance Decrements During a Week of Sleep Restricted to 4–5 Hours per Night ». *Sleep* 20 : 267‑77.

Drinkwater, B. L., J. F. Bedi, A. B. Loucks, S. Roche, et S. M. Horvath. 1982. « Sweating sensitivity and capacity of women in relation

to age ». *Journal of Applied Physiology* 53: 671‑76.

Drinkwater, Eric. 2008. « Effects of peripheral cooling on characteristics of local muscle ». In *Thermoregulation and Human Performance*, 53:74–88.

Du Bois, D., et E. F. Du Bois. 1989. « A formula to estimate the approximate surface area if height and weight be known. 1916. » *Nutrition* 5: 303.

Duffield, Rob. 2008. « Cooling interventions for the protection and recovery of exercise performance from exercise-induced heat stress ». In *Thermoregulation and human performance*, 53:89–103.

Duggan, Andrew. 1988. « Energy cost of stepping in protective clothing ensembles ». *Ergonomics* 31: 3–11.

Dugué, B., J. Smolander, T. Westerlund, J. Oksa, R. Nieminen, E. Moilanen, et M. Mikkelsson. 2005. « Acute and long-term effects of winter swimming and whole-body cryotherapy on plasma antioxidative capacity in healthy women ». *Scandinavian journal of clinical and laboratory investigation* 65: 395–402.

Dupuy, Olivier, Wafa Douzi, Dimitri Theurot, Laurent Bosquet, et Benoit Dugué. 2018. « An Evidence-Based Approach for Choosing Post-Exercise Recovery Techniques to Reduce Markers of Muscle Damage, Soreness, Fatigue, and Inflammation: A Systematic Review With Meta-Analysis ». *Frontiers in Physiology* 9: 403.

Ebbeling, C. B., et P. M. Clarkson. 1989. « Exercise-Induced Muscle Damage and Adaptation ». *Sports Medicine* 7: 207‑34.

Eccles, Ronald. 2000. « Role of cold receptors and menthol in thirst, the drive to breathe and arousal ». *Appetite* 34: 29–35.

Eijsvogels, T. M. H., CCWG Bongers, M. T. W. Veltmeijer, M. H. Moen, et M. Hopman. 2014. « Cooling during exercise in temperate conditions: impact on performance and thermoregulation ». *International journal of sports medicine* 35: 840–846.

Epstein, Y., et W. O. Roberts. 2011. « The pathopysiology of heat stroke: an integrative view of the final common pathway ». *Scandinavian journal of medicine & science in sports* 21: 742–748.

Fan, Jui-Lin, James D. Cotter, Rebekah A. I. Lucas, Kate Thomas, Luke Wilson, et Philip N. Ainslie. 2008. « Human Cardiorespiratory and Cerebrovascular Function during Severe Passive Hyperthermia: Effects of Mild Hypohydration ». *Journal of Applied Physiology* 105: 433‑45.

Ferreira-Junior, J. B., M. Bottaro, A. Vieira, A. F. Siqueira, C. A. Vieira, J. L. Q. Durigan, E. L. Cadore, L. G. M. Coelho, H. G. Simões, et M. G. Bemben. 2015. « One session of partial-body cryotherapy (- 110° C) improves muscle damage recovery ». *Scandinavian journal of medicine & science in sports* 25 (5).

Ferreira-Junior, J. B., M. Bottaro, C. A. Vieira, S. R. S. Soares, A. Vieira, V. A. Cleto, E. L. Cadore, D. B. Coelho, H. G. Simoes, et L. E. Brown. 2014. « Effects of partial-body cryotherapy (- 110 C) on muscle recovery between high-intensity exercise bouts ». *International journal of sports medicine* 35: 1155–1160.

Ferreira-Junior, Joao B., Martim Bottaro, Jeremy P. Loenneke, Amilton Vieira, Carlos A. Vieira, et Michael G. Bemben. 2014. « Could whole-body cryotherapy (below- 100° C) improve muscle recovery from muscle damage? » *Frontiers in physiology* 5:247.

Ferris Jr, Eugene B., M. A. Blankenhorn, Howard W. Robinson, et Glenn E. Cullen. 1938. « Heat stroke: clinical and chemical observations on 44 cases ». *Journal of Clinical Investigation* 17: 249.

Field, Tiffany, Maria Hernandez-Reif, Miguel Diego, Saul Schanberg, et Cynthia Kuhn. 2005. « Cortisol decreases and serotonin and dopamine increase following massage therapy ». *International Journal of Neuroscience* 115: 1397–1413.

Filingeri, D., D. Fournet, S. Hodder, et G. Havenith. 2015. « Mild Evaporative Cooling Applied to the Torso Provides Thermoregulatory Benefits during Running in the Heat ». *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports* 25: 200‑210.

Filingeri, Davide, Damien Fournet, Simon Hodder, et George Havenith. 2014. « Body mapping of cutaneous wetness perception across the human torso during thermo-neutral and warm environmental exposures ». *Journal of Applied Physiology* 117: 887–897.

Fitts, R. H. 1994. « Cellular Mechanisms of Muscle Fatigue ». *Physiological Reviews* 74: 49‑94.

Fonda, B., et N. Sarabon. 2013. « Effects of whole-body cryotherapy on recovery after hamstring damaging exercise: A crossover study ». *Scandinavian journal of medicine & science in sports* 23: e270–e278.

Fonda, Borut, Massimo De Nardi, et Nejc Sarabon. 2014. « Effects of whole-body cryotherapy duration on thermal and cardio-vascular response ». *Journal of thermal biology* 42: 52–55.

Fonseca, Líllian Beatriz, Ciro J. Brito, Roberto Jerônimo S. Silva, Marzo Edir Silva-Grigoletto, Walderi Monteiro da Silva, et Emerson Franchini. 2016. « Use of Cold-Water Immersion to Reduce Muscle Damage and Delayed-Onset Muscle Soreness and Preserve Muscle Power in Jiu-Jitsu Athletes ». *Journal of athletic training* 51: 540–549.

Fortune, Melanie, Cameron Mustard, et Patrick Brown. 2014. « The use of bayesian inference to inform the surveillance of temperature-

related occupational morbidity in Ontario, Canada, 2004–2010 ». *Environmental research* 132: 449–456.

Freeman, M. E., B. Kanyicska, A. Lerant, et G. Nagy. 2000. « Prolactin: Structure, Function, and Regulation of Secretion ». *Physiological Reviews* 80: 1523‑1631.

Frim, JOHN. 1989. « Head cooling is desirable but not essential for preventing heat strain in pilots. » *Aviation, space, and environmental medicine* 60: 1056–1062.

Fujii, Naoto, Yasushi Honda, Keiji Hayashi, Narihiko Kondo, Shunsaku Koga, et Takeshi Nishiyasu. 2008. « Effects of Chemoreflexes on Hyperthermic Hyperventilation and Cerebral Blood Velocity in Resting Heated Humans ». *Experimental Physiology* 93: 994‑1001.

Fullagar, Hugh HK, Rob Duffield, Sabrina Skorski, Aaron J. Coutts, Ross Julian, et Tim Meyer. 2015. « Sleep and recovery in team sport: current sleep-related issues facing professional team-sport athletes ». *International journal of sports physiology and performance* 10: 950–957.

Fullagar, Hugh HK, Sabrina Skorski, Rob Duffield, Daniel Hammes, Aaron J. Coutts, et Tim Meyer. 2015. « Sleep and athletic performance: the effects of sleep loss on exercise performance, and physiological and cognitive responses to exercise ». *Sports medicine* 45: 161–186.

Galloway, et Maughan. 1997. « Effects of Ambient Temperature on the Capacity to Perform Prolonged Cycle Exercise in Man. » *Medicine and Science in Sports and Exercise* 29: 1240‑49.

Gao, Chuansi, Kalev Kuklane, et Ingvar Holmér. 2010. « Cooling vests with phase change material packs: the effects of temperature gradient, mass and covering area ». *Ergonomics* 53: 716–723.

Girard, O., F. Brocherie, et D. J. Bishop. 2015. « Sprint Performance under Heat Stress: A Review ». *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports* 25: 79‑89.

Girard, Olivier, D. J. Bishop, et S. Racinais. 2013. « Hot Conditions Improve Power Output during Repeated Cycling Sprints without Modifying Neuromuscular Fatigue Characteristics ». *European Journal of Applied Physiology* 113: 359‑69.

Gizińska, Ma\lgorzata, Rados\law Rutkowski, Wojciech Romanowski, Jacek Lewandowski, et Anna Straburzyńska-Lupa. 2015. « Effects of whole-body cryotherapy in comparison with other physical modalities used with kinesitherapy in rheumatoid arthritis ». *BioMed research international* 2015:409174.

Glasgow, Philip D., Roisin Ferris, et Chris M. Bleakley. 2014. « Cold water immersion in the management of delayed-onset muscle soreness: Is dose important? A randomised controlled trial ». *Physical therapy in sport* 15 : 228–233.

Gold, A. J., et A. Zornitzer. 1968. « Effect of partial body cooling on man exercising in a hot, dry environment. » *Aerospace medicine* 39: 944.

Gonzalez, R. R., et A. P. Gagge. 1976. « Warm discomfort and associated thermoregulatory changes during dry, and humid-heat acclimatization. » *Israel journal of medical sciences* 12: 804.

González-Alonso, J., C. Teller, S. L. Andersen, F. B. Jensen, T. Hyldig, et B. Nielsen. 1999. « Influence of Body Temperature on the Development of Fatigue during Prolonged Exercise in the Heat ». *Journal of Applied Physiology* 86: 1032‑39.

González-Alonso, José, et José A. L. Calbet. 2003. « Reductions in Systemic and Skeletal Muscle Blood Flow and Oxygen Delivery Limit Maximal Aerobic Capacity in Humans ». *Circulation* 107: 824‑30.

González-Alonso, José, Craig G Crandall, et John M Johnson. 2008. « The cardiovascular challenge of exercising in the heat ». *The Journal of Physiology* 586: 45‑53.

González-Alonso, José, Mads K. Dalsgaard, Takuya Osada, Stefanos Volianitis, Ellen A. Dawson, Chie C. Yoshiga, et Niels H. Secher. 2004. « Brain and Central Haemodynamics and Oxygenation during Maximal Exercise in Humans ». *The Journal of Physiology* 557: 331‑42.

