



HAL
open science

Développement d'une nouvelle technologie de cryothérapie Corps Entier

Romain Bouzigon

► **To cite this version:**

Romain Bouzigon. Développement d'une nouvelle technologie de cryothérapie Corps Entier. Ingénierie biomédicale. Université de Franche-Comté, 2016. Français. NNT : 2016BESA2055 . tel-01656733

HAL Id: tel-01656733

<https://theses.hal.science/tel-01656733>

Submitted on 6 Dec 2017

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

UNIVERSITE DE FRANCHE-COMTE

Ecole Doctorale Environnement – Santé

THESE

En vue de l'obtention du grade de

DOCTEUR EN SCIENCES DU SPORT

DEVELOPPEMENT D'UNE NOUVELLE TECHNOLOGIE DE CRYOTHERAPIE CORPS ENTIER

Présentée et soutenue publiquement à Besançon le 5 décembre 2016

Par **Romain BOUZIGON**

Membres du jury :

M ^{me} Claire TOURNY,	Professeur des Universités, Université de Rouen (Rapporteur)
M ^r William BERTUCCI,	Maître de Conférences HDR, Université de Reims (Rapporteur)
M ^r Frédéric GRAPPE,	Maître de Conférences HDR Université de Franche-Comté (Directeur)
M ^r Benoît DUGUE,	Professeur des Universités, Université de Poitiers (Directeur)
M ^r Alain GROSLAMBERT,	Professeur des Universités, Université de Franche-Comté (Examineur)
M ^r Gilles RAVIER,	Maître de Conférences Université de Franche-Comté (Examineur)
M ^r Samuel QUENIART,	Kinésithérapeute et ostéopathe, Gérant Cryantal (Invité)

Une citation de Léonard DE VINCI (1452-1519), homme d'esprit et véritable génie, illustre l'accomplissement de cette thèse avec harmonie :

« Tout obstacle renforce la détermination. Celui qui s'est fixé un but n'en change pas. »

REMERCIEMENTS

L'expérience engrangée au cours de cette thèse est, à l'image de mon entourage familial, amical et professionnel, à la fois très riche et très solide. Je n'aurais jamais pu aller au bout sans une détermination sans faille, et cette détermination, c'est à vous tous que je la dois.

Mes premiers remerciements vont à Fred GRAPPE, qui a su me faire confiance tout au long de ces années. Merci Fred pour tes enseignements très riches dans de multiples domaines. Merci de m'avoir permis de débiter et de mener à bien ce projet. Merci enfin pour la patience dont tu as su faire preuve et pour ta grande disponibilité.

Je voudrais également remercier le Pr. Benoit DUGUE, pour avoir accepté de co-encadrer ce travail de thèse. Votre grande expertise du domaine de la cryothérapie corps entier a été incontournable dans le développement de mes connaissances. Merci de m'avoir enseigné la rigueur scientifique et de m'avoir fait découvrir les rouages de ce milieu. Je vous remercie également pour votre patience et votre disponibilité.

Je souhaite remercier également Gilles RAVIER, sans qui ce travail de thèse n'aurait pas eu lieu. Merci Gilles de m'avoir fait confiance lors de mon Master 2, de m'avoir permis de commencer cette aventure et d'avoir été présent tout au long de cette thèse. Merci pour la richesse des enseignements que tu m'as apporté sur le papier comme sur le terrain. J'espère que nous aurons l'occasion de pouvoir continuer à travailler ensemble.

J'adresse mes remerciements au Pr. Gilles FERREOL pour m'avoir accueilli au sein de l'équipe C3S et pour m'avoir permis d'effectuer ces années de thèse. Merci Mr. FERREOL pour vos enseignements et pour la formation dispensée par le laboratoire C3S à travers les nombreux séminaires, colloques et conférences multidisciplinaires fort intéressants.

Merci à l'ensemble du personnel du laboratoire C3S, et notamment à Annick ROUSSEAUX, toujours présente, disponible, et qui apporte la bonne humeur.

J'adresse également mes remerciements au Pr. Laurent BOSQUET pour avoir accepté la codirection au sein du laboratoire MOVE de la Faculté des Sports de Poitiers.

J'adresse ma reconnaissance et un remerciement particulier aux rapporteurs de cette soutenance de thèse et membres du jury, le Pr. Claire TOURNY, le Dr. William BERTUCCI et le Pr. Alain GROSLAMBERT. Leur présence en ce jour si particulier est pour moi un grand honneur.

Merci à Ahlem ARFAOUI et à Benoit JARLOT, du laboratoire GRESPI de Reims, qui m'ont apporté des connaissances et des compétences en thermorégulation et en imagerie thermique. J'en profite pour te souhaiter plein de bonheur Ahlem, dans ta petite famille qui vient tout juste de s'agrandir.

Je tiens maintenant à remercier Samuel QUENIART, gérant de l'entreprise Cryantal, pour m'avoir permis de vivre cette aventure. Sam, ces années n'ont pas toujours été facile pour Cryantal, mais ton énergie et ta détermination sont un exemple pour nous tous. Tu es la pierre angulaire de ce projet. Merci pour la confiance dont tu fais preuve à mon égard.

Un grand merci à Jean GRATACOS, bien plus qu'un collègue, un ami. Merci Jean, de m'avoir enseigné la patience et le flegme indispensables à l'accomplissement de ce travail. Merci de toujours avoir été disponible pour moi. Je suis fier de pouvoir vivre cette aventure avec toi.

Merci également à toutes les personnes de l'équipe Cryantal, et plus particulièrement à Cécile et Julien, avec qui le travail est un plaisir au quotidien.

Merci à mes collègues, actuels et anciens, de l'UPFR Sports de Besançon, Johan, Claire, Anthony, Théo, Alex, Kevin et à beaucoup d'autres. Je vous souhaite à tous une très bonne continuation.

Je remercie les formateurs de mon cursus Universitaire qui m'ont inculqué les connaissances indispensables à la réussite de cette thèse : Les Pr. Jean Denis ROUILLON, Nicolas TORDI, Alain GROSLAMBERT et Pascal LAURANT, les Dr. Laurent MOUROT et Fabienne MOUGIN-GUILLAUME.

Ces remerciements ne pourraient pas être complets sans nommer mes collègues et grands amis Julien PINOT et Arnaud MENETRIER. Je vous remercie de m'avoir ouvert la voie et de m'avoir montré que cela était possible. Vous avez été (et êtes encore) pour moi une grande source d'inspiration et de motivation. J'éprouve beaucoup de respect, les copains, pour vos travaux respectifs.

Je n'aurais pas assez de lignes pour pouvoir remercier tous mes amis et pour décrire tout ce qu'ils m'ont apporté. J'ai appris avec chacun d'entre vous, et cet entourage solide m'a permis de garder la motivation suffisante à l'aboutissement de ce travail. Un grand merci à tous.

J'ai une attention particulière pour mes amis Jessica et Julien, qui m'ont permis de garder le cap pendant certaines périodes difficiles de cette thèse. Je les remercie également pour ma magnifique petite filleule Lena qui est née cette année.

Je remercie également Nicolas et Francis pour la grande période pleine d'émotion que j'ai eu la chance de vivre en leur compagnie.

L'ensemble de ce travail n'aurait pas été possible sans le soutien inébranlable de mes colocataires Rémy et Thibault, merci les copains d'avoir toujours été présents dans les bons moments comme dans les pires.

Je souhaite également, et surtout, remercier du fond du cœur toute ma famille. Merci infiniment à mes parents à qui je dois tout et sans qui je ne serais pas la personne que je suis devenue aujourd'hui. Merci pour tout ce que vous avez fait pour moi. J'ai vraiment beaucoup de chance de vous avoir. Le sens du travail que vous m'avez inculqué est à la base de la réussite de cet objectif. Merci à ma sœur Laurie et à mon frère Teddy. En tant que grand frère, je suis fier de voir ce que vous êtes et ce que vous devenez. Une attention particulière pour Romain qui rend ma sœur heureuse et grâce à qui elle va faire naître deux magnifiques petits neveux ou nièces très prochainement.

Enfin, j'ai une attention toute particulière pour ma moitié, Alizée, qui m'a permis de garder la tête sur les épaules et qui m'a donné chaque jour énormément de courage pour accomplir cet objectif.

RESUME

Cette thèse a été effectuée sous le couvert d'une convention CIFRE issue d'une collaboration entre la Société Cryantal (Lognes, France) et les laboratoires universitaires C3S (EA 4660) et MOVE (EA 6314) de Franche-Comté et de Poitiers. Elle a été articulée autour du développement d'une nouvelle technologie de chambre de Cryothérapie Corps Entier (CCE). Le travail mené au cours de ces quatre années a eu pour objectifs :

- 1) L'identification des besoins technologiques et méthodologiques à partir d'études conduites sur le terrain et de l'analyse de la littérature scientifique ;
- 2) Le développement d'un prototype de chambre CCE à partir des besoins identifiés ;
- 3) La validation technologique du prototype en vue de son industrialisation ;
- 4) D'apporter des perspectives d'évolutions futures pour le développement du prototype afin qu'il devienne une chambre CEE commercialisable.

Afin de répondre à ces objectifs, la thèse a été divisée en deux parties distinctes.

La première partie met en évidence les applications pratiques et les besoins technologiques afin d'identifier les limites et avantages des différentes méthodes et techniques utilisées en vue du développement d'un nouveau prototype de chambre CCE. Les études conduites sur le terrain dans les conditions réelles de compétition ont montré que la CCE n'était pas vécue comme une contrainte importante par les athlètes et qu'elle leur permettait d'améliorer la qualité de leur sommeil perçu. Nous avons également montré que des individus avec un indice de masse corporel moins élevé supportaient moins bien les expositions au froid extrême en cabine comparé à ceux possédant un indice de masse corporel plus important.

La revue de littérature scientifique a mis en évidence le manque crucial de données valides concernant les températures d'exposition dans les chambres et cabines. Elle pointe également pour la première fois, l'ensemble des protocoles d'expositions utilisés à ce jour dans les domaines d'applications relatifs aux pathologies traumatiques et de récupération physique. Elle crée le lien indispensable entre les différents domaines d'utilisation de la CCE et les différentes technologies utilisées.

La seconde partie expose l'ensemble du développement technologique du prototype de la nouvelle chambre CCE, sa validation et son optimisation pour pouvoir prétendre à sa commercialisation. Elle comporte une étude scientifique de validation technologique du prototype de chambre de CCE basé sur la variation de la température cutanée des individus

exposés. Les résultats ont montré que les variations de température cutanée engendrées par l'exposition avec la nouvelle technologie étaient similaires aux variations rapportées avec les autres technologies existantes.

Les mesures préliminaires réalisées sur le prototype ont permis d'apporter des perspectives d'évolutions futures en vue de la commercialisation de la chambre.

Mots-clés : Cryothérapie, cryostimulation, corps entier, corps partiel, récupération, douleur, perception, développement technologique, mesures thermiques, température cutanée, athlètes de haut niveau, compétitions.

ABSTRACT

This thesis has been completed as part of a CIFRE agreement between the research and development department of the Cryantal Company (Lognes, France) and the C3S (EA4660) and MOVE (EA6314) laboratories from the Universities of Franche-Comté and Poitiers.

The aim of the thesis was the development of a new technology of whole-body Cryotherapy (WBC) chamber. The various studies that we conducted centred on:

- the identification of technological and methodological requirements from field studies and the analysis of scientific literature;
- the development of a WBC chamber prototype according to the identified requirements;
- the technological validation of the prototype to its industrialization; and
- the evolution of the prototype toward a marketable version.

The thesis was divided into two parts.

The first part highlights the practical applications and the technological requirements to identify the limits and the advantages of the existing methodologies and technologies in order to develop a new WBC chamber device. Studies performed in the field during competitions showed that WBC is well tolerated by athletes and can be used during heavy competition periods and/or during training periods. We also demonstrated that female athletes with lower body-mass indexes seem to be much more sensitive to cold than female athletes with higher body-mass indexes.

The literature review reported a lack of data concerning the actual temperature inside the WBC chamber and cabin. The lack of methodological information for the exposure protocol was also pointed out. It creates the link between the field of application of the WBC and the different technology used.

The second part presents the technological development of the new WBC chamber prototype, its validation, and its optimisation in order to be commercialized. This part includes a validation study of the prototype based on the effects of a 3-minute exposure on the skin temperature decrease of exposed individuals. The results showed a similar decrease to those observed with other WBC existing technologies. This is certainly due to the homogeneity of the temperature

of exposure and the new technology developed. Preliminary measurements of the prototype allowed for the prospect of the commercialization of this new WBC chamber.

Keywords: Cryotherapy, cryostimulation, whole-body, partial-body, recovery, pain, perception, technological development, thermal measurements, skin temperature, high-level athletes, competitions.

TABLE DES MATIERES

REMERCIEMENTS	5
RESUME	9
ABSTRACT	11
TABLE DES MATIERES	13
LISTE DES PUBLICATIONS.....	16
LISTE DES ABREVIATIONS	19
LISTE DES FIGURES	20
LISTE DES TABLEAUX	22
EQUATIONS.....	22
INTRODUCTION GENERALE	23
CADRE DE TRAVAIL.....	25
INTRODUCTION	26
1. Contexte	26
2. La société Cryantal	29
a) De la prestation à la fabrication	29
b) Création du département Recherche et Développement	30
3. Déroulement de la thèse et structuration du manuscrit	31
PARTIE I : APPLICATIONS PRATIQUES ET BESOINS TECHNOLOGIQUES.....	35
CHAPITRE 1 : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE.....	37
1. Histoire de l'utilisation du froid depuis l'Antiquité	37
a) Antiquité (-3000 av JC à 476)	37
b) Moyen – Age (476 à 1492)	38
c) Epoque Moderne (1492 à 1789)	38
d) Epoque Contemporaine (1789 – 1896)	39
e) Ere actuelle (1896 à nos jours).....	40
2. Les méthodes de cryothérapies locales et corps entier	40
a) Les méthodes de cryothérapie locale	40
b) Les méthodes de cryothérapies corps entier et corps partiel par immersion en eau froide	42
c) Les méthodes de cryothérapie ou cryostimulation corps entier et corps partiel	43
3. Mécanismes d'action de la cryothérapie corps entier	45
a) Les mécanismes de thermorégulation chez l'Homme	45
b) Les acteurs de la thermorégulation	47
c) Effets de l'exposition au froid extrême	49
4. Effets de la cryothérapie corps entier	49
a) Influence de la cryothérapie corps entier sur la capacité antioxydante	49

b)	Influence de la cryothérapie corps entier sur les syndromes inflammatoires	50
c)	Influence de la cryothérapie corps entier sur le système nerveux autonome	51
d)	Influence de la cryothérapie corps entier sur l'activité du système immunologique	53
e)	Influence de la cryothérapie corps entier sur les fonctions cardiopulmonaires	53
f)	Influence de la cryothérapie corps entier sur les états d'anxiété et de dépression.....	53
g)	Influence de la cryothérapie corps entier sur les douleurs musculaires post exercices	54
h)	Influence de la cryothérapie corps entier au niveau hématologique chez le sportif	55
i)	Influence de la cryothérapie corps entier sur la performance sportive	55
CHAPITRE 2 : PRESTATIONS ET ETUDES REALISEES EN COMPETITIONS SPORTIVES.....		57
1.	<i>Prestations réalisées au cours de la thèse.....</i>	<i>57</i>
a)	Introduction	57
b)	Méthodes utilisées.....	59
2.	<i>Prestations réalisées avec les équipes de France de basketball homme et femme</i>	<i>61</i>
a)	Etude 1 : Résumé	62
b)	Etude 2 : Résumé	78
3.	<i>Prestations réalisées avec deux équipes cyclistes professionnelle et l'équipe de France de skicross. 80</i>	<i>80</i>
CHAPITRE 3 : IDENTIFICATION DES BESOINS TECHNOLOGIQUES ET METHODOLOGIQUES.....		85
1.	<i>Contexte</i>	<i>85</i>
2.	<i>Revue de littérature sur l'identification des besoins technologiques et des méthodes d'applications de la cryothérapie corps entier.....</i>	<i>85</i>
DISCUSSION		103
CONCLUSION		106
PARTIE 2 : DEVELOPPEMENT ET VALIDATION D'UNE NOUVELLE CHAMBRE DE CRYOTHERAPIE CORPS ENTIER		107
CHAPITRE 1 : DEVELOPPEMENT D'UN PROTOTYPE DE CHAMBRE DE CRYOTHERAPIE CORPS ENTIER.....		109
1.	<i>Identification des besoins technologiques</i>	<i>109</i>
a)	Freins technologiques	109
b)	Freins économiques	111
2.	<i>Solutions technologiques en réponses aux besoins envisagés</i>	<i>111</i>
3.	<i>Développement du prototype de la nouvelle chambre de CCE</i>	<i>112</i>
a)	Fonctionnement général des dispositifs de cryothérapie à l'azote	112
b)	Les différentes étapes du développement de la nouvelle chambre de CCE	114
c)	Le froid « ventilé » ou froid « éolien »	116
4.	<i>Description du prototype de chambre de CCE Cryantal</i>	<i>117</i>
a)	Groupe froid et échangeur.....	117
b)	Compartiments à refroidir	118
c)	Alimentation	120
d)	Mobilité.....	120
e)	Fiche technique de la chambre	120
CHAPITRE 2 : ETUDE DE VALIDATION TECHNOLOGIQUE DU PROTOTYPE DE CHAMBRE DE CCE		125