Goodall, Stuart, et Glyn Howatson. 2008. « The effects of multiple cold water immersions on indices of muscle damage ». *J Sports Sci Med* 7: 235–41.

Goosey-Tolfrey, Victoria, Michelle Swainson, Craig Boyd, Greg Atkinson, et Keith Tolfrey. 2008. « The effectiveness of hand cooling at reducing exercise-induced hyperthermia and improving distance-race performance in wheelchair and able-bodied athletes ». *Journal of Applied Physiology* 105: 37–43.

Grahn, Dennis A., Vinh H. Cao, et H. Craig Heller. 2005. « Heat Extraction through the Palm of One Hand Improves Aerobic Exercise Endurance in a Hot Environment ». *Journal of Applied Physiology* 99: 972‑78.

Grantham, Justin, Stephen S. Cheung, Philippe Connes, Mark A. Febbraio, Nadia Gaoua, José González-Alonso, Olivier Hue, et al. 2010. « Current knowledge on playing football in hot environments ». *Scandinavian journal of medicine & science in sports* 20: 161–167.

Gray, Stuart R., Giuseppe De Vito, Myra A. Nimmo, Dario Farina, et Richard A. Ferguson. 2006. « Skeletal Muscle ATP Turnover and Muscle Fiber Conduction Velocity Are Elevated at Higher Muscle Temperatures during Maximal Power Output Development in Humans ». *American Journal of Physiology. Regulatory,*

Integrative and Comparative Physiology 290: R376-382.

Gremion, Gérald, et Thierry Kuntzer. 2014. « Fatigueet réduction de la performance motrice chez le sportif, syndrome de surentraînement ». *Rev Med Suisse* 10: 962–5.

Gronlund, Carina J. 2014. « Racial and socioeconomic disparities in heat-related health effects and their mechanisms: a review ». *Current epidemiology reports* 1: 165–173.

Guilhem, Gaël, François Hug, Antoine Couturier, Stéphanie Regnault, Laure Bournat, Jean-Robert Filliard, et Sylvain Dorel. 2013. « Effects of air-pulsed cryotherapy on neuromuscular recovery subsequent to exercise-induced muscle damage ». *The American journal of sports medicine* 41: 1942–1951.

Guo, Jianmin, Linjin Li, Yuxiang Gong, Rong Zhu, Jiake Xu, Jun Zou, et Xi Chen. 2017. « Massage alleviates delayed onset muscle soreness after strenuous exercise: a systematic review and meta-analysis ». *Frontiers in physiology* 8: 747.

Guo, Yuming, Antonio Gasparrini, Ben Armstrong, Shanshan Li, Benjawan Tawatsupa, Aurelio Tobias, Eric Lavigne, Micheline de Sousa Zanotti Stagliorio Coelho, Michela Leone, et Xiaochuan Pan. 2014. « Global variation in the effects of ambient temperature on mortality: a systematic evaluation ». *Epidemiology* 25: 781.

Guy, Joshua H., Glen B. Deakin, Andrew M. Edwards, Catherine M. Miller, et David B. Pyne. 2015. « Adaptation to Hot Environmental Conditions: An Exploration of the Performance Basis, Procedures and Future Directions to Optimise Opportunities for Elite Athletes ». *Sports Medicine (Auckland, N.Z.)* 45: 303‑11.

Haddad, Hani Al, Jonathan Parouty, et Martin Buchheit. 2012. « Effect of daily cold water immersion on heart rate variability and subjective ratings of well-being in highly trained swimmers ». *International journal of sports physiology and performance* 7:33-8.

Hadid, A., Y. Fuks, T. Erlich, R. Yanovich, Y. Heled, N. Azriel, et D. S. Moran. 2009. « Effect of a personal ambient ventilation system on physiological strain during heat stress wearing body armour ». *ENVIRONMENTAL ERGONOMICS 104:311-9.*

Hadid, A., R. Yanovich, T. Erlich, G. Khomenok, et D. S. Moran. 2008. « Effect of a Personal Ambient Ventilation System on Physiological Strain during Heat Stress Wearing a Ballistic Vest ». *European Journal of Applied Physiology* 104: 311‑19.

Halson, Shona L., Marc J. Quod, David T. Martin, Andrew S. Gardner, Tammie R. Ebert, et Paul B. Laursen. 2008. « Physiological responses to cold water immersion following cycling in the heat ». *International journal of sports physiology and performance* 3: 331–346.

Harre, Dietrich, Dietrich Harre, et Jürgen Barsch. 2012. Principles of sports training: introduction to the theory and methods of training (translated from German), Sportverlag, Berlin.

Hasegawa, Hiroshi, Tadashi Takatori, Takashi Komura, et Masahiro Yamasaki. 2005. « Wearing a cooling jacket during exercise reduces thermal strain and improves endurance exercise performance in a warm environment. » *The Journal of Strength & Conditioning Research* 19: 122–128.

Hausswirth, Christophe, et Yann Le Meur. 2011. « Physiological and Nutritional Aspects of Post-Exercise Recovery ». *Sports Medicine* 41: 861–882.

Hausswirth, Christophe, Julien Louis, François Bieuzen, Herve Pournot, Jean Fournier, Jean-Robert Filliard, et Jeanick Brisswalter. 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: e27749.

Hausswirth, Christophe, et Iñigo Mujika. 2013. Recovery for performance in sport. *Champaign, IL: Human Kinetics.*

Hausswirth, Christophe, Karine Schaal, Yann Le Meur, François Bieuzen, Jean-Robert Filliard, Marielle Volondat, et Julien Louis. 2013. « Parasympathetic activity and blood catecholamine responses following a single partial-body cryostimulation and a whole-body cryostimulation ». *Plos one* 8:e72658.

Hayashi, Chiho, et Hiromi Tokura. 2001. « Effects of head cooling on sweat rate in exercising subjects wearing protective clothing and mask for pesticide ». *Applied Human Science* 15: 149–154.

Herrera, Esperanza, Maria C. Sandoval, Diana M. Camargo, et Tania F. Salvini. 2010. « Motor and Sensory Nerve Conduction Are Affected Differently by Ice Pack, Ice Massage, and Cold Water Immersion ». *Physical Therapy* 90: 581‑91.

Higgins, Trevor R., I. Tim Heazlewood, et Mike Climstein. 2011. « A random control trial of contrast baths and ice baths for recovery during competition in U/20 rugby union ». *The Journal of Strength & Conditioning Research* 25: 1046–1051.

Hill, Jessica, Glyn Howatson, Ken van Someren, Jonathan Leeder, et Charles Pedlar. 2014. « Compression garments and recovery from exercise-induced muscle damage: a meta-analysis ». *British journal of sports medicine* 48: 1340–1346.

Hodge, Daniel, Douglas Jones, Ricardo Martinez, et Michael J. Buono. 2013. « Time course of the attenuation of sympathetic nervous activity during active heat acclimation ». *Autonomic*

Neuroscience: Basic and Clinical 177: 101–103.

Hohenauer, Erich, Peter Clarys, Jean-Pierre Baeyens, et Ron Clijsen. 2016. « The effect of local cryotherapy on subjective and objective recovery characteristics following an exhaustive jump protocol ». *Open access journal of sports medicine* 7: 89.

Hohenauer, Erich, Jan Taeymans, Jean-Pierre Baeyens, Peter Clarys, et Ron Clijsen. 2015. « The Effect of Post-Exercise Cryotherapy on Recovery Characteristics: A Systematic Review and Meta-Analysis ». *PLOS ONE* 10: e0139028.

Hornery, D. J., S. Papalia, Inigo Mujika, et A. Hahn. 2005. « Physiological and performance benefits of halftime cooling ». *Journal of Science and Medicine in Sport* 8: 15–25.

House, James R., Heather C. Lunt, Rowan Taylor, Gemma Milligan, Jason A. Lyons, et Carol M. House. 2013. « The impact of a phase-change cooling vest on heat strain and the effect of different cooling pack melting temperatures ». *European journal of applied physiology* 113: 1223–1231.

Howatson, G, K Leeder, et K Someren van. 2016. « The BASES Expert Statement on Athletic Recovery Strategies ». *The Sport and Exercise Scientist*.48:6–7.

Howatson, Glyn, et Ken A. Van Someren. 2008. « The prevention and treatment of exercise-induced muscle damage ». *Sports medicine* 38: 483–503.

Hsu, Andrew R., Todd A. Hagobian, Kevin A. Jacobs, Hamdee Attallah, et Anne L. Friedlander. 2005. « Cohen ». *Canadian Journal of Applied Physiology = Revue Canadienne De Physiologie Appliquee* 30: 87‑104.

Ihsan, Mohammed, Greig Watson, et Chris R. Abbiss. 2016. « What Are the Physiological Mechanisms for Post-Exercise Cold Water Immersion in the Recovery from Prolonged Endurance and Intermittent Exercise? » *Sports Medicine* 46: 1095‑1109.

Ihsan, Mohammed, Greig Watson, Marcin Lipski, et Chris R. Abbiss. 2013. « Influence of Postexercise Cooling on Muscle Oxygenation and Blood Volume Changes ». *Medicine and Science in Sports and Exercise* 45: 876‑82.

James, C. A., A. J. Richardson, P. W. Watt, O. R. Gibson, et N. S. Maxwell. 2015. « Physiological Responses to Incremental Exercise in the Heat Following Internal and External Precooling ». *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports* 25: 190‑99.

Jay, Ollie, et Nathan B. Morris. 2018. « Does Cold Water or Ice Slurry Ingestion During Exercise Elicit a Net Body Cooling Effect in the Heat? » *Sports Medicine*, 1–13.

Jiang, Qingjun, Xiao Yang, Kai Liu, Bo Li, Li Li, Min Li, Shaowen Qian, Lun Zhao, Zhenyu Zhou, et Gang Sun. 2013. « Hyperthermia Impaired Human Visual Short-Term Memory: An FMRI Study ». *International Journal of Hyperthermia: The Official Journal of European Society for Hyperthermic Oncology, North American Hyperthermia Group* 29: 219‑24.

Johar, Pramod, Varun Grover, Robert Topp, et David G. Behm. 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: 314.

Johnson, John M., Christopher T. Minson, et Dean L. Kellogg. 2014. « Cutaneous vasodilator and vasoconstrictor mechanisms in temperature regulation ». *Comprehensive physiology*. 4:33-89.

Joyce, David, et Dan Lewindon. 2014. High-performance training for sports. *1 ed. Human Kinetics.*

Kaada, Birger, et Ove Torsteinb. 1989. « Increase of plasma β-endorphins in connective tissue massage ». *General Pharmacology: The Vascular System* 20: 487–489.

Kargarfard, Mehdi, Eddie TC Lam, Ardalan Shariat, Ina Shaw, Brandon S. Shaw, et Shamsul BM Tamrin. 2016. « Efficacy of massage on muscle soreness, perceived recovery, physiological restoration and physical performance in male bodybuilders ». *Journal of sports sciences* 34: 959–965.

Kay, D., F. E. Marino, J. Cannon, A. St Clair Gibson, M. I. Lambert, et T. D. Noakes. 2001. « Evidence for Neuromuscular Fatigue during High-Intensity Cycling in Warm, Humid Conditions ». *European Journal of Applied Physiology* 84: 115‑21.

Kellogg, Dean L. 2012. « Chapter 93. Thermoregulation ». In *Fitzpatrick's Dermatology in General Medicine*, édité par Lowell A. Goldsmith, Stephen I. Katz, Barbara A. Gilchrest, Amy S. Paller, David J. Leffell, et Klaus Wolff, 8e éd.

Kendall, Becky, et Roger Eston. 2002. « Exercise-Induced Muscle Damage and the Potential Protective Role of Estrogen ». *Sports Medicine* 32: 103‑23.

Kenefick, R. W., S. N. Cheuvront, L. J. Palombo, B. R. Ely, et M. N. Sawka. 2010. « Skin Temperature Modifies the Impact of Hypohydration on Aerobic Performance ». *Journal of Applied Physiology* 109: 79‑86.

Kenny, Glen P., Andrew R. Schissler, Jill Stapleton, Matthew Piamonte, Konrad Binder, Aaron Lynn, Christopher Q. Lan, et Stephen G. Hardcastle. 2011. « Ice Cooling Vest on Tolerance for Exercise under Uncompensable Heat Stress ». *Journal of Occupational and Environmental Hygiene* 8: 484‑91.

Kielblock, A. J., J. P. Van Rensburg, et R. M. Franz. 1986. « Body cooling as a method for reducing hyperthermia. An evaluation of techniques. » *South African medical journal=*

Suid-Afrikaanse tydskrif vir geneeskunde 69: 378–380.

Kissen, A. T., J. F. Hall, et F. K. Klemm. 1971. « Physiological responses to cooling the head and neck versus the trunk and leg areas in severe hyperthermic exposure. » *Aerospace medicine* 42: 882–888.

Knochel, James P. 1996. « Management of Heat Conditions ». *Athletic Therapy Today* 1: 30‑34.

Knowlton, Wendy M., Radhika Palkar, Erika K. Lippoldt, Daniel D. McCoy, Farhan Baluch, Jessica Chen, et David D. McKemy. 2013. « A sensory labeled-line for cold: TRPM8-expressing sensory neurons define the cellular basis for cold, cold pain, and cooling-mediated analgesia ». *The Journal of neuroscience : the official journal of the Society for Neuroscience* 33: 2837‑48.

Konishi, Masayuki, Hiroki Tabata, Karina Ando, Hyeon-Ki Kim, Mio Nishimaki, Mi Xiang, Shizuo Sakamoto, Shu-Fen Tsai, Yu-Hsiu Kao, et Yi-Ching Huang. 2017. « Mild Decrease in Skin Temperature Reduces the Heart Rate during Moderate Exercise ». *Journal of Sports Science* 5: 305–312.

Krüger, Malte, Markus de Marees, Karl-Heinrich Dittmar, Billy Sperlich, et Joachim Mester. 2015. « Whole-body cryotherapy's enhancement of acute recovery of running performance in well-trained athletes ». *International journal of sports physiology and performance* 10: 605–612.

Krustrup, Peter, Magni Mohr, Tommas Amstrup, Torben Rysgaard, Johnny Johansen, Aadam Steensberg, Preben K. Pedersen, et Jens Bangsbo. 2003. « The Yo-Yo Intermittent Recovery Test: Physiological Response, Reliability, and Validity ». *Medicine and Science in Sports and Exercise* 35: 697‑705.

Kwiecien, Susan Y., Malachy P. McHugh, et Glyn Howatson. 2018. « The efficacy of cooling with phase change material for the treatment of exercise-induced muscle damage: pilot study ». *Journal of sports sciences* 36: 407–413.

Kwon, Young S., Robert A. Robergs, Christine M. Mermier, Suzanne M. Schneider, et Alfred B. Gurney. 2015. « Palm cooling and heating delays fatigue during resistance exercise in women ». *The Journal of Strength & Conditioning Research* 29: 2261–2269.

L, Nybo. 2010. « CNS Fatigue Provoked by Prolonged Exercise in the Heat. » *Frontiers in Bioscience* 2: 779‑92.

LaFata, Danielle, Amanda Carlson-Phillips, Stacy T. Sims, et Elizabeth M. Russell. 2012. « The effect of a cold beverage during an exercise session combining both strength and energy systems development training on core temperature and markers of performance ». *Journal of the International Society of Sports Nutrition* 9: 44.

Lan, L., K. Tsuzuki, Y. F. Liu, et Z. W. Lian. 2017. « Thermal environment and sleep quality: A review ». *Energy and Buildings* 149: 101–113.

Larsen, BExSc. 2011. « The effect of body armor on performance, thermal stress, and exertion: a critical review ». *Military medicine* 176: 1265.

Lastella, Michele, Grace E. Vincent, Rob Duffield, Gregory D. Roach, Shona L. Halson, Luke J. Heales, et Charli Sargent. 2018. « Can Sleep Be Used as an Indicator of Overreaching and Overtraining in Athletes? » *Frontiers in Physiology* 9:436.

Laursen, P. B., G. T. Francis, C. R. Abbiss, M. J. Newton, et K. Nosaka. 2007. « Reliability of Time-to-Exhaustion versus Time-Trial Running Tests in Runners. » *Medicine and Science in Sports and Exercise* 39: 1374‑79.

Laursen, Paul B. 2016. « From science to practice: Development of a thermally-insulated ice slushy dispensing bottle that helps athletes "keep their cool" in hot temperatures ». *Temperature* 3: 187‑90.

Lautenbacher, Stefan, Bernd Kundermann, et Jürgen-Christian Krieg. 2006. « Sleep deprivation and pain perception ». *Sleep medicine reviews* 10: 357–369.

Lclboratory, Human Performance. 1978. « Effect of experimental alterations in excess weight on aerobic capacity and distance running performance ». *Medicine and science in sports* 10: 194–199.

Lee, J. K., Susan M. Shirreffs, et Ronald J. Maughan. 2008. « Cold drink ingestion improves exercise endurance capacity in the heat ». *Med Sci Sports Exerc* 40: 1637–44.

Lee, Jason K. W., Aldrich C. H. Koh, Serene X. T. Koh, Glen J. X. Liu, Amanda Q. X. Nio, et Priscilla W. P. Fan. 2014. « Neck Cooling and Cognitive Performance Following Exercise-Induced Hyperthermia ». *European Journal of Applied Physiology* 114: 375‑84..

Leeder, Jonathan, Conor Gissane, Ken van Someren, Warren Gregson, et Glyn Howatson. 2012. « Cold Water Immersion and Recovery from Strenuous Exercise: A Meta-Analysis ». *British Journal of Sports Medicine* 46: 233‑40.

Leppäluoto, J., T. Westerlund, P. Huttunen, J. Oksa, J. Smolander, B. Dugué, et M. Mikkelsson. 2008. « Effects of long-term whole-body cold exposures on plasma concentrations of ACTH, beta-endorphin, cortisol, catecholamines and cytokines in healthy females ». *Scandinavian journal of clinical and laboratory investigation* 68: 145–153.

Levy, E., Y. Hasin, G. Navon, et M. Horowitz. 1997. « Chronic heat improves mechanical and metabolic response of trained rat heart on ischemia and reperfusion ». *American Journal of Physiology-Heart and Circulatory Physiology* 272: H2085–H2094.

Li, Hailing, Qing Lu, Hongping Wang, et Lujia Li. 2017. « [Preparation and application of cooling bag for heat stroke in wild field] ». *Zhonghua Wei Zhong Bing Ji Jiu Yi Xue* 29: 479‑80.

Lombardi, Giovanni, Ewa Ziemann, et Giuseppe Banfi. 2017. « Whole-body cryotherapy in athletes: from therapy to stimulation. An updated review of the literature ». *Frontiers in physiology* 8:258.

Lubkowska, Anna, Monika Chudecka, Andrzej Klimek, Zbigniew Szygula, et Barbara Frączek. 2008. « Acute effect of a single whole-body cryostimulation on prooxidant–antioxidant balance in blood of healthy, young men ». *Journal of Thermal Biology* 33: 464‑67.

Lubkowska, Anna, Barbara Dołęgowska, et Zbigniew Szyguła. 2012. « Whole-Body Cryostimulation - Potential Beneficial Treatment for Improving Antioxidant Capacity in Healthy Men - Significance of the Number of Sessions ». *PLOS ONE* 7: e46352.

Lubkowska, Anna, Barbara Dolegowska, Zbigniew Szygula, et A Klimek. 2009. « Activity of selected enzymes in erythrocytes and level of plasma antioxidants in response to single whole-body cryostimulation in humans ». *Scandinavian journal of clinical and laboratory investigation* 69: 387‑94.

Lubkowska, Anna, et Zbigniew Szygu\la. 2010. « Changes in blood pressure with compensatory heart rate decrease and in the level of aerobic capacity in response to repeated whole-body cryostimulation in normotensive, young and physically active men ». *International journal of occupational medicine and environmental health* 23: 367–375.

Lubkowska, Anna, Zbigniew Szygu\la, Dariusz Chlubek, et Giuseppe Banfi. 2011. « The effect of prolonged whole-body cryostimulation treatment with different amounts of sessions on chosen pro-and anti-inflammatory cytokines levels in healthy men ». *Scandinavian journal of clinical and laboratory investigation* 71: 419–425.

Lundgren, Peter, Otto Henriksson, Kalev Kuklane, Ingvar Holmér, Peter Naredi, et Ulf Björnstig. 2014. « Validity and Reliability of the Cold Discomfort Scale: A Subjective Judgement Scale for the Assessment of Patient Thermal State in a Cold Environment ». *Journal of Clinical Monitoring and Computing* 28: 287‑91.