1. Démarrage de la chambre et premiers relevés de température d'exposition.....	125
2. Collaboration avec l'Université de Champagne Ardennes	127
3. Etude de validation technologique du prototype	128
CHAPITRE 3 : PERSPECTIVES D'EVOLUTION DE LA CHAMBRE DE CRYOTHERAPIE CORPS ENTIER.....	155
1. Développement d'une cryothérapie corps entier intelligente	155
2. Certificat de Conformité Européenne Médical	155
3. Accessoires	157
4. Mise en place de formation de cryothérapeute	157
DISCUSSION	159
CONCLUSION GENERALE	161
BIBLIOGRAPHIE	167
ANNEXES.....	177
1. Dossier de demande de devis réalisé avec le service d'activités industrielles et commerciales de l'Université de Franche-Comté.....	178
2. Liste et suivi des documents du système qualité.....	184
3. Version en cours d'élaboration du rapport d'évaluation clinique nécessaire à la demande de marquage CE de la chambre.....	186
4. Communication orale Séminaire « Jeunes chercheurs » C3S. L'image dans la recherche. Besançon, 27 mars 2013.....	218
5. Communication orale Colloque « 3 ^{ème} journée Gilles COMETTI / La préparation physique : Du laboratoire au terrain », Dijon, 12 et 13 avril 2013.	226
6. Communication orale 15 ^{ème} Congrès de l'ACAPS, Grenoble, 31 octobre 2013.....	227
7. Dossier de proposition de prestation envoyés aux équipes sportives.	229

LISTE DES PUBLICATIONS

Publications portant sur la thématique de thèse

Bouzigon R, Ravier G, Grappe F, Dugue B. Thermal sensations during a partial-body cryostimulation exposure in international-level athletes. Submitted to International Journal of Human Kinetics.

Bouzigon R, Grappe F, Ravier G, Dugue B. Whole- and partial-body cryostimulation/cryotherapy: Current technologies and practical applications. Journal of Thermal Biology 61, p 67-81, 2016.

Bouzigon R, Arfaoui Ahlem, Ravier G, Jarlot B, Dugue B, Grappe F. Validation of a new whole-body cryotherapy chamber based on forced convection. Submitted to Journal of Thermal Biology.

Publication issue d'une communication orale

Bouzigon R, Ravier G, Dugue B, Grappe F. The use of whole-body cryostimulation to improve the quality of sleep in athletes during high level standard competitions. British Journal of Sport Medicine, 48, p 572, 2014.

Communications orales

Bouzigon R, Ravier G, Dugue B, Grappe F. Cryostimulation Corps Complet et tolérance au froid : marge de sécurité et différences interindividuelles. Congrès ACAPS. Grenoble, 31 octobre 2013.

Bouzigon R, Ravier G, Dugue B, Grappe F. Cryostimulation Corps Complet et qualité du sommeil : Etude au sein de l'équipe de France de Basketball Féminine. Séminaire « Jeunes chercheurs » C3S. Froid et récupération. Besançon, 5 juin 2013.

Bouzigon R, Ravier G, Dugue B, Grappe F. Cryostimulation Corps Complet et tolérance au froid : marge de sécurité et différences interindividuelles. Congrès médical Roland Garros. Orly, 25 mai 2013.

Bouzigon R, Ravier G, Dugue B, Grappe F. Cryostimulation Corps Entier et confort thermique : étude préliminaire. Colloque 3^{ème} journée Gilles Cometti. La préparation physique : du laboratoire au terrain. Dijon, 12-13 avril 2013.

Bouzigon R. De l'immersion en eau froide à la cryothérapie : Histoire de la représentation du froid. Séminaire « Jeunes chercheurs » C3S. L'image dans la recherche. Besançon, 27 mars 2013.

Communications affichées :

Bouzigon R, Ravier G, Dugue B, Grappe F. The use of whole-body cryostimulation to improve the quality of sleep in athletes during high level standard competitions. Prevention of Injury and Illness in Sport. IOC World Conference. Monaco, 12 avril 2014.

Actes de séminaires

Bouzigon R, Ravier G, Dugue B, Grappe F. Cryostimulation Corps Complet et qualité du sommeil : Etude au sein de l'équipe de France de Basketball Féminine. in Tuillon-Démesy A et Ferréol G (sous la coord. de). Froid et récupération. Actes du séminaire « Jeunes chercheurs » C3S, 2013.

Bouzigon R. De l'immersion en eau froide à la cryothérapie : Histoire de la représentation du froid. in Tuillon-Démesy A et Ferréol G (sous la coord. de). Actes du séminaire « Jeunes chercheurs » C3S, 2013.

Durant cette thèse, plusieurs travaux portant sur d'autres thématiques proches ont conduit à la production de plusieurs travaux scientifiques.

Publications

Bouzigon R, Ravier G, Paulin P, Grappe F. The use of two different methods of workload quantification in firefighters Science & Sport, 30 (3), p 169-172, 2015.

Ravier G, **Bouzigon R,** Beliard S, Tordi N, Grappe F. Benefits of Compression Garments Worn During Handball-Specific Circuit On Short-Term Fatigue In Professional Players. Journal of Strength & Conditioning Research. 2016. DOI 10.1519/JSC.0000000000001342.

Actes de séminaires

Bouzigon R. Amiot E, Garret J, Tyrode R. L'usage de la vidéo dans le sponsoring, dans l'évaluation de la prise de risque et dans l'entraînement. in Tuillon-Démesy A et Ferréol G (sous la coord. de). Cinquièmes journées Sport et Vidéo. Actes du colloque « Vidéo et sports extrêmes » C3S, 2015.

Bouzigon R, Pinot J. Article scientifique en sciences du sport : technicité et vulgarisation en fonction du public destinataire. in Tuailon-Démesy A et Ferréol G (sous la coord. de), L'écrit : comment rendre compte d'une recherche ? Actes du séminaire « Jeunes chercheurs » C3S, 2014.

Communications orales

Bouzigon R. Amiot E, Garret J, Tyrode R. L'usage de la vidéo dans le sponsoring, dans l'évaluation de la prise de risque et dans l'entraînement. Cinquièmes journées Sport et Vidéo. Colloque C3S. Besançon, 21 mai 2015.

Bouzigon R, Pinot J. Article scientifique en sciences du sport : technicité et vulgarisation en fonction du public destinataire. Séminaire jeunes chercheurs C3S. L'écrit : comment rendre compte d'une recherche ? Besançon, 20 février 2014.

Paulin F, **Bouzigon R**, Ravier G, Grimani A, Dorier P, Laurent F, Nicod F, Lagre F. X. Contraintes physiologiques d'un(e) métier/activité à forte sollicitation physique : Sapeur-pompier, étude préliminaire en conditions opérationnelles réelles. Congrès national de médecine et de traumatologie du sport. Montrouge-Paris, 24 septembre 2014.

Ravier G, **Bouzigon R**. Intérêts de la perception de l'effort dans l'entraînement du joueur de handball de haut niveau. Séminaire axe sport santé C3S. Perception de l'effort : Applications dans les domaines du sport, de la santé et de l'éducation physique. Besançon, 2 juin 2014.

Communications affichées :

Bouzigon R, Ravier G, Paulin P, Grappe F. Quantification de la charge de travail chez les Sapeurs-Pompiers Professionnels. 20^{ème} Forum des Jeunes Chercheurs de Franche Comté. 24 avril 2014.

Hassenfratz C, **Bouzigon R**, Ravier G, Grappe F. Bol d'air Jacquier et perception de la récupération. Colloque 3^{ème} journée Gilles Cometti. La préparation physique : du laboratoire au terrain. Dijon, 12-13 avril 2013.

LISTE DES ABRÉVIATIONS

ANRT, Association Nationale de la Recherche et de la Technologie

C3S, laboratoire Culture, Sport, Santé, Société

CCE, Cryothérapie (ou Cryostimulation) Corps Entier

CE, Conformité Européenne

CCP, Cryothérapie (ou Cryostimulation) Corps Partiel

CIFRE, Convention Industrielle de Formation par la Recherche

DAS28, « Disease Activity Score », indice d'activité de la maladie

DM, Dispositif Médical

DOMS, « Delayed Onset Muscle Soreness », courbatures

EA, Equipe d'Accueil

EVA, Echelle Visuelle Analogique

HDR, Habilité à Diriger des Recherches

HsCRP, C-Réactive Protéine de haute sensibilité

IL-6, Interleukine 6

MCF, Maître de Conférence

MOVE, laboratoire Mobilité Vieillessement et Exercice

NT-proBNP, Peptide natriurétique N-terminal pro-encéphalique

PU, Professeur Universitaire

R&D, Recherche et Développement

TNF- α , Facteur de Nécrose Tumorale alpha

T_{eq}, Température équivalente au froid ressenti

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Chambre de cryothérapie corps entier (à gauche) et cabine de cryothérapie corps partiel (à droite) (Juka, Niepolmice, Pologne)	26
Figure 2 : Immersion en eau froide après entraînement pour les joueurs d'une équipe de rugby	27
Figure 3 : Container contenant la chambre de CCP Kriosystem.....	29
Figure 4 : Camion Cryantal contenant la cabine de CCP et remorque contenant les bonbonnes d'azote	30
Figure 5 : Nouveau « Road center » Cryantal contenant La cabine de CCP « U.C.S. ».....	31
Figure 6 : Schéma du déroulement de la thèse	33
Figure 7 : Représentation de Rhazès soulageant les maux avec la température des aliments donnés aux patients	38
Figure 8 : Représentation d'un traitement de l'hordéole par application d'une lame rafraichit	39
Figure 9 : Poche traditionnelle de glace	42
Figure 10 : Championnat du Monde de natation en eau glacée	42
Figure 11 : Cabine de cryothérapie corps partiel Juka (Niepolimice, Pologne).....	43
Figure 12 : Chambre de cryothérapie corps entier 3 pièces Zimmer (Neu-Ulm, Allemagne). 44	
Figure 13 : Equilibre entre thermogénèse et thermolyse pour la thermorégulation (Cours universitaire, Philippe CONNES, Université des Antilles et de la Guyane).....	47
Figure 14 : Place de l'hypothalamus dans le cerveau humain	48
Figure 15 : Mécanismes de contrôle hypothalamique de la température centrale du corps (Physiologie du sport et de l'Exercice Physique – Wilmore et Costill – 1998).....	48
Figure 16 : Répartition du froid dans le corps en fonction de l'ambiance atmosphérique froide (à gauche) et chaude (à droite)	52
Figure 17 : Les deux camions Cryantal utilisés sur la Vuelta.....	58
Figure 18 : Evaluation de la perception de la sensation thermique lors d'une session de CCP. Photographie Pressesports.....	59
Figure 19 : Echelle de perception de la sensation thermique	60
Figure 20 : Questionnaire de qualité du sommeil.....	61
Figure 21 : Communication affichée à la Conférence Mondiale du Comité International Olympique sur la prévention des blessures et des maladies dans le sport	79

Figure 22 : Pages de garde des compte rendus successifs aux prestations pour les équipes sportives	80
Figure 23 : Sensations thermiques moyennes au cours des expositions en fonction de la durée chez les cyclistes de deux équipes professionnelles au cours de la Vuelta	81
Figure 24 : Sensations thermiques moyennes en fonction des trois semaines d'étape chez les cyclistes d'une équipe professionnelle	81
Figure 25 : Sensations thermiques moyennes au cours des expositions en fonction de la durée chez les skieurs de l'équipe de France de skicross.....	82
Figure 26 : Qualité du sommeil moyenne relevée chez les skieurs de l'équipe de France de skicross en fonction d'une exposition ou non à la CCP la veille	83
Figure 27 : Exemple d'un compresseur frigorifique	113
Figure 28 : Premier schéma de la future chambre de CCE Cryantal	114
Figure 29 : Prototype muni des moteurs américains et installé au centre	115
Figure 30 : Ventilateurs situés à l'intérieur de la chambre principale	118
Figure 31 : Climatiseur pour le refroidissement du sas.....	119
Figure 32 : Interface homme machine du prototype	119
Figure 33 : Remorque du prototype	120
Figure 34 : Exemple d'une fiche technique du prototype	122
Figure 35 : Premiers relevés effectués pendant une descente en température. Sonde 1 : groupe froid ; Sonde 2 : échangeur ; Sonde 3 : chambre. Le cercle jaune dénote une anomalie qui a entraîné une remontée de la température.....	125
Figure 36 : Schéma du prototype de la chambre de CCE Cryantal vu du dessus	126
Figure 37 : Relevés effectués après 48h de descente en température. Abréviations : Sas : Température du sas ; T° Sonde 1 : Température de la sonde 1 ; T _{eq} : Température équivalente ressentie	127
Figure 38 : Thermocouple de type T utilisé	127
Figure 39 : Température cutanée moyenne des zones d'intérêt avant, immédiatement après et pendant 20 minutes après l'exposition. * = différence significative avec la valeur précédente	130
Figure 40 : Classement des dispositifs médicaux en fonction de leur dangerosité	156
Figure 41 : Evaluation de la conformité des dispositifs médicaux de classe IIa et IIb	156

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Traduction du tableau de Chesterton et al. (Chesterton et al., 2002) sur les études réalisées sur la diminution de la température cutanée en fonction de plusieurs méthodes de cryothérapie locale et de leurs durées d'applications.....	41
Tableau 2 : Caractéristiques des athlètes de haut niveau présents au cours des prestations	60
Tableau 3 : Tableau de refroidissement éolien d'Osczevski et Bluestein (Osczevski and Bluestein, 2005).	117
Tableau 4 : Températures d'exposition relevées à l'intérieur du sas et de la chambre principale vides	129
Tableau 5 : Températures cutanées avant et après exposition (Moyenne \pm Ecart type), taille de l'effet et intervalle de confiance (IC : 95 %).....	129

EQUATIONS

$T_{eq} = 13.12 + 0.6215T - 11.37V^{0.16} + 0.3965TV^{0.16}$ (équation 1)	117
---	-----

INTRODUCTION GENERALE

Cadre de travail

Il apparaît nécessaire de faire un retour sur le déroulement de ces trois dernières années de thèse afin d'en situer le contexte et d'en poser le décor.