Luomala, Matti J., Juha Oksa, Jukka A. Salmi, Vesa Linnamo, Ingvar Holmér, Juhani Smolander, et Benoit Dugué. 2012. « Adding a cooling vest during cycling improves performance in warm and humid conditions ». *Journal of Thermal Biology* 37: 47‑55.

Machado, Aryane Flauzino, Paulo Henrique Ferreira, Jéssica Kirsch Micheletti, Aline Castilho de Almeida, Ítalo Ribeiro Lemes, Franciele Marques Vanderlei, Jayme Netto Junior, et Carlos Marcelo Pastre. 2016. « Can water temperature and immersion time influence the effect of cold water immersion on muscle soreness? A systematic review and meta-analysis ». *Sports Medicine* 46: 503–514.

Magazanik, A., Y. Epstein, R. Udassin, Y. Shapiro, et E. Sohar. 1980. « Tap water, an efficient method for cooling heatstroke victims–a model in dogs. » *Aviation, space, and environmental medicine* 51: 864–866.

Mairiaux, P., W. Nullens, R. Fesler, L. Brasseur, et J. M. Detry. 1977. « Evaluation of the effects of cooling clothes on the adaptation to prolonged exertion in high temperatures by miners ». *Revue de l'Institut d'hygiene des mines* 32: 99–122.

Mantoni, Teit, Bo Belhage, et Frank Christian Pott. 2006. « Survival in cold water. Physiological consequences of accidental immersion in cold water ». *Ugeskrift for laeger* 168: 3203–3205.

Marino, Frank E. 2004. « Anticipatory Regulation and Avoidance of Catastrophe during Exercise-Induced Hyperthermia ». *Comparative Biochemistry and Physiology. Part B, Biochemistry & Molecular Biology* 139: 561‑69.

Martin, Claude, Benoît Vallet, et Bruno Riou. 2017. *Physiologie humaine appliquée* (2e édition).

Martin, Peter G., Frank E. Marino, Jodie Rattey, Derek Kay, et Jack Cannon. 2005. « Reduced Voluntary Activation of Human Skeletal Muscle during Shortening and Lengthening Contractions in Whole Body Hyperthermia ». *Experimental Physiology* 90: 225‑36.

Matsuura, R., T. Arimitsu, T. Yunoki, T. Kimura, R. Yamanaka, et T. Yano. 2015. « Effects of Heat Exposure in the Absence of Hyperthermia on Power Output during Repeated Cycling Sprints ». *Biology of Sport* 32: 15‑20.

Matveev, Lev Pavlovich, et Albert P. Zdornyj. 1981. *Fundamentals of sports training*. [English translation of the revised Russian edition] Moscow: Progress Publishers.

Maw, G. J., S. H. Boutcher, et N. A. Taylor. 1993. « Ratings of Perceived Exertion and Affect in Hot and Cool Environments ». *European Journal of Applied Physiology and Occupational Physiology* 67: 174‑79.

Maw, Graeme J., Ian L. Mackenzie, et Nigel AS Taylor. 2000. « Can skin temperature manipulation, with minimal core temperature change, influence plasma volume in resting humans? » *European journal of applied physiology* 81: 159–162.

McDermott, Brendon P., Douglas J. Casa, Matthew S. Ganio, Rebecca M. Lopez, Susan W. Yeargin, Lawrence E. Armstrong, et Carl M. Maresh. 2009. « Acute whole-body cooling for exercise-induced hyperthermia: a

systematic review ». *Journal of athletic training* 44: 84–93.

McFarlin, Brian K., Andrea L. Henning, Adam S. Venable, Randall R. Williams, et Jill N. Best Sampson. 2016. « A shirt containing multistage phase change material and active cooling components was associated with increased exercise capacity in a hot, humid environment ». *Ergonomics* 59: 1019‑25.

McLellan, T. M. 1998. « Sex-Related Differences in Thermoregulatory Responses While Wearing Protective Clothing ». *European Journal of Applied Physiology and Occupational Physiology* 78: 28‑37.

Meeusen, R., et B. Roelands. 2010. « Central Fatigue and Neurotransmitters, Can Thermoregulation Be Manipulated? » *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports* 20: 19‑28.

Merrick, Mark A., JAMES M. Rankin, FRED A. Andres, et CHANNING L. Hinman. 1999. « A preliminary examination of cryotherapy and secondary injury in skeletal muscle. » *Medicine and science in sports and exercise* 31: 1516–1521.

Merskey, Harold, et Frank G. Spear. 1967. « The concept of pain ». *Journal of Psychosomatic Research* 11: 59–67.

Middelkoop Huub a. M., Hilten Bob J., Kramer Cor G. S., et Kamphuisen Hilbert a. C. 1993. « Actigraphically recorded motor activity and immobility across sleep cycles and stages in healthy male subjects ». *Journal of Sleep Research* 2: 28‑33.

Mila-Kierzenkowska, C., A. Wozniak, B. Wozniak, G. Drewa, A. Rakowski, A. Jurecka, et R. Rajewski. 2009. « Whole-body cryostimulation in kayaker women: a study of the effect of cryogenic temperatures on oxidative stress after the exercise ». *Journal of Sports Medicine and Physical Fitness* 49: 201.

Miles, M. P., et P. M. Clarkson. 1994. « Exercise-induced muscle pain, soreness, and cramps. » *The Journal of sports medicine and physical fitness* 34: 203–216.

Miller, E., J. Kostka, T. W\lodarczyk, et B. Dugue. 2016. « Whole-body cryostimulation (cryotherapy) provides benefits for fatigue and functional status in multiple sclerosis patients. A case–control study ». *Acta Neurologica Scandinavica* 134:420-426.

Minett, Geoffrey M., Rob Duffield, Frank E. Marino, et Marc Portus. 2011. « Volume-dependent response of precooling for intermittent-sprint exercise in the heat ». *Medicine and science in sports and exercise* 43: 1760–1769.

Minniti, Antoinette, Christopher J. Tyler, et Caroline Sunderland. 2011. « Effects of a cooling collar on affect, ratings of perceived exertion, and running performance in the heat ». *European Journal of Sport Science* 11: 419‑29.

Mitchell, J. B., B. K. McFarlin, et J. P. Dugas. 2003. « The Effect of Pre-Exercise Cooling on High Intensity Running Performance in the Heat ». *International Journal of Sports Medicine* 24: 118‑24.

Miwa, Hiroyasu, Shin-ichiro Sasahara, et Toshihiro Matsui. 2007. « Roll-over detection and sleep quality measurement using a wearable sensor ». In *Engineering in Medicine and Biology Society, 2007. EMBS 2007. 29th Annual International Conference of the IEEE*, 1507–1510.

Miyazawa, Taiki, Masahiro Horiuchi, Hidehiko Komine, Jun Sugawara, Paul J. Fadel, et Shigehiko Ogoh. 2013. « Skin blood flow influences cerebral oxygenation measured by near-infrared spectroscopy during dynamic exercise ». *European journal of applied physiology* 113: 2841.

Morris, Nathan B., Anthony R. Bain, Matthew N. Cramer, et Ollie Jay. 2014. « Evidence that transient changes in sudomotor output with cold and warm fluid ingestion are independently modulated by abdominal, but not oral thermoreceptors ». *Journal of applied physiology* 116: 1088–1095.

Morris, Nathan B., et Ollie Jay. 2016. To drink or to pour: How should athletes use water to cool themselves*? Temperature (Austin)* 3:191-194.

Morrison, Shawnda A., Gordon G. Sleivert, J. Patrick Neary, et Stephen S. Cheung. 2009. « Prefrontal Cortex Oxygenation Is Preserved and Does Not Contribute to Impaired Neuromuscular Activation during Passive Hyperthermia ». *Applied Physiology, Nutrition, and Metabolism* 34: 66‑74.

Morrison, Shawnda, Gordon G. Sleivert, et Stephen S. Cheung. 2004. « Passive Hyperthermia Reduces Voluntary Activation and Isometric Force Production ». *European Journal of Applied Physiology* 91: 729‑36.

Mortensen, Stefan P., Ellen A. Dawson, Chie C. Yoshiga, Mads K. Dalsgaard, Rasmus Damsgaard, Niels H. Secher, et José González-Alonso. 2005. « Limitations to systemic and locomotor limb muscle oxygen delivery and uptake during maximal exercise in humans ». *The Journal of physiology* 566: 273–285.

Mourot, Laurent, Malika Bouhaddi, Emmanuel Gandelin, Sylvie Cappelle, Gilles Dumoulin, Jean-Pierre Wolf, Jean Denis Rouillon, et Jacques Regnard. 2008. « Cardiovascular autonomic control during short-term thermoneutral and cool head-out immersion ». *Aviation, space, and environmental medicine* 79: 14–20.

Mündel, Toby, Sabrina J. Bunn, Paula L. Hooper, et David A. Jones. 2007. « The Effects of Face Cooling during Hyperthermic Exercise in Man: Evidence for an Integrated Thermal, Neuroendocrine and Behavioural Response ». *Experimental Physiology* 92: 187‑95.

Mündel, Toby, et David A. Jones. 2010. « The Effects of Swilling an l(−)-Menthol Solution during Exercise in the Heat ». *European Journal of Applied Physiology* 109: 59‑65.

Mündel, Toby, Jenny King, Esther Collacott, et David A. Jones. 2006. « Drink Temperature Influences Fluid Intake and Endurance Capacity in Men during Exercise in a Hot, Dry Environment ». *Experimental Physiology* 91: 925‑33.

Murray, Andrew, et Marco Cardinale. 2015. « Cold applications for recovery in adolescent athletes: a systematic review and meta analysis ». *Extreme physiology & medicine* 4: 17.

Nadel, E. R., K. B. Pandolf, M. F. Roberts, et J. A. Stolwijk. 1974. « Mechanisms of thermal acclimation to exercise and heat. » *Journal of Applied Physiology* 37: 515–520.

Nakamura, Mayumi, Hidenori Esaki, Tamae Yoda, Saki Yasuhara, Akiko Kobayashi, Aki Konishi, Naoki Osawa, Kei Nagashima, Larry I. Crawshaw, et Kazuyuki Kanosue. 2006. « A new system for the analysis of thermal judgments: multipoint measurements of skin temperatures and temperature-related sensations and their joint visualization ». *The Journal of Physiological Sciences* 56: 459–464.