Cette thèse a bénéficié d'une bourse de Convention Industrielle de Formation par la Recherche (CIFRE) délivrée par l'Association Nationale de la Recherche et de la Technologie (ANRT). Une convention a été réalisée entre l'ANRT, l'Université de Franche Comté, l'Université de Poitiers et la société Cryantal. L'équipe d'accueil (EA) de l'Université de Franche Comté (UFC) est l'EA 4660, le laboratoire Culture Sport Santé Société (C3S) dirigé par Monsieur Gilles FERREOL (PU) et basé à l'Unité de Promotion, de Formation et de Recherche (UPFR) des sports de Besançon. L'équipe d'accueil de Poitiers est l'EA 6314, le laboratoire Mobilité Vieillesse et Exercice (MOVE) dirigé par Monsieur Laurent BOSQUET (PU). Cette thèse a été codirigée par Messieurs Frédéric GRAPPE (MCF, HDR, EA 4660) et Benoit DUGUE (PU, EA 6314). La société Cryantal (SARL) a enfin été l'entreprise d'accueil indispensable dans le processus CIFRE. Elle a été créée en 2011 par Samuel QUENIART, Kinésithérapeute et Ostéopathe. Cryantal est un fabricant et prestataire français de chambre de Cryostimulation Corps Entier (CCE) désireux de se développer à travers la recherche et les avancées scientifiques afin de rendre ses technologies objectives et pertinentes. Dans ce but, elle s'est rapprochée du domaine universitaire. C'est dans ce contexte que la thèse a été mise en place. La stratégie scientifique opérée par la société est double puisqu'elle s'appuie sur la complémentarité des études de terrain et des études de laboratoire. En effet, cette thèse relate des résultats obtenus lors de prestations avec des équipes sportives professionnelles (équipes cyclistes, équipes de France de basketball homme et femme, équipe de France de skicross) sur des compétitions internationales (Tour d'Espagne de cyclisme « Vuelta », Championnat d'Europe et Tournoi Internationaux de basketball et Coupe du Monde de skicross) et lors d'études de laboratoire.

INTRODUCTION

1. Contexte

La Cryothérapie Corps Entier (CCE) et la Cryothérapie Corps Partiel (CCP) sont deux méthodes d'exposition de l'individu à un froid intense (entre $-110\text{ }^{\circ}\text{C}$ et $-160\text{ }^{\circ}\text{C}$) pendant une courte durée (2 à 4 minutes). La CCE est une méthode d'exposition complète à l'intérieur d'une chambre cryogénique et la CCP est une exposition dite partielle car l'individu est dans une cabine ouverte afin de garder la tête à l'extérieur (figure 1).



Figure 1 : Chambre de cryothérapie corps entier (à gauche) et cabine de cryothérapie corps partiel (à droite) (Juka, Niepolmice, Pologne)

La première technologie fut vraisemblablement une cabine de CCP, inventée en 1979 par le Professeur Toshima Yamauchi. Ce dispositif a à la base été développé pour répondre à une problématique de soulagement des douleurs rhumatismales et inflammatoires. Il a ensuite été repris dans les pays Nordiques et dans l'Europe de l'Est. Les chambres de CCE ont ensuite vu le jour. Elles permettaient, par rapport aux cabines de CCP, de contenir plusieurs personnes. D'abord utilisées dans le milieu médical, elles ont ensuite été transposées dans le domaine de la récupération sportive. Ce nouveau domaine d'application a vu la variation du terme cryo « thérapie » en cryo « stimulation ». Le développement dans le milieu sportif s'est fait naturellement car certaines méthodes de froid étaient déjà utilisées auparavant. Il existe en effet des méthodes d'application locale de froid comme les bombes aérosol ou les poches de glace utilisées pour soulager les coups, les inflammations, les œdèmes, ou pour diminuer la température des articulations. Des méthodes de refroidissement corps entier et corps partiel étaient également déjà connues. Il n'est pas nouveau de voir des joueurs de rugby se glisser dans des bacs d'eau et de glaces à la fin d'un match (figure 2), ou encore des coureurs de fond debout dans des rivières avec de l'eau froide jusqu'à la taille à la fin de leur effort.



Figure 2 : Immersion en eau froide après entraînement pour les joueurs d'une équipe de rugby

Les bienfaits connus du froid dans le sport vont entraîner un intérêt rapide de la CCE et de la CCP dans le milieu de la performance sportive. En 2009, L'Institut National du Sport, de l'Expertise et de la Performance (INSEP) s'est doté d'une chambre de CCE (Zimmer, Neu-Ulm, Allemagne) afin d'en étudier objectivement les bénéfices sur la performance et sur la récupération sportive. L'achat d'un dispositif de CCE ou de CCP est certes plus onéreux qu'un simple bac à eau, mais les contraintes d'utilisation ne sont pas plus difficiles. Remplir des bacs avec de l'eau froide sur des compétitions n'est pas toujours aisé, surtout sur les compétitions mobiles (exemple : Tour de France). De plus, la durée d'une séance d'immersion, une vingtaine de minutes tout compris (arrivée, mise en tenue, séchage et rhabillage du sportif), est plus longue qu'une séance de CCE ou de CCP qui nécessite au total une dizaine de minutes (tout compris également). Ce temps gagné est important pour les athlètes qui ont souvent un programme très chargé sur les compétitions (massages, briefings, conférences de presse, ...). Ces raisons ont poussé certains prestataires à placer des cabines de CCP dans des camions afin de pouvoir effectuer des prestations sur des tournois sportifs. Ainsi, de vrais centres de CCP mobiles ont vu le jour pour le suivi d'équipes sportives professionnelles sur des évènements internationaux. Les premiers suivis ont par exemple été effectués sur le Tour de France. Ils se sont ensuite développés dans d'autres sports comme les sports collectifs (rugby, basketball, football) ou encore comme le skicross. Des équipes de rugby se déplacent sur les matches avec leur propre remorque de cryothérapie. Plus récemment, des sportifs tel que le footballeur Cristiano Ronaldo se sont même fait installer une cabine personnelle chez eux. L'utilisation de la CCE et de la CCP devient donc incontestable dans le milieu de la récupération sportive.

La différence entre les deux technologies réside dans la capacité de mobilité. Les cabines de CCP sont pour l'instant les seules à être mobiles, elles sont donc davantage développées dans le milieu sportif. Ce constat a été fait dans une étude de Hausswirth et al. (Hausswirth et al., 2013b) qui comparaient les effets des deux dispositifs sur la température cutanée et la fonction du système nerveux autonomes sur des sujets sains. Dans cette étude, les auteurs ont démontré des effets plus importants de la CCE comparé à la CCP. Il est donc dommage que seule la CCP soit mobile.

Après leur développement dans les domaines de la douleur et de la récupération sportive, une nouvelle tendance voit la CCE et la CCP gagner le milieu du bien-être, de l'esthétisme et de la relaxation. Certains centres de thalasso et de relaxation français commencent à se doter de dispositifs de CCE et de CCP.

Cet engouement récent autour de ces technologies entraîne l'accroissement du nombre de fabricants. A l'heure actuelle, il existe une quinzaine de fabricants à travers le monde, et ce chiffre est en augmentation. De la même manière, la littérature scientifique dédiée à ces techniques s'étoffe rapidement, d'une trentaine de publication dans des revues internationales indexées en 2010, nous en comptons aujourd'hui plus d'une centaine (source PUBMED). Il existe néanmoins deux freins dans la démocratisation de ces techniques : un frein technologique et un frein économique. Ces deux freins sont liés à l'utilisation de l'azote dans les deux types de technologies existantes.

Le frein technologique le plus important est lié à la sécurité. L'azote est un gaz qui peut être dangereux. La respiration d'une quantité trop importante peut en effet induire un évanouissement et aller jusqu'à l'arrêt respiratoire. On compte malheureusement déjà un cas de décès lié à l'utilisation d'une cabine de cryosauna aux Etats-Unis. Les risques liés au contact direct de ce gaz sont donc majeurs. Il existe actuellement un vide juridique pour l'utilisation de l'azote, mais il est indéniable que celui-ci sera très prochainement comblé, notamment à la suite de cet accident mortel. Les technologies existantes vont donc devoir évoluer pour répondre aux futures normes de sécurité.

Le second frein technologique réside dans l'incapacité de mobilité de certaines technologies existantes. Les chambres de CCE sont des technologies fixes, principalement du fait de leurs tailles imposantes. Les technologies Zimmer ont en effet besoin de deux pièces, une première pour la chambre et une seconde pour pouvoir entreposer les moteurs avec les compresseurs. Il existe une nouvelle alternative de chambres disponibles dans des gros containers (Kriosystem, Wroclaw, Pologne), néanmoins leur mobilité reste réduite (figure 3). Un camion doit déposer

le container afin qu'il puisse être utilisé, puis celui-ci est rechargé à la fin de la prestation. Cette logistique est trop complexe pour que ces chambres soient utilisées sur des compétitions sportives qui nécessitent un déplacement quotidien. Le développement de la cryothérapie étant indissociable des prestations sportives, il est indispensable de pouvoir proposer une technologie déclinable en version mobile.

Le frein économique est lié au coût d'exploitation. L'azote est un gaz relativement cher et sa consommation est élevée, notamment dans les cabines de CCP et dans certains types de chambres de CCE. Les chambres électriques, telles que les chambres Zimmer, ne nécessitent pas l'achat d'azote car elles utilisent l'azote présent dans l'air ambiant. Néanmoins, la consommation électrique essentielle à ce mécanisme est considérable. Les professionnels utilisant la CCE ne peuvent donc pas proposer des séances à un prix abordable pour tous car ils doivent rester rentables. Ces coûts d'exploitation élevés rendent cette thérapie élitiste, ce qui empêche sa démocratisation.



Figure 3 : Container contenant la chambre de CCP Kriosystem

2. La société Cryantal

a) De la prestation à la fabrication

En 2011, Samuel QUENIART, kinésithérapeute et ostéopathe convaincu par les bienfaits thérapeutiques du froid, décide de créer la société Cryantal. Le nom Cryantal provient de la contraction des mots « cryothérapie » et « antalgique ». Les premiers objectifs de la société ont été d'effectuer des prestations sportives. Elle s'est dotée d'un camion qui a été équipé d'une cabine de CCP de type Juka (figure 4 et 5). Les bonbonnes d'azote ont été placées dans une remorque ainsi qu'un groupe électrogène pour garantir le fonctionnement de la cabine si l'accès à une prise n'est pas possible. Cryantal, qui a commencé avec le suivi de l'équipe cycliste

professionnelle sur le Tour de France en 2011, est ainsi devenue une des pionnières dans les prestations de CCP mobile.

En 2012, les objectifs de la société ont évolué. L'expérience vécue avec la cabine de CCP Juka sur le Tour de France va contribuer au cheminement d'une nouvelle idée d'évolution pour la société. En effet, la cabine de CCP utilisée est tombée en panne au cours de la prestation. Pour pouvoir réparer, un des employés de Cryantal a dû lui-même faire un aller-retour en Pologne afin de récupérer la pièce défectueuse. Il était impossible de la trouver autrement que directement chez le fabricant. C'est à la suite de ce problème que la société a pris conscience qu'il n'existait pas véritablement de distributeur de cabine en France. Après quelques recherches, il s'est même avéré qu'il y avait très peu de fabricants dans le monde (moins de dix). L'absence de fabricant et les problèmes d'exploitations rencontrés avec cette cabine ont décidé Cryantal à vouloir développer sa propre technologie. De cette manière, non seulement la société pourrait couvrir davantage de prestations, mais elle commercialiserait également ses propres machines.



Figure 4 : Camion Cryantal contenant la cabine de CCP et remorque contenant les bonbonnes d'azote

b) Création du département Recherche et Développement

Le deuxième grand changement dans l'organisation de la société Cryantal a été la mise en place d'un département recherche et développement (R&D). Celui-ci a pour but d'étudier et de réunir les connaissances relatives aux effets de la CCE et de la CCP sur l'Homme. Il apparaissait en effet indispensable d'effectuer des prestations sportives et de développer une nouvelle technologie en s'adossant à des vérités scientifiques. Notamment avec une chambre qui sera utilisée dans le milieu médical et dans le sport de haut niveau. De plus, ceci a permis de se démarquer de la concurrence. Les autres fabricants sont davantage des frigoristes capables de

sortir des technologies de froid, mais ils ne prennent pas vraiment en compte l'aspect scientifique lors de la conception de leurs technologies.

Afin de mettre en place ce projet, la société s'est rapprochée de l'UFC et plus précisément de l'UPFR des Sports de Besançon via Frédéric GRAPPE, enseignant-chercheur et Directeur de la Performance de l'équipe cycliste professionnelle FDJ. Une collaboration sera signée entre Cryantal et les Universités de Franche Comté et de Poitiers. Le projet de doctorat CIFRE va découler de cette collaboration sous la tutelle industrielle de Samuel QUENIART et universitaire de Frédéric GRAPPE, Benoît DUGUE, et Gilles RAVIER. Benoit DUGUE est Professeur des Universités à la Faculté des sports de Poitiers. C'est un chercheur spécialiste de la CCE et qui a auparavant travaillé à l'UPFR Sports de Besançon. Ces raisons expliquent le rapprochement logique avec le projet. Gilles RAVIER est un spécialiste de l'entraînement sportif qui officie dans le haut niveau. Ces connaissances et son expérience en laboratoire comme sur le terrain ont également été indispensables dans l'élaboration et le développement de la thèse. L'évolution du département recherche et développement est parallèle à l'évolution de la thèse. Elle a été structurée autour des activités R&D Cryantal.



Figure 5 : Nouveau « Road center » Cryantal contenant La cabine de CCP « U.C.S. »

3. Déroulement de la thèse et structuration du manuscrit

La structuration de ce manuscrit est basée sur l'évolution du travail effectué au cours de ces quatre années de thèse. Il suivra donc un plan réalisé de manière chronologique. Cette mise en place permettra de bien comprendre le fil conducteur de la thèse et les deux grandes parties qui la compose.

La première partie est consacrée à l'analyse complète de la CCE à travers les effets démontrés dans la littérature scientifique, les études de terrain et les technologies existantes. Elle s'étend

d'août 2012 à décembre 2014. Elle verra la publication de deux articles dans des revues à comité de lecture international et d'une publication successive à une communication affichée.

La seconde partie présente le développement d'une nouvelle technologie de chambre de CCE. Elle est directement en lien avec la première partie puisqu'elle se base sur tous les résultats et informations recueillis au cours de celle-ci. Elle a débuté en janvier 2013 et s'est terminée à la fin de l'année 2016, date de sortie de la version de la chambre de CCE commercialisable.

La thèse comporte ainsi deux parties distinctes. La première conduite sur le terrain dans les conditions réelles de compétition auprès des athlètes afin de développer une expérience concrète des besoins et des applications liés à cette thérapie. La seconde consacrée à la recherche bibliographique et au développement technologique d'une nouvelle chambre. L'une des principales difficultés a été de tenir compte du calendrier industriel relatif au développement technologique. Les impondérables « industriels » sont d'ailleurs la cause de l'année de thèse supplémentaire réalisée. En revanche, l'expérience acquise grâce aux échanges avec le milieu professionnel et industriel a été une très grande richesse.

Objectifs de la thèse :

Dans le but de répondre aux besoins de la société, cette thèse a été articulée autour de quatre objectifs :

- 1) l'identification des besoins technologiques et méthodologiques à partir d'études conduites sur le terrain et de l'analyse de la littérature scientifique ;
- 2) le développement d'un prototype de chambre CCE à partir des besoins identifiés ;
- 3) la validation technologique du prototype en vue de son industrialisation ;
- 4) d'apporter des perspectives d'évolutions futures pour le développement du prototype afin qu'il devienne une chambre CCE commercialisable.