Nakamura, Mayumi, Tamae Yoda, Larry I. Crawshaw, Momoko Kasuga, Yuki Uchida, Ken Tokizawa, Kei Nagashima, et Kazuyuki Kanosue. 2013. « Relative importance of different surface regions for thermal comfort in humans ». *European journal of applied physiology* 113: 63–76.

Nakamura, Mayumi, Tamae Yoda, Larry I. Crawshaw, Saki Yasuhara, Yasuyo Saito, Momoko Kasuga, Kei Nagashima, et Kazuyuki Kanosue. 2008. « Regional differences in temperature sensation and thermal comfort in humans ». *Journal of Applied Physiology* 105 : 1897–1906.

Nédélec, Mathieu, Alan McCall, Chris Carling, Franck Legall, Serge Berthoin, et Gregory Dupont. 2013. « Recovery in Soccer ». *Sports medicine* 43: 9–22.

Nelson, Michael D., Mark J. Haykowsky, Michael K. Stickland, Luis A. Altamirano-Diaz, Christopher K. Willie, Kurt J. Smith, Stewart R. Petersen, et Philip N. Ainslie. 2011. « Reductions in Cerebral Blood Flow during Passive Heat Stress in Humans: Partitioning the Mechanisms ». *The Journal of Physiology* 589: 4053‑64.

Nielsen, B., J. R. Hales, S. Strange, N. J. Christensen, J. Warberg, et B. Saltin. 1993. « Human Circulatory and Thermoregulatory Adaptations with Heat Acclimation and Exercise in a Hot, Dry Environment ». *The Journal of Physiology* 460: 467‑85.

Nielsen, B., T. Hyldig, F. Bidstrup, J. González-Alonso, et G. R. Christoffersen. 2001. « Brain Activity and Fatigue during Prolonged Exercise in the Heat ». *Pflugers Archiv: European Journal of Physiology* 442: 41‑48.

Nielsen, Bodil, et Lars Nybo. 2003. « Cerebral Changes during Exercise in the Heat ». *Sports Medicine* 33: 1‑11.

Nishihara, Naoe, Shin-ichi Tanabe, Hirofumi Hayama, et Masayoshi Komatsu. 2002. « A cooling vest for working comfortably in a moderately hot environment ». *Journal of physiological anthropology and applied human science* 21: 75–82.

Nunneley, S. A., D. C. Reader, et R. J. Maldonado. 1982. « Head-Temperature Effects on Physiology, Comfort, and Performance during Hyperthermia ». *Aviation, Space, and Environmental Medicine* 53: 623‑28.

Nunneley, Sarah A. 1970. « Water Cooled Garments: A Review ». *Space Life Sciences* 2 (3): 335‑60.

Nunneley, Sarah Ann, S. J. Troutman Jr, et P. Webb. 1971. « Head cooling in work and heat stress. » *Aerospace medicine* 42: 64–68.

Nybo, L., T. Jensen, B. Nielsen, et J. González-Alonso. 2001. « Effects of Marked Hyperthermia with and without Dehydration on VO(2) Kinetics during Intense Exercise ». *Journal of Applied Physiology* 90: 1057‑64.

Nybo, L., et B. Nielsen. 2001. « Middle Cerebral Artery Blood Velocity Is Reduced with Hyperthermia during Prolonged Exercise in Humans ». *The Journal of Physiology* 534: 279‑86.

Nybo, Lars. 2007. « Exercise and Heat Stress: Cerebral Challenges and Consequences ». *Progress in Brain Research* 162: 29‑43.

———. 2008. « Hyperthermia and Fatigue ». *Journal of Applied Physiology (Bethesda, Md.: 1985)* 104: 871‑78.

Nybo, Lars, Mads K Dalsgaard, Adam Steensberg, Kirsten Møller, et Niels H Secher. 2005. « Cerebral ammonia uptake and accumulation during prolonged exercise in humans ». *The Journal of Physiology* 563: 285‑90.

Nybo, Lars, Peter Rasmussen, et Michael N. Sawka. 2014. « Performance in the Heat-Physiological Factors of Importance for Hyperthermia-Induced Fatigue ». *Comprehensive Physiology* 4: 657‑89.

Nye, Emma A., Jessica R. Edler, Lindsey E. Eberman, et Kenneth E. Games. 2016. « Optimizing cold-water immersion for exercise-induced hyperthermia: an evidence-based paper ». *Journal of athletic training* 51: 500–501.

O'Connor, Patrick J., Michael J. Breus, et Shawn D. Youngstedt. 1998. « Exercise-induced increase in core temperature does not disrupt a behavioral measure of sleep ». *Physiology & behavior* 64: 213–217.

O'Connor, Robert E. 2006. « Exercise-induced hyponatremia: causes, risks, prevention, and

management ». *Cleveland Clinic journal of medicine* 73: S13.

Ogoh, Shigehiko, Philip N. Ainslie, et Tadayoshi Miyamoto. 2009. « Onset Responses of Ventilation and Cerebral Blood Flow to Hypercapnia in Humans: Rest and Exercise ». *Journal of Applied Physiology* 106: 880‑86.

Olschewski, H., et K. Brück. 1988. « Thermoregulatory, Cardiovascular, and Muscular Factors Related to Exercise after Precooling ». *Journal of Applied Physiology* 64: 803‑11.

Parkin, J. M., M. F. Carey, S. Zhao, et M. A. Febbraio. 1999. « Effect of Ambient Temperature on Human Skeletal Muscle Metabolism during Fatiguing Submaximal Exercise ». *Journal of Applied Physiology* 86: 902‑8.

Parsons, K. C. 2006. *Human Thermal Environments: The Effects of Hot, Moderate, and Cold Environments on Human Health, Comfort, and Performance*. London; New York: Taylor & Francis. 3rd edn. New York: CRC Press.

Paschalis, Vassilis, Michalis G. Nikolaidis, Giannis Giakas, Athanasios Z. Jamurtas, Emmanuel O. Owolabi, et Yiannis Koutedakis. 2008. « Position sense and reaction angle after eccentric exercise: the repeated bout effect ». *European journal of applied physiology* 103: 9–18.

Patel, Tejesh, Yozo Ishiuji, et Gil Yosipovitch. 2007. « Menthol: a refreshing look at this ancient compound ». *Journal of the American Academy of Dermatology* 57: 873–878.

Paulsen, Gøran, Ulla Ramer Mikkelsen, Truls Raastad, et Jonathan M. Peake. 2012. « Leucocytes, cytokines and satellite cells: what role do they play in muscle damage and regeneration following eccentric exercise? » *Exercise immunology review* 18: 42–97.

Peake, Jonathan, Kazunori Ken Nosaka, et Katsuhiko Suzuki. 2005. « Characterization of inflammatory responses to eccentric exercise in humans ». 11: 64- 85.

Pearcey, Gregory EP, David J. Bradbury-Squires, Jon-Erik Kawamoto, Eric J. Drinkwater, David G. Behm, et Duane C. Button. 2015. « Foam rolling for delayed-onset muscle soreness and recovery of dynamic performance measures ». *Journal of athletic training* 50: 5–13.

Peiffer, Jeremiah J., Chris Richard Abbiss, Greig Watson, Kazunori Nosaka, et P. B. Laursen. 2010. « Effect of a 5-min cold-water immersion recovery on exercise performance in the heat ». *British journal of sports medicine* 44: 461–465.

Pejovic, Slobodanka, Maria Basta, Alexandros N. Vgontzas, Ilia Kritikou, Michele L. Shaffer, Marina Tsaoussoglou, David Stiffler, Zacharias Stefanakis, Edward O. Bixler, et George P. Chrousos. 2013. « Effects of recovery sleep after one work week of mild sleep restriction on interleukin-6 and cortisol secretion and daytime sleepiness and performance ». *American Journal of Physiology-Endocrinology and Metabolism* 305: E890‑96.

Périard, J. D., et S. Racinais. 2015. « Heat Stress Exacerbates the Reduction in Middle Cerebral Artery Blood Velocity during Prolonged Self-Paced Exercise ». *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports* 25: 135‑44.

Périard, J. D., S. Racinais, et M. N. Sawka. 2015. « Adaptations and Mechanisms of Human Heat Acclimation: Applications for Competitive Athletes and Sports ». *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports* 25: 20‑38.

Périard, Julien D., Corinne Caillaud, et Martin W. Thompson. 2011. « Central and Peripheral Fatigue during Passive and Exercise-Induced Hyperthermia ». *Medicine and Science in Sports and Exercise* 43: 1657‑65.

Périard, Julien D., Sébastien Racinais, Wade L. Knez, Christopher P. Herrera, Ryan J. Christian, et Olivier Girard. 2014. « Thermal, Physiological and Perceptual Strain Mediate Alterations in Match-Play Tennis under Heat Stress ». *Br J Sports Med* 48: i32‑38.

Périard, Julien D., Sébastien Racinais, Toomas Timpka, Örjan Dahlström, Armin Spreco, Jenny Jacobsson, Victor Bargoria, Karin Halje, et Juan-Manuel Alonso. 2016. « Strategies and Factors Associated with Preparing for Competing in the Heat: A Cohort Study at the 2015 IAAF World Athletics Championships ». *Br J Sports Med* 51:264-270.

Périard, Julien D., Martin W. Thompson, Corinne Caillaud, et Valentina Quaresima. 2013. « Influence of Heat Stress and Exercise Intensity on Vastus Lateralis Muscle and Prefrontal Cortex Oxygenation ». *European Journal of Applied Physiology* 113: 211‑22.

Petrofsky, Jerrold S., Iman Akef Khowailed, Haneul Lee, Lee Berk, Gurinder S. Bains, Siddhesh Akerkar, Jinal Shah, Fuad Al-Dabbak, et Mike S. Laymon. 2015. « Cold Vs. Heat After Exercise-Is There a Clear Winner for Muscle Soreness ». *Journal of Strength and Conditioning Research* 29: 3245‑52.

Pitsiladis, Y. P., et R. J. Maughan. 1999. « The Effects of Exercise and Diet Manipulation on the Capacity to Perform Prolonged Exercise in the Heat and in the Cold in Trained Humans ». *The Journal of Physiology* 517: 919‑30.

Pointon, Monique, Rob Duffield, Jack Cannon, et Frank E. Marino. 2011. « Cold application for neuromuscular recovery following intense lower-body exercise ». *European journal of applied physiology* 111: 2977–2986.

Poppendieck, Wigand, Oliver Faude, Melissa Wegmann, et Tim Meyer. 2013. « Cooling

and performance recovery of trained athletes: a meta-analytical review ». *International journal of sports physiology and performance* 8: 227–242.

Pournot, Hervé, François Bieuzen, Julien Louis, Jean-Robert Fillard, Etienne Barbiche, et Christophe Hausswirth. 2011. « Time-Course of Changes in Inflammatory Response after Whole-Body Cryotherapy Multi Exposures following Severe Exercise ». *PLOS ONE* 6: e22748.

Powers, Scott K., et Malcolm J. Jackson. 2008. « Exercise-Induced Oxidative Stress: Cellular Mechanisms and Impact on Muscle Force Production ». *Physiological Reviews* 88: 1243‑76. https://doi.org/10.1152/physrev.00031.2007.

Proulx, Carolyn I., Michel B. Ducharme, et Glen P. Kenny. 2003. « c ». *Journal of Applied Physiology* 94: 1317–1323.

Pump, Bettina, Makoto Shiraishi, Anders Gabrielsen, Peter Bie, Niels Juel Christensen, et Peter Norsk. 2001. « Cardiovascular effects of static carotid baroreceptor stimulation during water immersion in humans ». *American Journal of Physiology* 280: H2607–H2615.

Racinais, S., J. M. Alonso, A. J. Coutts, A. D. Flouris, O. Girard, J. González-Alonso, C. Hausswirth, et al. 2015. « Consensus Recommendations on Training and Competing in the Heat ». *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports* 25: 6‑19.

Racinais, S., N. Gaoua, et J. Grantham. 2008. « Hyperthermia Impairs Short-Term Memory and Peripheral Motor Drive Transmission ». *The Journal of Physiology* 586: 4751‑62.

Rasmussen, P., H. Stie, B. Nielsen, et L. Nybo. 2006. « Enhanced Cerebral CO2 Reactivity during Strenuous Exercise in Man ». *European Journal of Applied Physiology* 96: 299‑304.

Rasmussen, P., H. Stie, L. Nybo, et B. Nielsen. 2004. « Heat induced fatigue and changes of the EEG is not related to reduced perfusion of the brain during prolonged exercise in humans ». *Journal of Thermal Biology*, International Thermal Physiology Symposium: Physiology and Pharmacology of Temperature Regulation, 29: 731‑37.

Reilly, Thomas, et Ben Edwards. 2007. « Altered sleep–wake cycles and physical performance in athletes ». *Physiology & behavior* 90: 274–284.

Roberts, Llion A., Makii Muthalib, Jamie Stanley, Glen Lichtwark, Kazunori Nosaka, Jeff S. Coombes, et Jonathan M. Peake. 2015. « Effects of cold water immersion and active recovery on hemodynamics and recovery of muscle strength following resistance exercise ». *American Journal of Physiology-Regulatory, Integrative and Comparative Physiology* 309: R389–R398.

Roberts, Llion A., Truls Raastad, James F. Markworth, Vandre C. Figueiredo, Ingrid M. Egner, Anthony Shield, David Cameron-Smith, Jeff S. Coombes, et Jonathan M. Peake. 2015. « Post-exercise cold water immersion attenuates acute anabolic signalling and long-term adaptations in muscle to strength training ». *The Journal of physiology* 593: 4285–4301.

Robertson, Caroline V., et Frank E. Marino. 2017. « Cerebral Responses to Exercise and the Influence of Heat Stress in Human Fatigue ». *Journal of Thermal Biology* 63: 10‑15.

Rollo, Ian, Clyde Williams, Nicholas Gant, et Maria Nute. 2008. « The influence of carbohydrate mouth rinse on self-selected speeds during a 30-min treadmill run ». *International journal of sport nutrition and exercise metabolism* 18: 585–600.

Rose, Catriona, Kate M. Edwards, Jason Siegler, Kenneth Graham, et Corinne Caillaud. 2017. « Whole-body Cryotherapy as a Recovery Technique after Exercise: A Review of the Literature ». *International journal of sports medicine*. 38:1049-1060.

Rowell, Loring B. 1986. *Human Circulation: Regulation During Physical Stress*. New York: Oxford University Press, 1986, pp. 213–286.

Rowsell, Greg J., Aaron J. Coutts, Peter Reaburn, et Stephen Hill-Haas. 2011. « Effect of post-match cold-water immersion on subsequent match running performance in junior soccer players during tournament play ». *Journal of sports sciences* 29: 1–6.

Ruddock, Alan, Brent Robbins, Garry Tew, Liam Bourke, et Alison Purvis. 2017. « Practical Cooling Strategies During Continuous Exercise in Hot Environments: A Systematic Review and Meta-Analysis ». *Sports Medicine* 47: 517‑32.

Russell, Mark, Jack Birch, Thomas Love, Christian J. Cook, Richard M. Bracken, Tom Taylor, Eamon Swift, Emma Cockburn, Charlie Finn, et Daniel Cunningham. 2017. « The effects of a single whole-body cryotherapy exposure on physiological, performance, and perceptual responses of professional academy soccer players after repeated sprint exercise ». *The Journal of Strength & Conditioning Research* 31: 415–421.

Rymaszewska, Joanna, et David Ramsey. 2008. « Whole body cryotherapy as a novel adjuvant therapy for depression and anxiety. » *Archives of Psychiatry & Psychotherapy* 2:49–57.

Rymaszewska, Joanna, Adam Tulczynski, Zdzislaw Zagrobelny, Andrzej Kiejna, et Tomasz Hadrys. 2003. « Influence of whole body cryotherapy on depressive symptoms–preliminary report ». *Acta Neuropsychiatrica* 15: 122–128.

Sadeh, Avi. 2011. « The role and validity of actigraphy in sleep medicine: an update ». *Sleep medicine reviews* 15: 259–267.

Sadeh, Avi, et Christine Acebo. 2002. « The role of actigraphy in sleep medicine ». *Sleep medicine reviews* 6: 113–124.

Sadeh, Avi, Peter J. Hauri, Daniel F. Kripke, et Peretz Lavie. 1995. « The Role of Actigraphy in the Evaluation of Sleep Disorders ». *Sleep* 18: 288‑302.

Samuels, Charles. 2009. « Sleep, recovery, and performance: the new frontier in high-performance athletics ». *Physical medicine and rehabilitation clinics of North America* 20: 149–159.

Saunders, AG, J P Dugas, Ross Tucker, Mike Lambert, et Timothy Noakes. 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: 241‑55.

Savic, Miroslav, Borut Fonda, et Nejc Sarabon. 2013. « Actual temperature during and thermal response after whole-body cryotherapy in cryo-cabin ». *Journal of Thermal Biology 38:186-191.*

Sawka, Michael N., Samuel N. Cheuvront, et Robert W. Kenefick. 2012. « High Skin Temperature and Hypohydration Impair Aerobic Performance ». *Experimental Physiology* 97 (3): 327‑32.

Sawka, Michael N., Lisa R. Leon, Scott J. Montain, et Larry A. Sonna. 2011. « Integrated Physiological Mechanisms of Exercise Performance, Adaptation, and Maladaptation to Heat Stress ». *Comprehensive Physiology* 1: 1883‑1928.

Schaal, Karine, Yann Le Meur, François Bieuzen, Odile Petit, Philippe Hellard, Jean-François Toussaint, et Christophe Hausswirth. 2012. « Effect of recovery mode on postexercise vagal reactivation in elite synchronized swimmers ». *Applied physiology, nutrition, and metabolism* 38:126-33.

Schaal, Karine, Yann LE Meur, Julien Louis, Jean-Robert Filliard, Philippe Hellard, Gretchen Casazza, et Christophe Hausswirth. 2015. « Whole-Body Cryostimulation Limits Overreaching in Elite Synchronized Swimmers ». *Medicine and Science in Sports and Exercise* 47:1416–1425.

Schlader, Zachary J., Shona E. Simmons, Stephen R. Stannard, et Toby Mündel. 2011a. « Skin temperature as a thermal controller of exercise intensity ». *European journal of applied physiology* 111: 1631–1639.

———. 2011b. « The independent roles of temperature and thermal perception in the control of human thermoregulatory behavior ». *Physiology & Behavior* 103: 217‑24.

Schmit, Cyril, Christophe Hausswirth, Yann Le Meur, et Rob Duffield. 2016. « Cognitive Functioning and Heat Strain: Performance Responses and Protective Strategies ». *Sports Medicine* 47:1289-1302.

Schulze, Emiel, Hein AM Daanen, Koen Levels, Julia R. Casadio, Daniel J. Plews, Andrew E. Kilding, Rodney Siegel, et Paul B. Laursen. 2015. « Effect of thermal state and thermal comfort on cycling performance in the heat ». *International journal of sports physiology and performance* 10: 655–663.

Selfe, James, Jill Alexander, Joseph T. Costello, Karen May, Nigel Garratt, Stephen Atkins, Stephanie Dillon, et al. 2014. « The effect of three different (-135 C) whole body cryotherapy exposure durations on elite rugby league players ». *PLoS One* 9: e86420.

Shvartz, E. 1970. « Effect of a cooling hood on physiological responses to work in a hot environment ». *Journal of applied physiology* 29: 36–39.

Shvartz, E., D. Benor, et others. 1971. « Total body cooling in warm environments. » *Journal of applied physiology* 31: 24–7.

Shvartz, Esar. 1975. « The application of conductive cooling to human operators ». *Human factors* 17: 438–445.

Shvartz, ESAR. 1976. « Effect of neck versus chest cooling on responses to work in heat ». *Journal of applied physiology* 40: 668–672.

Smith, Cody R., Cory L. Butts, J.d. Adams, Matthew A. Tucker, Nicole E. Moyen, Matthew S. Ganio, et Brendon P. McDermott. 2017. « Effect of a Cooling Kit on Physiology and Performance Following Exercise in the Heat ». *Journal of Sport Rehabilitation* 1‑6.

Smolander, Juhani, Kalev Kuklane, Désirée Gavhed, H\a akan Nilsson, et Ingvar Holmér. 2004. « Effectiveness of a light-weight ice-vest for body cooling while wearing fire fighter's protective clothing in the heat ». *International journal of occupational safety and ergonomics* 10: 111–117.

Smolander, Juhani, Marja Mikkelsson, Juha Oksa, Tarja Westerlund, Juhani Leppäluoto, et Pirkko Huttunen. 2004. « Thermal sensation and comfort in women exposed repeatedly to whole-body cryotherapy and winter swimming in ice-cold water ». *Physiology & behavior* 82:691-5.