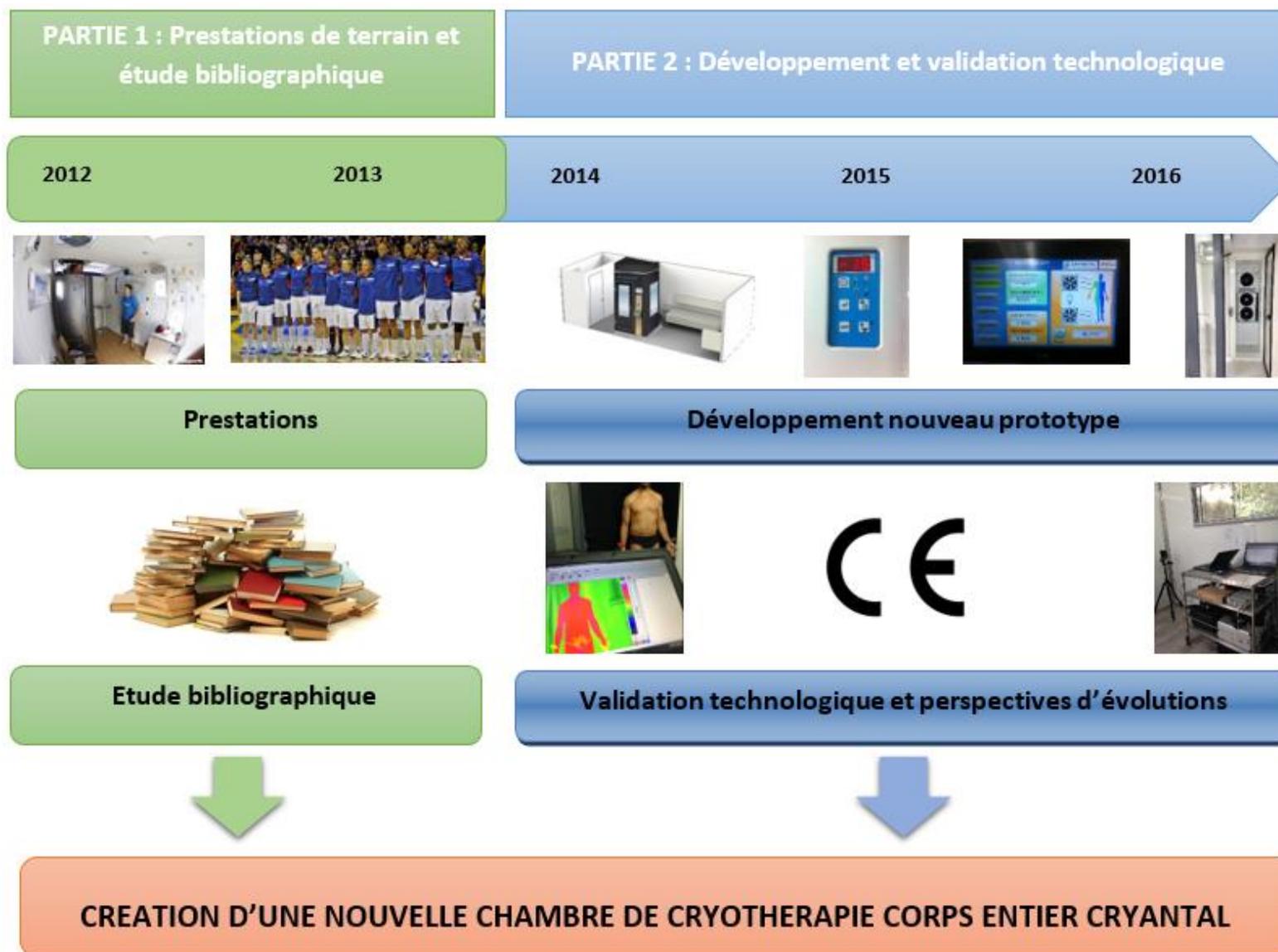


Figure 6 : Schéma du déroulement de la thèse

**PARTIE I : APPLICATIONS PRATIQUES ET BESOINS
TECHNOLOGIQUES**

CHAPITRE 1 : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

Dans le but de mieux cerner notre travail, il est important de se pencher dans un premier temps sur l'utilisation générale du froid dans nos sociétés en établissant un bref historique. Dans un second temps, nous évoquerons les méthodes de thérapies par le froid, et plus particulièrement les méthodes et les effets de la cryothérapie corps entier.

1. Histoire de l'utilisation du froid depuis l'Antiquité

a) Antiquité (-3000 av JC à 476)

L'histoire de l'utilisation du froid suit celle de l'évolution de la société humaine depuis de très nombreuses années. Plusieurs ramifications vont apparaître au fil du temps et croître telles que la conservation, l'antalgie, l'anesthésie ou encore le confort. Même si les technologies modernes vont s'orienter davantage sur le chaud qui est plus facile à créer, les éléments naturels que vont représenter l'eau, la neige, la glace, le vent, ont contribué à un développement précoce de l'utilisation du froid. Ainsi certains pensent que les Hébreux, au Moyen Orient, ont été les premiers à boire des boissons fraîches en se basant sur un passage des Proverbes du Roi Salomon datant du X^{ème} siècle avant JC. Celui-ci voulu exprimer la tranquillité de l'esprit apportée par l'arrivée d'un messager attendu avec impatience en le comparant « *au froid de la neige le jour de la moisson* ». Cette citation a été interprétée par certains comme la neige dont on se servait en été pour rafraichir les boissons. L'Antiquité regorge également de témoignages de l'utilisation du froid. Hippocrate, au V^{ème} siècle avant JC, mettant en place la théorie des quatre éléments formant toute matière (terre, eau, feu, air), va utiliser le chaud ou le froid pour tenter de soigner ou de soulager des maux chez les malades. Il va décrire plusieurs méthodes pour refroidir l'eau. Il va montrer que faire chauffer de l'eau permettait ensuite qu'elle refroidisse plus vite. En effet une fois chauffée, il l'exposait à la rosée pour la faire refroidir rapidement. Cette méthode était appelée « *aithrian* », du Grec « *aithros* » qui signifie le froid du matin. Il appliquait également des feuilles de blettes qui avaient été trempées dans l'eau froide sur le torse des patients atteints d'une infection des poumons. Aristote, autre médecin Grec du IV^{ème} siècle avant JC, fait mention de cailloux et de lames de plomb jetés dans des bassins d'eau dans le but de les rafraichir. Des amphores de vin et d'eau pouvaient ensuite y être plongées. Ce même siècle a vu régner Alexandre le Grand qui, d'après les écrits de son chambellan Charès de Mytilène, obligeait les habitants de la ville de Petra, en Jordanie, à creuser sur un terrain sec des fosses avec une entrée large et qui se rétrécissent pour pouvoir

stocker de la neige et de la glace. Elles étaient ensuite recouvertes de paille ou de feuilles de chênes. Ces fosses représentent peut-être les premières « glaciers » de l'histoire. Selon Sénèque, philosophe du premier siècle, les Romains mangeaient et buvaient de la neige. Le rafraîchissement ne va donc plus être présent que par nécessité mais également par volupté. Au II^{ème} siècle après JC, Galien, médecin Gréco-romain, va décrire des méthodes de refroidissement utilisées à Alexandrie à l'aide du vent. Les habitants accrochaient la nuit des cruches en terre à leur fenêtre du côté où le vent soufflait. Ils les arrosaient ensuite et les mettaient en terre la journée entourées de feuilles de vigne, de laitues ou d'autres semblables. Il cite également des cruches d'eau qui n'étaient pas entièrement remplies, bouillies et placées ensuite dans un cours d'eau de source afin de les rafraîchir. Aetius, d'origine Bulgare et généralissime de l'Empire Romain d'Occident au IV^{ème} siècle après JC, soulageait les inflammations des gencives par des mélanges de neige et de miel. L'Antiquité verra aussi le développement de la commercialisation du froid avec la vente de neige en été en Turquie, en Italie ou encore à l'intérieur du Royaume Perse.

b) Moyen – Age (476 à 1492)

Le froid au Moyen-âge a été utilisé pour la purgation (Pape Séverin, Italie, V^{ème} s.), le soulagement des maux par la température des aliments (Rhazès, Iran, IX^{ème} s.) (figure 7), le soulagement de la fièvre par immersion des membres en eau froide ou encore pour augmenter la satiété (Avicenne, Empire Perse, Ouzbékistan actuel, X^{ème} s.).



Figure 7 : Représentation de Rhazès soulageant les maux avec la température des aliments donnés aux patients

c) Epoque Moderne (1492 à 1789)

L'époque moderne a vu se développer encore davantage l'utilisation du froid dans la conservation (fosses coiffées de paille, Russie, Hongrie), le rafraîchissement des maisons (création de canaux souterrains dans lequel le vent passe, les Ventidottis, Italie) ou

l'alimentation (pots de crèmes avec des fruits gelés pour faire des glaces aromatisées, Italie, Espagne). Les douleurs postopératoires étaient soulagées avec l'ingestion d'eau froide (France). La période médicale de cette époque s'était recentrée sur les écrits des philosophes et médecins grecs de l'antiquité. Ainsi les médecins pensaient que l'ingestion d'eau froide était proportionnelle au soulagement de l'esprit et des maux. Par la purgation, elle servait à « vider les humeurs ». L'application de la neige sur les pieds était utilisée pour soulager la goutte et on se servait des lames en fer refroidie pour traiter certaines pathologies dermatologiques comme l'hordéole (maladie du grain, ou orgelets) (figure 8). L'application de froid était utilisée pour soulager les engelures en Norvège et les hernies en Allemagne. Les premières machines de création du froid vont apparaître à cette époque avec par exemple la machine pneumatique du docteur William Cullen en 1748.



Figure 8 : Représentation d'un traitement de l'hordéole par application d'une lame rafraîchit

d) Epoque Contemporaine (1789 – 1896)

L'époque contemporaine voit la première caractérisation du froid comme anti-inflammatoire dans le Traité de l'utilisation du froid de La Corbière (1839). Ce traité relate également de son utilisation comme sédatif, dans le traitement palliatif du choléra et de la gastroentérite aigue et chronique ou encore dans le traitement de la constipation. Le chirurgien de la Grande Armée Napoléonienne, le docteur Dominique Larrey va observer, lors de l'épisode de la retraite de Russie (1812), les effets anesthésiques du froid sur les soldats blessés. Il va rapporter cette méthode en France pour l'adapter au monde de la chirurgie. Le XIX^{ème} siècle a également vu naître la poche de glace à Epinal. Elle va pouvoir être utilisée quotidiennement dans le soulagement des « petits » maux. La cryoconservation pour le maintien en vie de tissus et d'organes va également faire son apparition.

Les technologies de création du froid vont se développer de plus en plus au cours de cette période avec la machine frigorifique à compression d'éther d'Olivier Evans en 1805, à air de John Gorrie en 1844 ou encore à absorption de Ferdinand Carré en 1859. Le monde de la conservation alimentaire va également faire un grand pas en avant grâce au français Charles Tellier qui va installer trois machines à compression d'éther méthylique sur un vieux voilier transformé en bateau à vapeur (et renommé pour l'occasion « Le Frigorifique ») pour maintenir une température artificielle proche de 0 °C. C'est ainsi que le 20 septembre 1876, le Frigorifique va partir de Rouen pour rejoindre Buenos Aires en 105 jours avec dans ses cales 30 tonnes de viande qui restera en bon état.

e) Ere actuelle (1896 à nos jours)

De nos jours, les machines et les techniques liées au froid (réfrigérateurs, congélateurs, climatiseurs, ventilateurs, chambres froides, ...) améliorent le quotidien et la qualité de vie. La conservation alimentaire plus qualitative et quantitative a permis la prévention des maladies (bactéries, intoxications, ...) et la diminution des famines. La climatisation apporte un confort et peut être indispensable en période caniculaire chez les personnes âgées. Les méthodes anesthésiques et de conservation des organes ont également permis de sauver des vies.

Les applications de ces technologies sont innombrables et il est temps de se recentrer sur le champ d'investigation de ce manuscrit.

2. Les méthodes de cryothérapies locales et corps entier

D'après le Centre National de Ressources Textuelles et Lexicales, le terme « cryothérapie » est composé du mot « cryo » qui provient du grec ancien « krûos » (« froid ») et du mot « thérapie » qui désigne dans le milieu médical la manière de traiter une maladie. Le terme cryostimulation est employé davantage dans le cadre de la récupération sportive. « Stimulation » caractérise le résultat d'une action en réponse à un stimulus. La cryothérapie, ou cryostimulation peut donc être caractérisée comme l'action de traiter, de soulager ou de provoquer une réaction par l'application de froid ou par exposition au froid.

a) Les méthodes de cryothérapie locale

La cryothérapie locale est depuis longtemps utilisée pour soulager les douleurs, limiter ou diminuer les inflammations et les œdèmes. Il existe plusieurs sortes de cryothérapie locale : T-shirts rafraîchissants munis d'accumulateurs thermiques, packs ou sacs de glace (figure 9),

immersion d'un ou plusieurs membres dans un bac d'eau glacée ou froide, sachets de petit pois congelés, massage avec de la glace, ventilateurs, ... Toutes les techniques provoquant le refroidissement d'un membre sont exploitées. Les principaux effets recherchés par l'application de la cryothérapie locale sont le soulagement de la douleur et la diminution des phénomènes inflammatoires. Un refroidissement local va en effet permettre d'augmenter les seuils d'apparition et de tolérance à la douleur en réduisant la vitesse de conduction nerveuse (Algaflly and George, 2007) et en diminuant la réponse du système nerveux autonome (Saeki, 2002). Cette diminution peut être expliquée par la stimulation des mécanismes inhibiteurs des nocicepteurs ou encore par la réduction de leur sensibilité (Kunesch et al., 1987). Il faut cependant prendre en compte que la température cutanée atteinte avec la cryothérapie est un facteur primordial dans l'obtention d'un effet analgésiant. Les différentes méthodes de cryothérapies locales vont induire des refroidissements tissulaires différents. Les réponses physiologiques ne seront alors pas les mêmes. Il a été démontré que pour créer une analgésie locale, la température cutanée doit descendre en dessous de 13,6 °C (Bugaj, 1975), pour diminuer la vitesse de conduction nerveuse de 10 %, en dessous de 12,5 °C (McMeeken et al., 1984), et pour ralentir l'activité enzymatique métabolique de 50 %, entre 10 et 11 °C (Zachariassen, 1991). Le tableau 1 met en avant les différentes températures cutanées relevées dans plusieurs études scientifiques sur l'application du froid avec diverses méthodes et sur diverses parties du corps (Chesterton et al., 2002). Il est intéressant de voir que la température cutanée varie en fonction des méthodes et des temps d'applications.

Tableau 1 : Traduction du tableau de Chesterton et al. (Chesterton et al., 2002) sur les études réalisées sur la diminution de la température cutanée en fonction de plusieurs méthodes de cryothérapie locale et de leurs durées d'applications

Etude	Méthode	Partie du corps	Temps d'application (min)	Diminution moyenne de la température cutanée (°C)
Lewis	Immersion en eau froide	Doigt	12	26,1
Bugaj	Massage glacé	Mollet	10	26,6
Lewis et Clayfield	Massage glacé	Mollet	15 (s)	7,0
Mcmeeken et al	Pack de froid	Bras	20	17,7
Belitsky et al.	Pack cryogène	Mollet	15	8,4
Knight et al	Pack de gel	Cuisse	30	20,5
McMeeken et al	Pack de glace	Bras	20	25,6
Belitsky et al	Pack de glace	Mollet	15	12,1
Mancuso et Knight	Pack de glace	Cheville	30	22,2
Belitsky et al	Sac de glace	Mollet	15	9,9
Knight et al	Sacs de glace Durakold	Cuisse	30	21,2

Note : Pack de glace, glace dans une serviette humide ; Sac de glace, glace dans un sac plastique

La cryothérapie locale est utilisée pour plusieurs types d'inflammations : Les inflammations chroniques (arthrites, polyarthrite rhumatoïde, spondylarthrite ankylosante, ...) ou les inflammations aiguës (œdèmes, rougeurs, ...) due à une activité physique ou à un coup (Hirvonen et al., 2006; Nemet et al., 2009).