Snipe, Rhiannon MJ, et Ricardo JS Costa. 2018. « Does the temperature of water ingested during exertional-heat stress influence gastrointestinal injury, symptoms, and systemic inflammatory profile? » *Journal of Science and Medicine in Sport* 21:771-776.

Spencer, Matt, David Bishop, Brian Dawson, et Carmel Goodman. 2005. « Physiological and Metabolic Responses of Repeated-Sprint Activities:Specific to Field-Based Team Sports ». *Sports Medicine* 35: 1025‑44.

Spiegel, R. 1982. « Sleep and Sleeplessness in Advanced Age (Advances in Sleep Research, Vol 5). New York, SP Medical and Scientific

Books, 1981, 272 Pp ». *Annals of Neurology* 12: 190‑190.

Stanek, Agata, Armand Cholewka, Jolanta Gadula, Zofia Drzazga, Aleksander Sieron, et Karolina Sieron-Stoltny. 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* 2015:404259

Stanek, Agata, Grzegorz Cielar, Joanna Strzelczyk, S\lawomir Kasperczyk, Karolina Sieroñ-Stoltny, Andrzej Wiczkowski, Ewa Birkner, et Aleksander Sieroñ. 2010. « Influence of Cryogenic Temperatures on Inflammatory Markers in Patients with Ankylosing Spondylitis. » *Polish Journal of Environmental Studies* 19:167–175.

Stanley, Jamie, Martin Buchheit, et Jonathan M. Peake. 2012. « The effect of post-exercise hydrotherapy on subsequent exercise performance and heart rate variability ». *European journal of applied physiology* 12(3):951–61.

Stanley, Jamie, Jonathan M. Peake, Jeff S. Coombes, et Martin Buchheit. 2014. « Central and peripheral adjustments during high-intensity exercise following cold water immersion ». *European journal of applied physiology* 114: 147–163.

Stevens, C. J., B. Thoseby, D. V. Sculley, R. Callister, L. Taylor, et B. J. Dascombe. 2016. « Running Performance and Thermal Sensation in the Heat Are Improved with Menthol Mouth Rinse but Not Ice Slurry Ingestion ». *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports* 26: 1209‑16.

Stevens, Christopher J, Kyle JM Bennett, Dean V. Sculley, Robin Callister, Lee Taylor, et Ben J. Dascombe. 2017. « A comparison of mixed-method cooling interventions on pre-loaded running performance in the heat. » *The Journal of Strength & Conditioning Research* 31:620-9.

Stevens, Christopher J., Aden Kittel, Dean V. Sculley, Robin Callister, Lee Taylor, et Ben J. Dascombe. 2017. « Running performance in the heat is improved by similar magnitude with pre-exercise cold-water immersion and mid-exercise facial water spray ». *Journal of Sports Sciences* 35: 798‑805.

Stevens, Christopher J., Lee Taylor, et Ben J. Dascombe. 2017. « Cooling During Exercise: An Overlooked Strategy for Enhancing Endurance Performance in the Heat ». *Sports Medicine* 47: 829‑41.

Stevens, Christopher John, Ben Dascombe, Andriy Boyko, Dean Sculley, et Robin Callister. 2013. « Ice slurry ingestion during cycling improves Olympic distance triathlon performance in the heat ». *Journal of Sports Sciences* 31: 1271‑79.

Stocks, J. M., M. J. Patterson, D. E. Hyde, A. B. Jenkins, K. D. Mittleman, et N. A. S. Taylor. 2004. « Effects of immersion water temperature on whole-body fluid distribution in humans ». *Acta Physiologica* 182: 3–10.

Strydom, N. B., A. J. S. Benade, et WH VAN DERWALT. 1972. The performance of the improved microclimate suit. Chamber of mines research reports No 32/72. Chamber of mines of South Africa. Johannesburg, South Africa.

Sunderland, Caroline, Ryan Stevens, Bethan Everson, et Christopher J. Tyler. 2015. « Neck-cooling improves repeated sprint performance in the heat ». *Frontiers in physiology* 6:314.

Szygula, Zbigniew, Anna Lubkowska, Czes\law Giemza, Anna Skrzek, Iwona Bryczkowska, et Barbara Do\lęgowska. 2014. « Hematological parameters, and hematopoietic growth factors: EPO and IL-3 in response to whole-body cryostimulation (WBC) in military academy students ». *PloS one* 9: e93096.

Taylor, Nigel AS, Christiano A. Machado-Moreira, Anne MJ van den Heuvel, et Joanne N. Caldwell. 2014. « Hands and feet: physiological insulators, radiators and evaporators ». *European journal of applied physiology* 114: 2037–2060.

Taylor, Sheila R., Geoffrey G. Rogers, et Helen S. Driver. 1997. « Effects of Training Volume on Sleep, Psychological, and Selected Physiological Profiles of Elite Female Swimmers ». *Medicine & Science in Sports & Exercise* 29: 688.

Teunissen, L. P. J., A. de Haan, J. J. de Koning, et H. a. M. Daanen. 2013. « Effects of Wind Application on Thermal Perception and Self-Paced Performance ». *European Journal of Applied Physiology* 113: 1705‑17.

Thomas, Melissa M., Stephen S. Cheung, Geoff C. Elder, et Gordon G. Sleivert. 2006. « Voluntary Muscle Activation Is Impaired by Core Temperature Rather than Local Muscle Temperature ». *Journal of Applied Physiology* 100: 1361‑69.

Tipton, M. J. 1989. « The initial responses to cold-water immersion in man ». *Clinical Science* 77: 581–588.

Toner, M. M., M. N. Sawka, et K. B. Pandolf. 1984. « Thermal Responses during Arm and Leg and Combined Arm-Leg Exercise in Water ». *Journal of Applied Physiology* 56: 1355‑60.

Travis, S. P. 1988. « Management of heat stroke. » *Journal of the Royal Naval Medical Service* 74: 39.

Trinity, Joel D., Matthew D. Pahnke, Joshua F. Lee, et Edward F. Coyle. 2010. « Interaction of hyperthermia and heart rate on stroke volume during prolonged exercise ». *Journal of Applied Physiology* 109: 745–751.

Trong, Than Tran, Florence Riera, Kévin Rinaldi, Walid Briki, et Olivier Hue. 2015. « Ingestion of a cold temperature/menthol beverage increases outdoor exercise performance in a hot, humid environment ». *PloS one* 10: e0123815.

Tseng, Ching-Yu, Jo-Ping Lee, Yung-Shen Tsai, Shin-Da Lee, Chung-Lan Kao, Te-Chih Liu, Cheng-Hsiu Lai, M. Brennan Harris, et Chia-Hua Kuo. 2013. « Topical Cooling (Icing) Delays Recovery From Eccentric Exercise–Induced Muscle Damage ». *The Journal of Strength & Conditioning Research* 27: 1354–1361.

Tsuji, Bun, Keiji Hayashi, Narihiko Kondo, et Takeshi Nishiyasu. 2016. « Characteristics of Hyperthermia-Induced Hyperventilation in Humans ». *Temperature (Austin)* 3: 146‑60.

Tsuji, Bun, Yasushi Honda, Naoto Fujii, Narihiko Kondo, et Takeshi Nishiyasu. 2012. « Comparison of Hyperthermic Hyperventilation during Passive Heating and Prolonged Light and Moderate Exercise in the Heat ». *Journal of Applied Physiology* 113: 1388‑97.

Tsuji, Bun, Yasushi Honda, Yusuke Ikebe, Naoto Fujii, Narihiko Kondo, et Takeshi Nishiyasu. 2015. « Voluntary Suppression of Hyperthermia-Induced Hyperventilation Mitigates the Reduction in Cerebral Blood Flow Velocity during Exercise in the Heat ». *American Journal of Physiology. Regulatory, Integrative and Comparative Physiology* 308: R669-679.

Tucker, Ross, Laurie Rauch, Yolande X. R. Harley, et Timothy D. Noakes. 2004. « Impaired Exercise Performance in the Heat Is Associated with an Anticipatory Reduction in Skeletal Muscle Recruitment ». *Pflugers Archiv: European Journal of Physiology* 448: 422‑30.

Tulder, Maurits van, Andrea Furlan, Claire Bombardier, Lex Bouter, et the Editorial Board of the Cochrane Collaboration Back Review Group. 2003. « Updated Method Guidelines for Systematic Reviews in the Cochrane Collaboration Back Review Group ». *Spine* 28: 1290.

Tyler, Christopher James, et Caroline Sunderland. 2011a. « Cooling the Neck Region During Exercise in the Heat ». *Journal of Athletic Training* 46: 61‑68.

———. 2011b. « Neck Cooling and Running Performance in the Heat: Single versus Repeated Application ». *Medicine & Science in Sports & Exercise* 43: 2388‑95.

Tyler, Christopher James, Caroline Sunderland, et Stephen S. Cheung. 2015. « The Effect of Cooling Prior to and during Exercise on Exercise Performance and Capacity in the Heat: A Meta-Analysis ». *Br J Sports Med* 49: 7‑13.

Tyler, Christopher James, Perry Wild, et Caroline Sunderland. 2010. « Practical Neck Cooling and Time-Trial Running Performance in a Hot Environment ». *European Journal of Applied Physiology* 110: 1063‑74.

Vaile, J., C. O'Hagan, B. Stefanovic, M. Walker, N. Gill, et C. D. Askew. 2011. « Effect of Cold Water Immersion on Repeated Cycling Performance and Limb Blood Flow ». *British Journal of Sports Medicine* 45: 825‑29.

Vaile, Joanna, Shona Halson, Nicholas Gill, et Brian Dawson. 2008. « Effect of cold water immersion on repeat cycling performance and thermoregulation in the heat ». *Journal of sports sciences* 26: 431–440.

Veltmeijer, Matthijs TW, Thijs MH Eijsvogels, Dick HJ Thijssen, et Maria TE Hopman. 2015. « Incidence and predictors of exertional hyperthermia after a 15-km road race in cool environmental conditions ». *Journal of science and medicine in sport* 18: 333–337.

Vernieuw, Carrie R., Lou A. Stephenson, et Margaret A. Kolka. 2007. « Thermal comfort and sensation in men wearing a cooling system controlled by skin temperature ». *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society* 49: 1033–1044.

Versey, Nathan G., Shona L. Halson, et Brian T. Dawson. 2013. « Water immersion recovery for athletes: effect on exercise performance and practical recommendations ». *Sports medicine* 43: 1101–1130.

Vieira, A., A. B. Oliveira, J. R. Costa, E. Herrera, et T. F. Salvini. 2013. « Cold modalities with different thermodynamic properties have similar effects on muscular performance and activation ». *International journal of sports medicine* 34: 873–880.

Vieira, Amilton, Martim Bottaro, Joao B. Ferreira-Junior, Carlos Vieira, Vitor A. Cleto, Eduardo L. Cadore, Herbert G. Simões, Jake Do Carmo, et Lee E. Brown. 2015. « Does whole-body cryotherapy improve vertical jump recovery following a high-intensity exercise bout? » *Open access journal of sports medicine* 6:49-54.

incent, Grace, Brad Aisbett, Sarah J Hall, et Sally Ferguson. 2016. « Sleep quantity and quality is not compromised during planned burn shifts of less than 12 h ». *Chronobiology International* 33:657-66.

Wakabayashi, Hitoshi, Koichi Kaneda, Daisuke Sato, Yutaka Tochihara, et Takeo Nomura. 2008. « Effect of non-uniform skin temperature on thermoregulatory response during water immersion ». *European journal of applied physiology* 104: 175–181.

Wang, David, Keith K. Wong, George C. Dungan, Peter R. Buchanan, Brendon J. Yee, et Ronald R. Grunstein. 2008. « The Validity of Wrist Actimetry Assessment of Sleep With and Without Sleep Apnea ». *Journal of Clinical Sleep Medicine : JCSM : official*

publication of the American Academy of Sleep Medicine 4: 450‑55.

Warren, Courtney D., David J. Szymanski, et Merrill R. Landers. 2015. « Effects of Three Recovery Protocols on Range of Motion, Heart Rate, Rating of Perceived Exertion, and Blood Lactate in Baseball Pitchers During a Simulated Game ». *The Journal of Strength & Conditioning Research* 29: 3016–3025.

Watson, H. R., R. Hems, D. G. Rowsell, et D. J. Spring. 1978. « New compounds with the menthol cooling effect ». *J. Soc. Cosmet. Chem* 29: 200.

Watson, Phillip, Hiroshi Hasegawa, Bart Roelands, Maria Francesca Piacentini, Roel Looverie, et Romain Meeusen. 2005. « Acute Dopamine/Noradrenaline Reuptake Inhibition Enhances Human Exercise Performance in Warm, but Not Temperate Conditions ». *The Journal of Physiology* 565: 873‑83.

Webborn, Nick, Michael J. Price, Paul Castle, et VICTORIA L. Goosey-Tolfrey. 2010. « Cooling strategies improve intermittent sprint performance in the heat of athletes with tetraplegia ». *British journal of sports medicine* 44: 455–460.

Wegmann, Melissa, Oliver Faude, Wigand Poppendieck, Anne Hecksteden, Michael Fröhlich, et Tim Meyer. 2012. « Pre-cooling and sports performance ». *Sports Medicine* 42: 545–564.

Weiner, J. S., et M. Khogali. 1980. « A physiological body-cooling unit for treatment of heat stroke ». *The Lancet* 315: 507–509.

Wendt, Daniël, Luc J. C. van Loon, et Wouter D. van Marken Lichtenbelt. 2007. « Thermoregulation during Exercise in the Heat: Strategies for Maintaining Health and Performance ». *Sports Medicine* 37: 669‑82.

West, Amy D., Matthew B. Cooke, Paul M. LaBounty, Allyn G. Byars, et Mike Greenwood. 2014. « Effects of G-trainer, cycle ergometry, and stretching on physiological and psychological recovery from endurance exercise ». *The Journal of Strength & Conditioning Research* 28: 3453–3461.

Westerlund, Tarja. 2009. *Thermal, circulatory, and neuromuscular responses to whole-body cryotherapy*. [Ph.D. thesis]. Finland: Oulu University.

Westerlund, Tarja, Arja Uusitalo, Juhani Smolander, et Marja Mikkelsson. 2006. « Heart rate variability in women exposed to very cold air (- 110 C) during whole-body cryotherapy ». *Journal of Thermal Biology 31:342-346.*

Wexler, Randell K. 2002. « Evaluation and treatment of heat-related illnesses ». *American family physician* 65: 2307–2313.

White, Gillian E., et Greg D. Wells. 2013. « Cold-water immersion and other forms of cryotherapy: physiological changes potentially affecting recovery from high-intensity exercise ». *Extreme physiology & medicine* 2: 26.

Wilcock, Ian, John Cronin, et Wayne Hing. 2006. «Physiological response to water immersion» *Sport Med* 36**:**747–765.

Williams, P. A., et R. D. Kilgour. 1993. « Cardiovascular responses to facial cooling during low and moderate intensity exercise ». *European journal of applied physiology and occupational physiology* 67: 53–58.

Wilson, Thad E., Jian Cui, Rong Zhang, et Craig G. Crandall. 2006. « Heat Stress Reduces Cerebral Blood Velocity and Markedly Impairs Orthostatic Tolerance in Humans ». *American Journal of Physiology. Regulatory, Integrative and Comparative Physiology* 291: R1443-1448.

Wozniak, Alina, Bartosz Wozniak, Gerard Drewa, Celestyna Mila-Kierzenkowska, et Andrzej Rakowski. 2007. « The effect of whole-body cryostimulation on lysosomal enzyme activity in kayakers during training ». *European journal of applied physiology* 100: 137–142.

Xiang, Jianjun, Alana Hansen, Dino Pisaniello, et Peng Bi. 2016. « Workers' Perceptions of Climate Change Related Extreme Heat Exposure in South Australia: A Cross-Sectional Survey ». *BMC Public Health* 16: 549.

Yablonskiy, D. A., J. J. Ackerman, et M. E. Raichle. 2000. « Coupling between Changes in Human Brain Temperature and Oxidative Metabolism during Prolonged Visual Stimulation ». *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 97: 7603‑8.

Yamane, Motoi, Hiroyasu Teruya, Masataka Nakano, Ryuji Ogai, Norikazu Ohnishi, et Mitsuo Kosaka. 2006. « Post-exercise leg and forearm flexor muscle cooling in humans attenuates endurance and resistance training effects on muscle performance and on circulatory adaptation ». *European journal of applied physiology* 96: 572–580.

Yanagisawa, Osamu, Hiroki Kudo, Nobuyuki Takahashi, et Hiroshi Yoshioka. 2004. « Magnetic Resonance Imaging Evaluation of Cooling on Blood Flow and Oedema in Skeletal Muscles after Exercise ». *European Journal of Applied Physiology* 91: 737‑40.

Yanagisawa, Osamu, Mamoru Niitsu, Hiroshi Yoshioka, Kazushige Goto, Hiroki Kudo, et Yuji Itai. 2003. « The use of magnetic resonance imaging to evaluate the effects of cooling on skeletal muscle after strenuous exercise ». *European journal of applied physiology* 89: 53–62.

Yazdi, Motahareh Mokhtari, et Mohammad Sheikhzadeh. 2014. « Personal cooling garments: a review ». *The Journal of The Textile Institute* 105: 1231‑50.

Yeargin, Susan W., Douglas J. Casa, Joseph M. McClung, J. Chad Knight, Julie C. Healey, P.

Josh Goss, William R. Harvard, et George R. Hipp. 2006. « Body cooling between two bouts of exercise in the heat enhances subsequent performance. » *The Journal of Strength & Conditioning Research* 20: 383–389.

Yeung, Simon S., Kin Hung Ting, Maurice Hon, Natalie Y. Fung, Manfi M. Choi, Juno C. Cheng, et Ella W. Yeung. 2016. « Effects of cold water immersion on muscle oxygenation during repeated bouts of fatiguing exercise: a randomized controlled study ». *Medicine* 95:e2455

Yin, Jifu, YouFei Zheng, RongJun Wu, Jianguo Tan, DianXiu Ye, et Wei Wang. 2011. « An analysis of influential factors on outdoor thermal comfort in summer ». *International journal of biometeorology* 56: 941‑48.

Young, Andrew J., Michael N. Sawka, Yoram Epstein, Barry DeCristofano, et Kent B. Pandolf. 1987. « Cooling different body surfaces during upper and lower body exercise ». *Journal of Applied Physiology* 63: 1218–1223.

Zalewski, Pawel, Anna Bitner, Joanna S\lomko, Justyna Szrajda, Jacek J. Klawe, Malgorzata Tafil-Klawe, et Julia L. Newton. 2014. « Whole-body cryostimulation increases parasympathetic outflow and decreases core body temperature ». *Journal of thermal biology* 45: 75–80.

Zalewski, Pawel, Katarzyna Buszko, Monika Zawadka-Kunikowska, Joanna S\lomko, Justyna Szrajda, Jacek J. Klawe, Malgorzata Tafil-Klawe, Maciej Sinski, et Julia Newton. 2014. « Cardiovascular and autonomic responses to whole-body cryostimulation in essential hypertension ». *Cryobiology* 69: 249–255.

Zalewski, Pawel, Jacek J. Klawe, Joanna Pawlak, Malgorzata Tafil-Klawe, et Julia Newton. 2013. « Thermal and hemodynamic response to whole-body cryostimulation in healthy subjects ». *Cryobiology* 66: 295–302.

Zhang, Yang, Jon-Kyle Davis, Douglas J. Casa, et Phillip A. Bishop. 2015. *Optimizing Cold Water Immersion for Exercise-Induced Hyperthermia: A Meta-analysis.* 47:2464-72

Ziemann, Ewa, Robert A. Olek, Tomasz Grzywacz, Jan J. Kaczor, Jędrzej Antosiewicz, Wojciech Skrobot, Sylwester Kujach, et Rados\law Laskowski. 2014. « Whole-body cryostimulation as an effective way of reducing exercise-induced inflammation and blood cholesterol in young men ». *European cytokine network* 25: 14–23.

Ziemann, Ewa, Robert Antoni Olek, Sylwester Kujach, Tomasz Grzywacz, Jędrzej Antosiewicz, Tomasz Garsztka, et Rados\law Laskowski. 2012. « Five-day whole-body cryostimulation, blood inflammatory markers, and performance in high-ranking professional tennis players ». *Journal of Athletic Training* 47: 664–672.