Figure 9 : Poche traditionnelle de glace

b) Les méthodes de cryothérapies corps entier et corps partiel par immersion en eau froide

Une des premières méthodes de CCE est la natation en eau froide. La natation en eau froide est une activité pratiquée à la base dans les pays nordiques (Scandinavie, Russie, ...). Elle va du barbotage simple de quelques secondes jusqu'au championnat du monde de natation en eau froide sur des distances de 1000 mètres et qui prennent plusieurs minutes (figure 10). Cette coutume est relativement ancienne et était réalisée pour des raisons de santé. Pour ces nageurs de tout âge, l'immersion en eau très froide permet de diminuer les risques de tomber malade et d'améliorer leur tolérance face au stress de la vie quotidienne (Dugue and Leppanen, 2000; Huttunen et al., 2001). La seconde méthode utilisée proche de la natation en eau froide est l'immersion en eau froide. La différence avec la natation est que l'individu plongé dans l'eau reste immobile. Cette application peut être réalisée dans des bacs en tout genre (grande poubelle, baignoire, ...). De la même manière que la cryothérapie locale, elle va être utilisée pour soulager les douleurs physiques (Herrera et al., 2010). Cette méthode a ensuite été développée dans le domaine du sport pour accélérer la récupération après exercice physique (Ascensao et al., 2011; Bastos et al., 2012; Pournot et al., 2011a).



Figure 10 : Championnat du Monde de natation en eau glacée

c) Les méthodes de cryothérapie ou cryostimulation corps entier et corps partiel

La CCE et la CCP sont deux méthodes de refroidissement corporel consistant à exposer un ou plusieurs sujets (pour la CCE) à un froid très intense pendant une à quatre minutes. La première technologie à voir le jour est vraisemblablement une cabine de CCP (figure 11). Elle a été inventée et développée par le professeur Toshima Yamauchi en 1979 et fut mentionnée pour la première fois lors du Congrès Européen de rhumatologie à Wiesbaden en 1979 (Yamauchi, 1988). Elle a ensuite été développée en Europe, notamment en Allemagne par le professeur Fricke et en Pologne par le professeur Zagrobelny dans les années 1980 et 1990 (Engel et al., 1989; Fricke, 1989; Zagrobelny et al., 1992). Cette technologie s'est développée avec la création des chambres de CCE et il existe actuellement une quinzaine de fabricants de technologies de CCE et de CCP dans le monde. La différence entre ces deux technologies ne se fera dans la littérature scientifique qu'à partir de 2013 avec la sortie d'un article d'Hausswirth et al. (Hausswirth et al., 2013b) qui définissent les expositions avec des cabines à azote comme étant des expositions corps partiel.



Figure 11 : Cabine de cryothérapie corps partiel Juka (Niepolimice, Pologne)

Bien qu'utilisées pour les mêmes objectifs, la CCE et la CCP sont deux technologies distinctes. Pour la CCE, l'individu entre entièrement dans une chambre cryogénique alors que pour la CCP, il entre à l'intérieur d'une cabine cryogénique ouverte au niveau de la partie supérieure afin que la tête ne soit pas exposée. Dans les deux cas, l'individu est en sous-vêtements, avec des gants et des chaussons. Pour la CCE, il est également équipé d'un bonnet ou d'un bandeau couvrant les oreilles et d'un masque couvrant les voies aériennes respiratoires. Cette différence d'agencement des deux technologies s'explique par les différences dans la création du froid. Néanmoins, elles utilisent toutes les deux l'azote, un gaz qui a la propriété d'être très froid. En

effet, sa température de gazéification se situe entre -110 et -195 °C. Cette température explique la généralisation des températures d'expositions à partir de -110 °C.

Pour les chambres de CCE, il existe deux moyens de création du froid. Le plus répandue consiste à séparer l'azote et l'oxygène atmosphérique grâce à de gros compresseurs électriques. Une fois seul, l'azote va descendre en température. Les deux gaz seront ensuite à nouveau mélangés puis injectés dans les chambres froides. Le second moyen consiste à faire circuler l'azote à l'intérieur des murs qui entourent la chambre afin que celle-ci refroidisse. Les modèles de CCE sont la plupart du temps constitués de plusieurs chambre froides (généralement une à -10 °C, une à -60 °C et une entre -110 °C et -160 °C) pour accommoder progressivement l'individu au froid et garantir l'isolation des chambres les plus froides (figure 12).



Figure 12 : Chambre de cryothérapie corps entier 3 pièces Zimmer (Neu-Ulm, Allemagne)

Pour la CCP, l'azote est directement injecté à l'intérieur de la cabine afin de la refroidir. La tête de l'individu doit donc obligatoirement sortir de la cabine afin que celui-ci puisse respirer. Des capteurs thermiques placés sur les buses de sortie de l'azote vont ensuite entrainer la régulation des éjections pour contrôler la température d'exposition. La CCP est composée d'un compartiment unique, ce qui lui permet de ne pas prendre beaucoup de place et d'être mobile. Ainsi, il est possible de réaliser des prestations telles que le suivi d'équipes sportives sur des compétitions ou des stages d'entraînement (ex : Suivi d'équipes cyclistes professionnelles sur des grands tours comme le Tour de France ou la Vuelta). Néanmoins, la CCP nécessite d'avoir des cuves emplies d'azote afin de pouvoir effectuer les séances. La plupart du temps, les cabines sont placées dans des camions et les bonbonnes d'azote dans une remorque.

Bien que la CCE et la CCP soient de plus en plus distinguées dans la littérature scientifique, très peu de différences entre leurs effets ont été démontrées. Afin d'alléger le contenu du paragraphe suivant « Mécanismes d'action de la cryothérapie corps entier », nous utiliserons

uniquement le terme de cryothérapie corps entier, ou CCE, pour caractériser les deux technologies.

d) Cryothérapie corps entier et immersion en eau froide

Peu d'études ont comparé les effets de l'immersion en eau froide et de la CCE. Il a récemment été montré que l'immersion en eau froide (10 min ; 10 °C), par rapport à une exposition de CCP (3 min ; -110 °C), permettait d'avoir une cinétique de récupération plus rapide 72 h après des exercices induisant des dommages musculaires pour les performances de saut en contre mouvement sur une jambe et sur deux jambes (Abaidia et al., 2016). La fatigue musculaire était également moins importante et la perception de la récupération plus rapide avec l'immersion à 24 et 48 h après l'exercice. En revanche, aucune différence n'a été trouvée concernant la récupération de la force isocinétique. Il faut noter que la durée de la récupération dans cette étude était plus importante pour l'immersion en eau froide (10 min) comparé à la CCP (3 min). Au niveau thermique, pour des durées similaires (4 min), il a été montré que la température cutanée des individus diminuait davantage avec une exposition à la CCE (-110 °C) qu'avec une immersion en eau froide (8 °C) (Costello et al., 2012). Aucune différence n'a par contre été trouvée entre les variations de températures centrales et musculaires relevées après les deux méthodes de cryothérapie.

Les comparaisons effectuées entre des expositions à la CCE (2 min ; -110 °C) et en natation en eau glacée (20 sec ; en extérieur) ont rapporté que ces deux méthodes permettaient d'améliorer l'habitué au froid avec un effet encore plus prononcé pour la natation en eau glacée (Smolander et al., 2004). Aucune différence n'a en revanche été trouvée dans l'amélioration des capacités antioxydantes entre les deux méthodes (Dugue et al., 2005).

3. Mécanismes d'action de la cryothérapie corps entier

a) Les mécanismes de thermorégulation chez l'Homme

L'Homme est considéré comme un être homéotherme. Afin de maintenir ses fonctions vitales, sa température centrale doit être maintenue constamment aux alentours de $37 \pm 0,8$ °C. Ce maintien de la température centrale est garanti par l'équilibre permanent entre les apports et les pertes de chaleur (figure 13).

L'augmentation de la température centrale peut provenir de la chaleur environnementale et de la thermogénèse. La thermogénèse est la création de chaleur à l'intérieur du corps produite par

l'activité cellulaire. L'activité cellulaire fournit un travail qui produit une énergie sous forme de chaleur. La source la plus importante de chaleur provient de la production métabolique. Elle est la somme de la chaleur dégagée ou produite par le métabolisme de base, l'exercice musculaire et les métabolismes ajoutés (en particulier avec l'alimentation).

La perte de chaleur, ou thermolyse, peut provenir des conditions environnementales ou de l'ingestion d'aliments froids. Pour lutter contre l'augmentation et la perte de chaleur, le corps va mettre en place des adaptations vasculaires (Charkoudian, 2003).

Lorsque le corps est exposé à une diminution de la chaleur, trois mécanismes vont se mettre en place :

Le frisson thermique : Une succession de contractions musculaires inconscientes vont augmenter de 4 à 5 fois la production de chaleur métabolique au repos.

La thermogénèse sans frisson : Stimulation du métabolisme par le système nerveux sympathique. La production de chaleur endogène va alors être augmentée.

La vasoconstriction périphérique : Stimulation sympathique des muscles lisses situés dans la paroi des artérioles proches de la surface cutanée. Leur contraction entraîne la réduction du calibre des vaisseaux et donc du flux sanguin dans les territoires cutanés, évitant les pertes de chaleurs trop importantes. Le débit métabolique des cellules cutanées va également diminuer, réduisant les besoins périphériques en oxygène.

Lorsque le corps est exposé à une augmentation de la température, des mécanismes d'évacuation ou de dissipation de la chaleur vont se mettre en place :

Conduction : La conduction est un échange thermique par contact direct. Le débit de chaleur est fonction de la conductivité thermique des tissus et de la différence entre la température centrale et la température cutanée. La conductance du corps est faible, notamment au niveau des tissus adipeux qui sont de bons isolants thermiques. Ceci rend ce mécanisme peu efficace chez l'homme.

Convection : La convection correspond à une perte de chaleur par renouvellement d'un fluide autour de l'individu (air, eau). Pour l'air, si la température cutanée est supérieure à la température de l'air, l'air en contact avec la peau va se réchauffer et s'élever. Ce phénomène présent à la surface du corps est appelé convection naturelle. Quand l'organisme est exposé au vent, la perte de température par convection augmente, elle devient une convection forcée.

Rayonnement : Les échanges thermiques par rayonnement s'effectue sans support matériel. Ils se font des corps plus chauds vers les corps plus froids sous forme d'ondes infrarouges. Le corps émet un rayonnement qui est fonction de sa température. La peau envoie donc un rayonnement infrarouge mais reçoit également le rayonnement émis par les sources thermiques environnantes.

Sudation/Evaporation : C'est le mécanisme le plus efficace de perte de chaleur. L'évaporation de l'eau des surfaces du corps retire une quantité importante de chaleur corporelle car elle absorbe beaucoup de chaleur avant de se vaporiser. L'eau s'évapore lorsque ces molécules absorbent assez d'énergie pour s'échapper sous forme de gaz à l'endroit où la peau est en contact avec l'air. En revanche, plus l'air sera chargé en humidité et moins l'eau arrivera à s'évaporer.

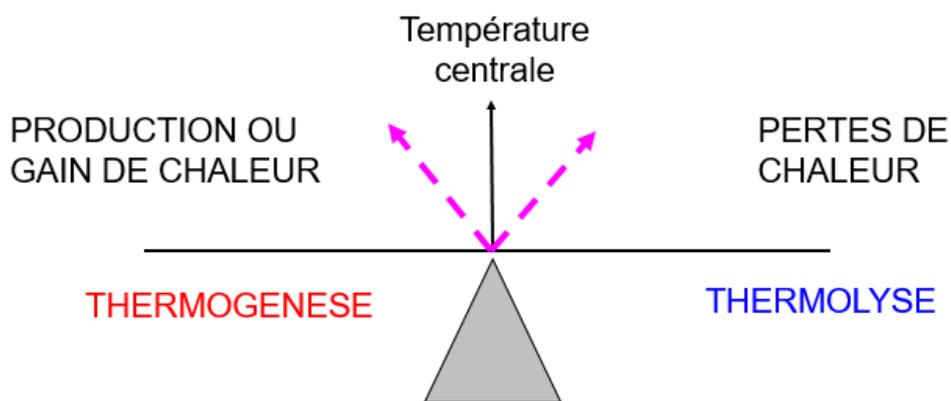


Figure 13 : Equilibre entre thermogénèse et thermolyse pour la thermorégulation (Cours universitaire, Philippe CONNES, Université des Antilles et de la Guyane)

b) Les acteurs de la thermorégulation

Ce sont des thermorécepteurs périphériques et centraux qui vont détecter les variations de température et permettre la mise en place d'adaptations. Les thermorécepteurs périphériques sont des neurones sensitifs placés dans la peau à proximité des capillaires sanguins. Ils sont sensibles aux variations de température cutanée, notamment lorsque celle-ci diminue de manière rapide. Les thermorécepteurs centraux sont situés à l'intérieur du corps et vont être stimulés à partir d'un certain degré de variation. Ces deux types de thermorécepteurs vont ensuite transmettre les informations de variation de température sous forme d'influx nerveux jusqu'à l'hypothalamus via la moelle épinière. L'hypothalamus est le centre d'intégration de la

thermorégulation (figure 14). Il joue un rôle de « thermostat » du corps humain. C'est une structure du système nerveux central située sur la face ventrale de l'encéphale.

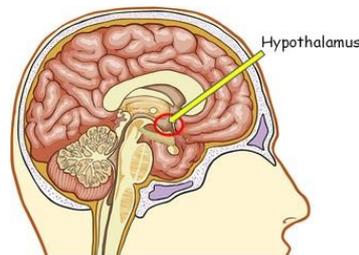


Figure 14 : Place de l'hypothalamus dans le cerveau humain

L'hypothalamus contient les centres de contrôle qui reçoivent l'information en provenance des thermorécepteurs. Ces centres comparent la valeur de température actuelle à la valeur de consigne et mettent en place des mécanismes d'adaptation s'il y a un écart entre ces deux valeurs. Lors d'une exposition au froid, le contrôle de la perte de chaleur va ainsi être régulé par la vasoconstriction cutanée et la production de chaleur par le frisson. Lors de l'exposition au chaud, l'hypothalamus va induire une vasodilatation cutanée. Les voies efférentes qui permettent de délivrer les informations sont essentiellement les voies neurovégétatives orthosympathiques. Les messagers vont être nerveux et hormonaux (figure 15).

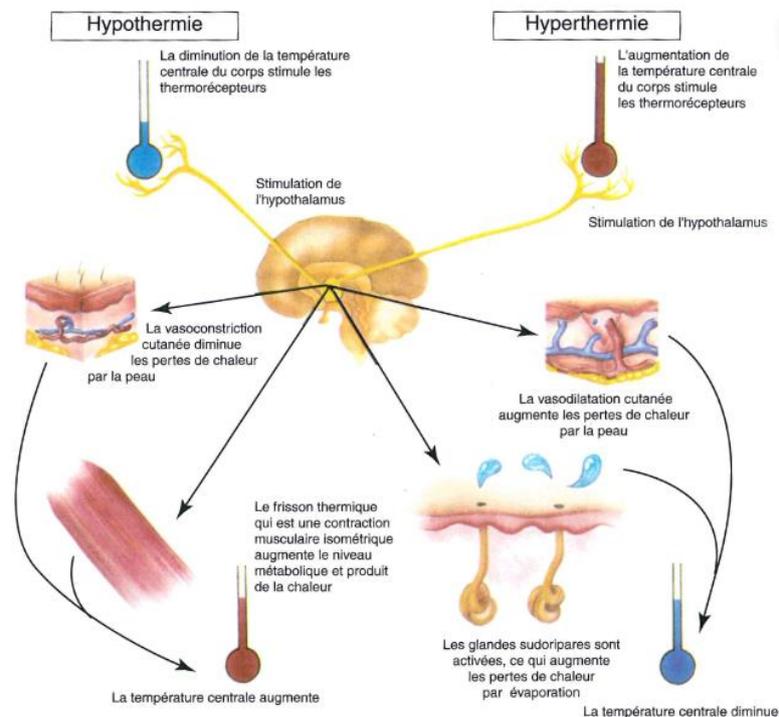


Figure 15 : Mécanismes de contrôle hypothalamique de la température centrale du corps (Physiologie du sport et de l'Exercice Physique – Wilmore et Costill – 1998)

c) Effets de l'exposition au froid extrême

Lors d'une séance de CCE, la diminution brusque de la température va induire un stress thermique important sur toute la surface du corps humain. Celui-ci va rapidement mettre en place des mécanismes de régulation à court terme pour tenter de maintenir constante la température centrale. Les variations de température vont être détectées au niveau de la peau par les thermorécepteurs proches de la surface qui sont des terminaisons nerveuses libres des fibres nerveuses A Delta du système nerveux périphérique. Lorsque la température cutanée est constante, ils envoient une décharge électrique constante. En revanche, dès que la température varie, l'intensité de la décharge augmente. Avec une diminution brusque et importante de la température, le taux de décharge peut passer des valeurs normales comprises entre 10-20 impulsions par secondes à des valeurs maximales qui monter entre 120 et 140 impulsions par secondes. Les fibres myélinisées A Delta vont permettre la transmission de ce signal des récepteurs cutanés vers la moelle épinière, puis vers l'hypothalamus. Deux mécanismes vont ainsi être stimulés. La thermogénèse va être augmentée par le frisson thermique et l'augmentation du métabolisme cellulaire. La déperdition de la température va être limitée par la vasoconstriction périphérique cutanée et, dans une moindre mesure chez l'homme, par l'horripilation. L'érection des poils va en effet permettre de créer une couche d'air isolante au-dessus de la peau.

Les réactions induites par la CCE vont donc impliquer un phénomène de réactions en cascade à la base des multiples bénéfices connus de cette thérapie.

4. Effets de la cryothérapie corps entier

a) Influence de la cryothérapie corps entier sur la capacité antioxydante

Le stress oxydant est une agression des constituants de la cellule par des radicaux libres. En temps normal, la production de ces radicaux libres n'est chez l'homme ni anormale, ni pathogène. Il existe dans les cellules des mécanismes de détoxification à l'aide d'enzymes telles que la superoxyde dismutase, la catalase ou encore la glutathion peroxydase.

L'activité physique, ainsi que certaines pathologies, induit une augmentation de la production de radicaux libres. Cette augmentation va perturber l'équilibre de la balance pro-anti-oxydante, et par conséquent induire un stress oxydant (Banfi et al., 2010). En réponse à cette agression le corps va mobiliser le système antioxydant. Le stress oxydant est désormais connu comme étant

un facteur de développement de plusieurs pathologies tel que le cancer, la maladie d'Alzheimer ou encore l'arthrite.

Le stress thermique induit par la CCE, l'augmentation de l'activité circulatoire et la mise en place des mécanismes de thermogénèse vont causer la perturbation de cette balance pro – anti – oxydante et induire une augmentation du stress oxydant (Lubkowska et al., 2012). Il a été démontré que la stimulation quotidienne des mécanismes de défenses contre le stress oxydant avec des cures d'exposition à la CCE permettait d'améliorer les réponses anti-oxydantes de l'organisme chez des sujets sportifs comme chez des sujets sains (Dugue et al., 2005; Lubkowska et al., 2008; Lubkowska et al., 2010; Miller et al., 2012). La CCE permettrait de neutraliser la production de radicaux libres en stimulant l'activité d'antioxydants enzymatiques tels que la superoxyde dismutase, la catalase ou encore la glutathion peroxydase ou non enzymatique comme l'acide urique. Placée avant un exercice, la CCE permettrait également de diminuer le stress oxydant induit par cet exercice (Wozniak et al., 2007a).

Chez les sujets atteints de sclérose en plaque, maladie neurologique auto-immune chronique du système nerveux central où le stress oxydant joue un rôle délétère majeur, il a été montré que l'effet antioxydant de la CCE pouvait soulager les patients en limitant la fréquence d'apparition et l'intensité des poussés (Miller et al., 2016; Miller et al., 2011a; Miller et al., 2011b).

b) Influence de la cryothérapie corps entier sur les syndromes inflammatoires

De manière générale, l'inflammation est connue comme étant une réaction de l'organisme, des organes ou de leurs structures à une lésion ou un dommage cellulaire et tissulaire. La réaction inflammatoire peut être locale mais peut également induire des réactions du corps entier. L'ampleur de la réaction dépend de la nature et de l'ampleur de la lésion et de la capacité des mécanismes de défense du corps. La phase inflammatoire peut être chronique ou aiguë. L'inflammation aiguë est un mécanisme de protection principalement mis en action pour limiter et éliminer les dommages induits. En revanche, la phase inflammatoire est généralement déplaisante puisque celle-ci peut-être est accompagnée de douleur, de chaleur, d'œdème, et d'incapacité fonctionnelle. L'inflammation chronique découle la plupart du temps d'un développement de la phase aiguë provoquée par la détérioration continue ou le mauvais traitement des tissus lésés. Elle peut également provenir d'une pathologie chronique, souvent articulaire, ou encore pour des individus en situation d'obésité.

La CCE va induire une diminution des symptômes inflammatoires grâce à plusieurs mécanismes. La vasoconstriction des vaisseaux due à l'exposition au froid va entraîner la diminution du flux sanguin dans les territoires périphériques et dans les tissus lésés ou

enflammés. Le processus métabolique local va ainsi être diminué ainsi que la formation d'œdème. La CCE va également permettre une diminution de la concentration plasmatique en cytokine pro-inflammatoire TNF- α , IL-1 β , IL-2, IL-8, et une augmentation de la concentration en interleukines inhibitrices IL-1 α , en cytokines anti-inflammatoires IL-6 and IL-10 (Banfi et al., 2009a; Jastrzabek et al., 2013; Lubkowska et al., 2011; Pournot et al., 2011b).

c) Influence de la cryothérapie corps entier sur le système nerveux autonome

Les indices de variabilité de la fréquence cardiaque ainsi que la concentration sanguine en catécholamines sont classiquement utilisés pour évaluer les fluctuations du système nerveux autonome en réponse à des stimuli tels que le froid ou encore l'exercice. Le système nerveux est composé de deux branches, une branche sympathique et une branche parasympathique, qui ont un rôle de modulateurs cardiaques. Le système nerveux sympathique est dit « cardio-accélérateur » et le système nerveux parasympathique est dit « cardio-décélérateur ». La fréquence cardiaque résulte de l'équilibre de ces deux branches qui fonctionnent en permanence. La prédominance de l'une ou de l'autre branche va entraîner l'accélération ou la décélération de la fréquence cardiaque. Les activités sympathiques et parasympathiques du système nerveux vont agir par l'intermédiaire de neuromédiateurs cholinergiques et adrénergiques : acétylcholine pour le système parasympathique et catécholamine (dopamine, adrénaline, noradrénaline) pour le système sympathique. Ces indicateurs sont intéressants dans la mesure où ils nous renseignent sur l'activité du système nerveux autonome. L'activité du système nerveux parasympathique est d'autant plus importante car elle est connue comme étant indicatrice d'une bonne condition physique, une activité parasympathique élevée permet de récupérer plus rapidement, mais également comme permettant de diminuer les risques d'accidents cardiovasculaires (Bieuzen et al., 2015).

Il a été démontré que la concentration plasmatique en noradrénaline augmentait de manière importante après une seule exposition à la CCE, indiquant une activité importante du système nerveux sympathique lié à l'exposition au froid (Hauswirth et al., 2013b). De plus, cette concentration de noradrénaline plasmatique augmente systématiquement après chaque CCE et reste élevée dans le temps (Leppaluoto et al., 2008). Ceci peut expliquer la diminution de la douleur et l'apparition d'un état de bien-être observées après les expositions. L'augmentation de l'activité sympathique et de la noradrénaline est liée aux mécanismes de vasoconstriction périphérique. En effet la noradrénaline est le neurotransmetteur utilisé par le système sympathique pour induire la vasoconstriction périphérique en réponse à l'exposition au froid. Ce mécanisme permet de déplacer le sang vers les territoires internes pour empêcher une

diminution trop importante de la température centrale et pour protéger les organes (figure 16). La concentration sanguine en dopamine augmente également avec l'exposition, renforçant le sentiment de bien-être (Hauswirth et al., 2011).

Les indices de variabilité de la fréquence cardiaque, indicateur de l'activité du système nerveux parasympathique augmentent également, il y a donc une mise en action de ce système. La mise en activation du système nerveux parasympathique pour permettre la diminution de la fréquence cardiaque va être induite par la stimulation de deux types de récepteurs :

- Les barorécepteurs artériels placés dans la crosse aortique vont être sensibles à l'augmentation de la pression artérielle systolique et diastolique causée par la redistribution du sang vers les territoires centraux. Ce phénomène est connu sous le nom d'activation de l'arc baroréflexe.
- Les récepteurs sensoriels placés sur la face vont être stimulés par l'exposition au froid, c'est l'activation du système réflexe trigéminaux cardiaque.

La CCE va donc induire une augmentation de l'activité du système nerveux sympathique dans un premier temps, puis du système nerveux parasympathique dans un second temps. L'activation du système nerveux autonome va permettre une protection cardiaque plus importante et l'amélioration du bien-être et de la relaxation. De plus, dans le cadre sportif, elle va améliorer la récupération par l'accélération de l'élimination des déchets métaboliques et de la diminution de la fréquence cardiaque (Hauswirth et al., 2013b; Schaal et al., 2013).

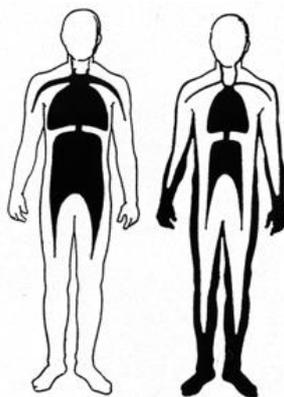


Figure 16 : Répartition du froid dans le corps en fonction de l'ambiance atmosphérique froide (à gauche) et chaude (à droite)

d) Influence de la cryothérapie corps entier sur l'activité du système immunologique

Au niveau immunologique, il a été montré une augmentation en leucocytes, monocytes et lymphocytes (sans toutefois excéder les valeurs normales) (Lubkowska et al., 2010). Les risques d'infections respiratoires des voies supérieures sont élevés chez le sportif produisant des grosses charges d'entraînement du fait de la diminution des défenses immunitaires ou encore de l'augmentation des hormones de stress (Nieman, 1994). La CCE permettrait de diminuer ces risques infectieux en limitant cette altération immunitaire post-exercice.

e) Influence de la cryothérapie corps entier sur les fonctions cardiopulmonaires

Une étude sur les marqueurs cardiaques NTproBNP, hsCRP et troponine I sur 10 rugbymen professionnels a démontré qu'il n'y avait aucun effet délétère de la CCE sur les fonctions cardiaques (Banfi et al., 2009b). Elle augmente en revanche les pressions artérielles systolique et diastolique et serait donc déconseillée pour des personnes atteintes d'hypertension (Lubkowska and Szygula, 2010).

Les effets de la CCE sur la fonction pulmonaire sont assez disputés. Une étude chez des sujets sains a montré une légère bronchoconstriction suite à une séance de 2 minutes (Smolander et al., 2006). D'après cette étude, il n'y a pas d'amélioration des fonctions pulmonaires due à la CCE et pas d'effets nuisibles non plus. Il faudrait cependant rester vigilant avec des patients asthmatiques. A contrario, une étude a démontré un effet légèrement bronchodilatateur (Engel et al., 1989) et une étude chez des patients asthmatiques a révélé une amélioration de la fonction pulmonaire après plusieurs semaines d'exposition (Yamauchi, 1988).

f) Influence de la cryothérapie corps entier sur les états d'anxiété et de dépression

La CCE permet une relaxation plus importante, un sommeil de meilleure qualité et une augmentation du bien-être (Hauswirth et al., 2011; Schaal et al., 2014). Elle influence également la diminution des états d'anxiété et de dépression et l'amélioration de l'état mental chez des patients atteints de pathologies circulatoires, rhumatismales, inflammatoires et traumatologiques (Rymaszewska and Ramsey, 2008; Rymaszewska et al., 2008; Szczepanska-Gieracha et al., 2013). Des améliorations de l'humeur, de la relaxation et de l'euphorie ont été observées immédiatement après exposition. De plus, ces changements persisteraient en plus longtemps après la fin d'un cycle de traitement par CCE.

g) Influence de la cryothérapie corps entier sur les douleurs musculaires post exercices

Au niveau musculaire, des exercices de haute intensité peuvent créer des douleurs qui peuvent être immédiates et durer plusieurs jours, les DOMS (Delayed Onset Muscle Soreness), ou courbatures. Ce phénomène est lié à des lésions cellulaires consécutives à la réponse inflammatoire et à l'association excitation-contraction lors de la réalisation d'un exercice inhabituel ou très intense. Les courbatures entraînent une baisse des performances musculaires et la restauration complète de ces capacités peut prendre jusqu'à deux semaines, ce qui peut interférer avec les entraînements et les compétitions (Costello, 2013) Il a été démontré que la CCE permettait une récupération musculaire de force et de force-vitesse plus rapide et une diminution des douleurs après des exercices induisant des dommages musculaires comme des exercices pliométriques et des simulations de trail (Ferreira-Junior et al., 2014a; Ferreira-Junior et al., 2014b; Fonda and Sarabon, 2013; Hausswirth et al., 2011). L'exposition au froid va permettre un effet analgésique par la libération de noradrénaline mais également par la diminution de la vitesse de conduction nerveuse (Hausswirth et al., 2013b; Herrera et al., 2011). L'exercice physique va induire des microtraumatismes dans les fibres musculaires des muscles squelettiques, probablement à cause de la peroxydation lipidique provoquée par l'augmentation des radicaux libres. Ces lésions des cellules et des membranes sarcoplasmiques vont être accompagnées d'une accumulation du calcium intracellulaire et d'une diminution de la production de force musculaire et vont provoquer des perturbations au sein même de la myofibrille. Ces changements structurels vont être suivis d'une augmentation de la libération de certaines enzymes intracellulaires, notamment les lysosomes hydrolases telles que la phosphatase acide, l'arylsulphatase et la cathepsine D (Wozniak et al., 2007b). Il a été démontré chez des kayakistes de haut niveau que la concentration de ces enzymes étaient moins importantes après l'exercice lorsque celui-ci était précédé d'une exposition à la CCE (Wozniak et al., 2007b). La CCE réduirait l'expansion des lésions des fibres musculaires par le maintien de l'équilibre de la balance pro-anti-oxydante et l'augmentation de la stabilité membranaire lysosomale des cellules musculaires grâce à l'augmentation de l'hormone adrénocorticotrophine (Wozniak et al., 2013; Wozniak et al., 2007a; Wozniak et al., 2007b; Zagrobelny et al., 1992). De plus, la CCE avant l'exercice limite l'apparition du cortisol plasmatique, marqueur du stress physique, et de la créatine kinase, marqueur de la dégradation des fibres musculaires (Wozniak et al., 2007b). La CCE va donc atténuer le stress induit par l'exercice, augmenter la stabilité membranaire lysosomale et réduire les microtraumatismes des fibres musculaires.

h) Influence de la cryothérapie corps entier au niveau hématologique chez le sportif

Une activité physique importante, notamment pour le cas des sportifs de haut niveau, peut être à la base d'une anémie. Les causes de cette anémie peuvent provenir d'une hémodilution au cours de l'activité, d'un apport insuffisant en fer, ou encore plus particulièrement de la perte de fer lors de l'hémolyse intravasculaire, survenant généralement pendant l'exercice. De ce fait, le renouvellement du fer est accéléré chez les athlètes, notamment dans les sports d'endurance. Ce phénomène est induit par les impacts créant des microtraumatismes, à la contraction musculaire, et aux changements osmotiques qui vont causer une fragilité membranaire, notamment après l'exercice avec l'augmentation de la concentration en radicaux libres. Si la moelle osseuse ne reproduit pas assez rapidement de globule rouge en réponse à cette hémolyse, le risque d'anémie va augmenter. Les effets de la CCE sur l'hémolyse ont été étudiés chez des rugbymen professionnels (Banfi et al., 2009c). Il a été observé que le taux d'haptoglobine plasmatique (indicateur de l'anémie) ainsi que le volume cellulaire sphérique moyen des globules rouges augmentaient. Ces résultats, ajoutés à l'absence d'augmentation de la concentration corpusculaire moyenne et des réticulocytes, démontrent que la CCE peut être utilisée comme un traitement préventif à l'anémie induite par l'activité physique.

i) Influence de la cryothérapie corps entier sur la performance sportive

Plusieurs études se sont intéressées aux effets de la CCE sur la performance sportive. Klimek et al. (2010) (Klimek et al., 2010) ont évalué les effets de la CCE sur des exercices sur ergocycle. Quinze hommes et quinze femmes ont dû réaliser un test de $VO_2\text{max}$ pour évaluer leur capacité aérobie et un test de Wingate (30 s) pour évaluer leur capacité maximale anaérobie. Les sujets ont ensuite subi un traitement de 10 expositions de 3 minutes à $-130\text{ }^\circ\text{C}$ puis ont répété les exercices sur ergocycle. Cette étude a démontré que le traitement CCE augmentait la puissance maximale anaérobie chez les hommes (et non chez les femmes). Le pic de puissance développée chez les hommes passe de $11,1\text{ W/kg}^{-1}$ en moyenne pour la condition contrôle à $11,9\text{ W/kg}^{-1}$ pour la condition CCE, de même que la puissance moyenne développée pour le test passe de 724 W à 756 W et que le travail total passe de 13,8 à 14,5 KJ. Le temps moyen mis par les sujets pour arriver à leur puissance maximale développée passe également de 6,7 s pour la condition contrôle à 5,9 s pour la condition CCE. En revanche il n'y avait pas d'impact sur la capacité aérobie. La CCE aurait alors un impact pour les disciplines impliquant des qualités de force et de vitesse. Une seconde étude de Klimek et al. (2011) (Klimek et al., 2011) avait pour but d'évaluer les effets de la CCE sur la capacité maximale anaérobie. Les sujets

devaient réaliser un test Wingate de 20 s, puis effectuer 6 expositions, à raison d'une par jour, pendant 3 minutes à -130 °C. Après chaque exposition, ils réalisaient à nouveau un test Wingate placé à 15, 30, 45, 60, 75 ou 90 minutes après être sorti de la chambre, dans un ordre aléatoire. La CCE a eu une légère influence sur la performance lors de cet exercice court à intensité supra maximale. La moyenne de la puissance développée était toujours supérieure à la suite d'une exposition que la valeur de base avant la première exposition. La moyenne la plus élevée a été réalisée 75 minutes après l'exposition (838 W contre 830 W avant l'exposition). En revanche, la puissance moyenne développée a diminué chez les femmes, notamment après 30 minutes où elle était de 478 W contre 501 W avant l'exposition. Cette étude montre, elle aussi, que les sujets atteignaient plus rapidement leur puissance maximale anaérobie après exposition. D'autres études ont mis en avant l'absence d'effet de la CCE sur les capacités aérobies et anaérobies (Dybek et al., 2012; Lubkowska and Szygula, 2010).

Westerlund et al. (2009) (Westerlund et al., 2009) ont étudié l'impact de la CCE sur la performance neuromusculaire chez 10 sujets sains. Les sujets ont été exposés 3 fois par semaine pendant 3 mois à -110 °C et pendant 2 minutes. Ceux-ci ont dû réaliser, avant la première exposition, après la quatrième exposition et à la fin des 3 mois, un exercice de drop-jump. Les résultats ont démontré qu'il y avait une adaptation de la fonction neuromusculaire à la CCE à la suite de plusieurs expositions. Une simple exposition diminue le temps de vol sur l'exercice du drop-jump, mais la répétition d'expositions fait disparaître ce changement. En revanche, la CCE ne permet pas une amélioration de la fonction neuromusculaire (Vieira et al., 2015).

Une étude sur des nageuses professionnelles en natation synchronisée a montré que pour la répétition d'un exercice, les nageuses atteignaient des valeurs de pic de VO₂ plus élevées lorsqu'elles effectuaient une séance de CCE entre les deux exercices (Schaal et al., 2013). De plus, la réactivation de leur système nerveux parasympathique post exercice était plus prompte après la CCE.

Synthèse :

- l'utilisation du froid est connue depuis l'antiquité. Néanmoins, le développement de la CCE est assez récent ;
- d'après la littérature scientifique, la CCE a de nombreux effets bénéfiques dans le soulagement de la douleur et dans la récupération sportive ;
- cette ouverture bibliographique permet la détermination de publics cibles pouvant bénéficier des bienfaits de la CCE.

CHAPITRE 2 : PRESTATIONS ET ETUDES REALISEES EN COMPETITIONS SPORTIVES

1. Prestations réalisées au cours de la thèse

a) Introduction

La société Cryantal a été créée en 2011 pour effectuer des prestations de cryothérapie corps entier sur le Tour de France. En 2012, deux camions ont été équipés pour pouvoir couvrir les prestations (figure 17). C'est dans ce cadre que j'ai effectué mon premier travail avec la société Cryantal. Le but était d'acquérir une expérience de terrain (prise en main de la technologie et échanges avec le milieu professionnel) et de prélever des données susceptibles de contribuer au développement de nos prestations.

Les prestations sportives réalisées ont été :

- la Vuelta, (tour d'Espagne de cyclisme) du 18 août au 09 septembre 2012, avec deux équipes cyclistes professionnelles ;
- deux étapes de la coupe du Monde de skicross, Val Thorens du 17 au 19 décembre 2012 et Megève du 14 au 16 janvier 2013, avec l'équipe de France de skicross ;
- le tournoi International de préparation à l'Euro de basketball féminin à Villeurbanne du 27 au 31 mai 2013, avec l'équipe de France de basketball féminine ;
- le tournoi International de préparation à l'Euro de basketball masculin à Strasbourg du 07 au 12 août 2013, avec l'équipe de France de basketball masculine.

De manière générale, les expositions étaient des expositions de 3 minutes à -130 °C effectuées après les entraînements et les compétitions. Les athlètes passaient rapidement dans le camion pour faire leurs expositions et repartaient aussi vite. Lors des stages et compétitions, ils ont un emploi du temps très chargé entre les déplacements, les briefings, les retours vidéo, les conférences de presse, les massages et manipulations ostéopathiques, les repas, les siestes, etc. Il était donc très difficile de réaliser des mesures qui aurait accaparées trop de temps aux athlètes.

En revanche, une première variable importante à mesurer et la perception des sensations thermiques des athlètes pendant l'exposition. Cette variable n'a jamais été mesurée alors qu'elle est indispensable. Le niveau de stress est élevé en situation de compétition (Filaire et al., 2001),

il est donc important de vérifier que la CCE n'est pas vécue comme une contrainte de stress supplémentaire.



Figure 17 : Les deux camions Cryantal utilisés sur la Vuelta

Perception des sensations thermiques

La première étude de terrain a donc été basée sur l'évaluation des sensations thermiques des athlètes en compétition. Au cours des prestations, nous avons demandé aux athlètes d'évaluer la perception de leur sensation thermique toutes les 30 secondes (figure 18). Cette étude a été mise en place pour observer la difficulté pour les athlètes d'être exposé au froid intense et pour voir s'il existait des différences interindividuelles.

Perception de la qualité du sommeil

Le sommeil est un des piliers de la récupération sportive. Un sommeil de qualité est en effet primordial pour assurer la récupération des processus cognitifs et des fonctions métaboliques indispensables à la performance (Samuels, 2008). Une seule nuit de sommeil perturbée peut provoquer une altération des fonctions psychomotrices (Reilly and Edwards, 2007). Il est en outre difficile pour les athlètes d'avoir un sommeil paisible au cours des compétitions. Premièrement, le stress induit par la compétition provoque des troubles du sommeil (Hauswirth et al., 2013a) et deuxièmement, les aléas de la compétition mentionnés plus haut (déplacement, repas, récupération, conférence de presse, ...) empêchent les athlètes de se coucher tôt. Au regard des témoignages de plusieurs athlètes qui rapportaient une amélioration de la qualité de leur sommeil les nuits successives aux expositions, nous avons décidé de mesurer la perception de la qualité de leur sommeil. L'évaluation de la qualité perceptive du sommeil des athlètes la nuit après les expositions a donc été le second paramètre mesuré lors des prestations effectués sur les compétitions.



Figure 18 : Evaluation de la perception de la sensation thermique lors d'une session de CCP. Photographie Pressesports

Des mesures perceptives ont été mise en place pour mesurer la perception de la sensation thermique et de la qualité du sommeil chez les athlètes. Le but était d'analyser la contrainte thermique imposée aux athlètes lorsqu'ils effectuaient une exposition et d'observer les éventuels effets des expositions sur la qualité du sommeil en phase de compétition.

Deux travaux scientifiques, un article original et un acte de congrès, ont été publiés avec les relevés issus de ces prestations. Ils ne concernent malheureusement que les joueurs de basketball car ils représentaient le seul échantillon assez important pour pouvoir prétendre faire une analyse scientifique. Le mélange des athlètes issus de différentes activités induisait un biais méthodologique. Il est difficile de comparer les sensations thermiques des skieurs qui pratiquent une activité de plein air avec des températures négatives et celles des joueurs de basketball qui jouent en salle. Il a donc été décidé d'utiliser les données d'une seule activité en vue d'une publication scientifique. Les autres résultats ont été rapportés dans des comptes rendus envoyés aux équipes concernées. Quelques exemples seront présentés dans ce document.

b) Méthodes utilisées

Quarante-sept athlètes de haut niveau ont participé ont répondues aux évaluations perceptives. Quinze femmes (treize joueuses de basketball et deux skieuses) et trente-deux hommes (quatorze cyclistes, onze joueurs de basketball et sept skieurs). Leurs caractéristiques sont présentées dans le tableau 2. Les relevés ont été effectués avec leurs accords et ceux de leurs équipes. Ils ont été réalisés au cours de leur exposition et n'ont en rien perturbé leur quotidien sur les compétitions.

Tableau 2 : Caractéristiques des athlètes de haut niveau présents au cours des prestations

	ATHLETES	TOUS	CYCLISTES	SKIEURS	JOUEURS DE BASKETBALL
AGE	Tous	26,2 ± 4,2	-	22,6 ± 1,6	25,8 ± 3,5
	Hommes	26,7 ± 4,5	29,4 ± 4,4	23,0 ± 1,4	25,5 ± 3,6
	Femmes	25,3 ± 3,7	-	21,0 ± 1,4	25,9 ± 3,5
POIDS (kg)	Tous	81,0 ± 15,4	-	80,4 ± 10,4	88,5 ± 15,7
	Hommes	83,0 ± 16,7	68,5 ± 7,6	85,3 ± 4,6	100,2 ± 12,4
	Femmes	76,5 ± 11,2	-	63,5 ± 0,7	78,5 ± 10,7
TAILLE (cm)	Tous	185,7 ± 12,0	-	177,0 ± 8,8	192,5 ± 11,8
	Hommes	187,3 ± 12,5	179,6 ± 5,9	179,6 ± 7,2	201,9 ± 7,2
	Femmes	182,3 ± 10,2	-	168,0 ± 9,9	184,5 ± 8,6
IMC (kg.m⁻²)	Tous	23,3 ± 2,7	-	25,7 ± 3,0	23,7 ± 2,3
	Hommes	23,5 ± 2,9	21,2 ± 1,3	26,5 ± 2,7	24,5 ± 2,0
	Femmes	23,0 ± 2,3	-	22,6 ± 2,4	23,0 ± 2,4

Perception de la sensation thermique

La perception du confort thermique a été relevée grâce à l'échelle de confort thermique de Lundgren graduée de 0 « Neutre » à 10 « Froid insupportable », qui a été validée pour l'évaluation des sensations thermiques perceptives des individus exposés à un environnement extrêmement froid (Lundgren et al., 2014). Elle était présentée aux athlètes toutes les 30 secondes au cours de l'exposition. Ils devaient répondre à la question « Actuellement, quelle est votre sensation thermique ? » (Figure 19).

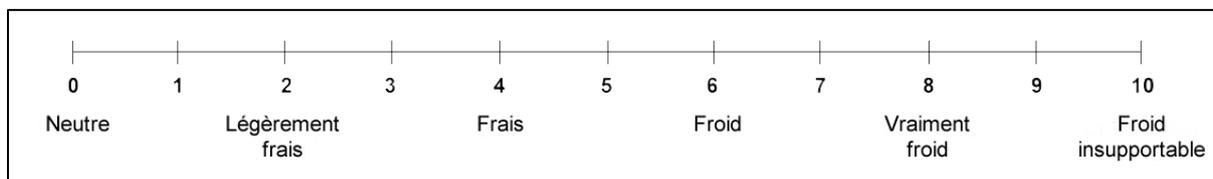


Figure 19 : Echelle de perception de la sensation thermique

Perception de la qualité du sommeil

La qualité du sommeil perceptive a été relevée grâce à un questionnaire de perception de la qualité du sommeil de Spiegel (Spiegel, 1982). Les athlètes devaient répondre à la question

« La nuit dernière, avez-vous bien dormi ? » et répondre sur l'échelle graduée de 0 « Je n'ai pas dormi » à 5 « Oui, de façon parfaite (d'un sommeil paisible, sans réveil nocturne) » (figure 20).

Qualité du sommeil : Avez-vous bien dormi ?	
5	Oui, de façon parfaite (d'un sommeil paisible, sans réveil nocturne)
4	Oui, bien
3	Moyennement bien
2	Non, mal
1	Non, très mal (sommeil agité, réveils fréquents)
0	Je n'ai pas dormi

Figure 20 : Questionnaire de qualité du sommeil

2. Prestations réalisées avec les équipes de France de basketball homme et femme

Les résultats de ce travail ont fait l'objet de deux publications scientifiques. La première est liée aux résultats de l'étude sur les sensations thermiques et la seconde sur la qualité du sommeil des joueurs de basketball de l'équipe de France homme et femme.

L'étude sur la sensation thermique perceptive¹ a été soumise dans la revue à comité de lecture international « Journal of Human Kinetics ».

L'étude sur la qualité perceptive du sommeil² (Bouzigon et al., 2014) a fait l'objet d'une communication affichée lors de la Conférence Mondiale du Comité International Olympique sur la prévention des blessures et maladies dans le sport à Monaco en 2014. L'extrait de cette communication a ensuite été publié dans une édition spéciale de la revue à comité de lecture internationale « British Journal of Sport Medicine » :

¹ « Thermal sensations during a partial-body cryostimulation exposure in international-level athletes »

² « The use of Whole-body Cryostimulation to improve the quality of sleep in athletes during high level standard competitions »

a) Étude 1 : Résumé**Thermal sensations during a partial-body cryostimulation exposure in international-level athletes***Bouzigon R, Ravier G, Grappe F, Dugue B.*Objectif :

Cette étude a été mise en place pour évaluer les sensations thermiques perceptives des joueurs des équipes de France de basketball homme et femme au cours des expositions de CCP réalisées pendant une compétition. Les buts étaient de vérifier 1) que les expositions n'étaient pas subies comme des contraintes trop importantes pour les athlètes en compétition et 2) s'il existait des différences de perception des sensations thermiques en fonction de l'indice de masse corporel des joueurs.

Méthode :

Cette étude s'est déroulée sur les tournois internationaux de préparation de l'Euro en 2013. Vingt-quatre joueurs de l'équipe de France de basketball (13 femmes et 11 hommes) ont participé à cette étude. Ils réalisaient des expositions de 3 minutes à -130 °C . Les sensations thermiques perceptives étaient relevées toutes les 30 secondes au cours de l'exposition grâce à l'échelle de perception des sensations thermiques de Lundgren (Lundgren et al., 2014) graduée de 0 « sensations thermiques neutres » à 10 « sensations thermiques insupportables ». Elles ont ensuite été comparées en fonction de l'indice de masse corporel des joueurs.

Résultats :

Les sensations thermiques perceptives augmentent au cours de l'exposition ($p < 0,05$) de $3,0 \pm 1,7$ à 30 sec à $5,7 \pm 2,3$ à 3 min (valeur maximale observée = 10,0). La valeur moyenne la plus élevée relevée au bout de 3 minutes (5,7) correspond à une sensation thermique « froide » sur l'échelle de Lundgren. Une large variation interindividuelle a été trouvée au niveau des sensations thermiques. L'indice de masse corporel était corrélé négativement avec les valeurs de sensations thermiques à partir de 2 minutes 30 d'exposition chez les femmes.

Discussion :

La valeur moyenne maximale des sensations thermiques relevée à 3 minutes d'exposition correspond à une valeur froide. Les expositions à la CCP ne semblent alors pas être trop contraignantes pour les joueurs. L'indice de masse corporel a un effet sur la perception des sensations thermiques. Chez les femmes, un indice de masse corporel moins important entraîne une perception de sensations thermiques plus froide.

Conclusion :

L'utilisation de la CCP pendant une compétition ne semble pas être trop contraignante pour les athlètes. Il faut cependant faire attention aux athlètes avec un faible indice de masse corporelle, notamment chez les femmes.

**Thermal sensations during a partial-body cryostimulation exposure in
international-level athletes**

BOUZIGON Romain ^{a, c}, RAVIER Gilles ^a, GRAPPE Frederic^a, DUGUE Benoit ^b

^a Université de Franche Comté, Laboratoire C3S (EA 4660), Unité de Promotion, de Formation et de Recherche (UPFR) des Sports, 31 rue de l'Épitaphe, 25000 Besançon, France.

^b Université de Poitiers, EA 6314, laboratoire « Mobilité, Vieillessement et Exercice (MOVE) », Faculté des sciences du sport, 86000 Poitiers, France.

^c Société Cryantal Développement, 15 cours du Lizard, 77186 Noisiel, France.

Abstract

Partial-body cryostimulation (PBC) is used to improve recovery after exercise, especially during competitions or heavy training; however, a limited number of studies have been conducted with international-level athletes *in situ* during competitions. This study was undertaken to assess the thermal sensation ratings during 3 min of cold exposure (at $-130\text{ }^{\circ}\text{C}$) in 24 international-level athletes during the European Basketball Championship. The mean thermal sensation score, measured using a perceptible scale, increased significantly ($p<0.05$) during PBC exposure in athletes from 3.0 ± 1.7 at 30s to 5.7 ± 2.3 at 3 min (maximal observed value=10.0). The mean value of 5.7 is considered a “cold” sensation on the scale (ranging from 0=neutral sensation to 10=very cold). However, we observed a large inter-individual variation in the perceived thermal sensations. Body mass index (BMI) was significantly and negatively correlated with the thermal sensation value after 2 min 30 s and 3 min of exposure in females ($r=-0.61$, $n=13$, $p<0.05$; $r=-0.56$, $n=13$, $p=0.054$, respectively). Three participants reported high perceived thermal sensation after 30s of exposure and their cold-induced discomfort worsened as the exposure continued. In conclusion, a 3-min exposure is globally well tolerated by athletes and can be used during a heavy competition period and/or during a training period. However, special attention should be given to female athletes with a low BMI as they seem to be much more sensitive to cold.

Keywords: Competition – Cryotherapy –International-level athletes – Perceived cold sensation – Recovery

1. Introduction

Partial body cryostimulation (PBC) consists of extreme cold exposure lasting 1 to 4 min in a cabin with an air temperature of $-130\text{ }^{\circ}\text{C}$ (according to the manufacturer) or less in minimal clothing (a bathing suit, cap, gloves, socks, slippers) (1). PBC apparatus is an open cabin where subjects, excluding the head and neck, is exposed. This technique is used to treat pain and inflammation, to recover faster after injuries or surgery, to improve the quality of life in patients suffering inflammatory pathologies and to recover faster after physical exercise (2-5). Though not completely clear, the mechanism leading to recovery improvement seems to be related to cold-induced analgesia and a lower level of exercise-induced inflammation (6-8). The stimulation of the sympathetic system, the release of noradrenalin and the vasoconstriction during and after the cold exposure have a significant impact on pain and muscle soreness (8). Muscle cooling during and after the cold exposure may also lower enzyme activities, lower metabolism and limit protein degradation after exercise-induced ischemia, which can be an important feature for recovery improvement (9, 10). Moreover, athletes using PBC during high-level international tournaments seems to have an enhanced quality of sleep (11). PBC, has therefore been well accepted by many athletes and professional sport teams (12). PBC is available in a mobile device which enables its use at training and competition sites.

Benefits of PBC for physical recovery improvement has been demonstrated (1). However, whether an exposure at $-130\text{ }^{\circ}\text{C}$ or less is well tolerated by athletes during a competition is questionable. Such exposures could be perceived as too painful, stressful and even dangerous and could lower or eliminate the beneficial effects of cryostimulation. During competition, psychological stress increases in athletes (13). Moreover, international-level athletes are subjects with very special kinds of psychological and physiological adaptations, and during high levels of stress (e.g. during international competition), they may react differently (14, 15)

than during periods of lower amounts of physical and psychological loads. Such changes may have an influence in the athlete's thermal sensitive capacities (14). At the current time, there are no data available concerning cold-perceived sensation in international athletes (16), and therefore it is important to assess the thermal sensation during cold exposure in international-level athletes during the competitive period.

Anthropometric characteristics and especially body mass index (BMI) are known to influence thermal transfer in humans subjected to cold stimuli (4, 17-20) and therefore may influence perceived thermal sensations. Moreover, it seems that gender may also have an effect as females show a different level of perceived thermal sensation than males when exposed to cold stimuli (21).

This study was undertaken to assess the thermal sensation ratings during 3 min of cold exposure (at $-130\text{ }^{\circ}\text{C}$) in international-level athletes during international competitions. We examined whether a 3-minute PBC exposure at $-130\text{ }^{\circ}\text{C}$ remains comfortable for international-level athletes; whether male and female athletes perceive the cold stimulus in a similar way and whether athletes with a lower BMI perceive the cold stimulus in a similar way compared to athletes with a higher BMI. The data obtained in this study should therefore be useful in the world of professional sports, and teams could obtain information on whether PBC is or is not too stressful for the athletes during competitions.

2. Methods

2.1. Participants

Twenty-four international-level basketball players (13 females and 11 males, aged 25.7 ± 3.5 years) from the French national team participated in this study. The athletes' characteristics are presented in Table 1 and were obtained from the team organisers. We calculated the BMI,

which is the body mass divided by the square of the body height. Thorough investigations of the athletes were not possible in the context of the European Basketball Championship.

Table 1: Characteristics of the 24 athletes (expressed as the mean \pm standard deviation)

	All	Males	Females
Age (years)	25.7 \pm 3.5	25.5 \pm 3.6	25.9 \pm 3.5
Weight (kg)	88.5 \pm 15.7	100.2 \pm 12.4	78.5 \pm 10.7
Height (cm)	192.5 \pm 11.8	201.9 \pm 7.2	184.5 \pm 8.6
BMI	23.7 \pm 2.3	24.5 \pm 2.0	23.0 \pm 2.4

All the participants were informed about the experimental procedure and the purpose of this study and gave written informed consent. The protocol was approved by the local ethics committee and adhered to the latest amendments of the Declaration of Helsinki.

2.2. Procedures

This field study occurred during the 2013 European Basketball Championship preparation tournament. Cold exposure was performed using PBC apparatus (Universal Cryosana; Mecacel, Mouroux, France), and cooling of the cryocabin was performed with nitrogen spraying inside the chamber. Although the cryo spray did not directly touch the athlete's skin, the temperature through the exposure was adjusted with the nitrogen supply. The PBC device was equipped with adjustable walls enabling athletes of different heights to have similar exposure. The PBC procedure was a 3-min exposure at -130°C that occurred in the afternoon after training (between 4 and 9 pm). Such a protocol is regularly used in the exercise recovery context and has been shown to provide benefits in athletes (22-24). In the cryocabin, athletes wore underwear, gloves, socks and slippers.

The perception of thermal sensation during exposure within the cryocabin was recorded every 30 s. The participants were asked to rate their perceptual thermal sensation using a ten-point scale (25), which has been shown to be valid and reliable to assess human thermal perception in an extremely cold environment (25).

The scale was shown to the participants every 30 s, and the following question was asked: “How are you feeling now?” The athletes answered verbally from 0 (“neutral”) to 10 (“unbearably cold”) (Figure 1), and the given score was noted.

It was not possible to performed other assessments on athletes during competition.

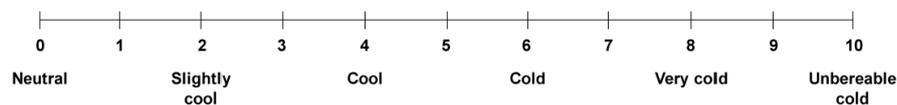


Figure 1: Thermal sensation scale

2.3. Statistical analysis

The statistics program used was Sigmaplot 12.0 Software (Systat Inc. San Jose, CA, USA). The results were expressed as mean and standard deviation (SD). The changes in the evolution of the thermal sensation scores during the exposures in male and female athletes were analysed by two-way analysis of variance (ANOVA) with repeated measures. Thus, the evolution of the thermal sensation score over time during the exposure was analysed in men and women and compared. We used logarithmic transformation for the analyses as the data distribution was not Gaussian, i.e. for the comparison between males and females and for time of exposure. Post hoc comparison was performed using the Tukey/Kramer test. Correlation analyses between BMI and thermal sensation were performed using the Spearman test. The level of statistical significance was set at $p < 0.05$.

3. Results

Thermal sensation increased every 30 s during PBC exposure in both male and female athletes and in all athletes ($p < 0.001$). The comparisons between each time interval are shown in Table 2. Thermal sensation rapidly increased during the first minute and increased more slowly during the final two minutes.

The evolution of the thermal sensation scores during exposure was similar in males and females (no significant interaction). The data obtained at each measurement time are shown in Table 2.

Table 2: Perception of thermal sensation (Mean \pm SD) and extremes observed values in brackets during a 3-min whole-body cryostimulation exposure in 24 athletes

	30 s	60 s	90 s	120 s	150 s	180 s
All athletes	3.0 \pm 1.7* (0.0 – 7.0)	3.8 \pm 1.7 [§] (0.0 – 7.5)	4.3 \pm 1.7 (0.0 – 8.0)	4.7 \pm 1.9 [§] (0.0 – 9.0)	5.3 \pm 2.1 ^{**} (0.0 – 9.5)	5.7 \pm 2.3 (0.0 – 10.0)
Males	2.9 \pm 1.6 [†] (1.0 – 6.0)	3.8 \pm 1.4 ^{†§} (2.0 – 6.0)	4.5 \pm 1.5 (2.0 – 8.0)	4.9 \pm 1.6 (3.0 – 9.0)	5.5 \pm 1.9 (3.0 – 9.5)	6.0 \pm 1.9 (3.0 – 10.0)
Females	3.1 \pm 1.8 [†] (0.0 – 7.0)	3.8 \pm 2.0 ^{†§} (0.0 – 7.5)	4.2 \pm 1.9 (0.0 – 8.0)	4.6 \pm 2.1 ^{†§ **} (0.0 – 8.0)	5.2 \pm 2.4 ^{§ **} (0.0 – 9.0)	5.5 \pm 2.6 (0.0 – 9.0)

(Abbreviations: * significantly different from the data obtained at other time points; Value significantly different from the data obtained at other time points: except for 30s: [†]; except for 60s: [‡]; except for 90s: [§]; except for 120s: ^{||}; except for 150s: [¶]; except for 180s: ^{**})

In females, BMI became significantly and negatively correlated with thermal sensation during the last minute (at 150 s: $r = -0.61$, $n = 13$, $p < 0.05$; at 180 s: $r = -0.56$, $n = 13$, $p < 0.05$), i.e. female athletes with a lower BMI had more uncomfortable thermal sensations than female athletes

with a higher BMI (Figure 2). No significant correlations between BMI and perceived thermal scores were found in any participant or in males.

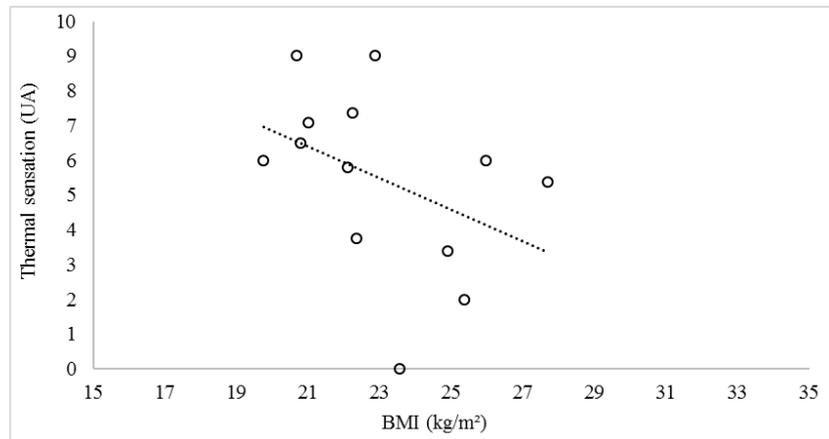


Figure 2: Correlation between thermal sensations after 3 min of exposure and BMI in female athletes

4. Discussion

This study was undertaken to evaluate the thermal sensation during PBC exposure in international-level athletes *in situ* during periods of competition. Relevant and valuable outcomes concerning thermal perception during PBC exposure were obtained.

The main finding of this study is that PBC does not seem to represent a high thermal perceptual strain for the majority of the participating athletes. However, we observed a large inter-individual variation in the perceived thermal sensations. The female athletes with the lowest BMI had the most uncomfortable thermal sensation.

Thermal sensation scores gradually increased during the course of the 3-min exposure, with the scores rapidly increasing during the first minute and then stabilizing during the final two minutes. After the total exposure time (3 min), the mean perceived thermal sensation score was 5.7, which indicates a “cool” sensation. Therefore, a 3-min exposure at $-130\text{ }^{\circ}\text{C}$ did not

appear to add unnecessary strain for the majority of the athletes during the competition phase. The maximum score of perceived thermal sensation (coldest sensation=10) was reached only at 180 s in one subject. The majority of the participants did not feel especially cold after the end of the exposure. Nevertheless, at 30 s, three participants reported relatively high perceived thermal sensation scores (≥ 6), and their cold-induced discomfort worsened as the exposure continued.

The second important finding of this study is the negative correlation between the BMI of the athletes and thermal sensations, especially in females, during the exposure. It seems that the morphology of the participants may influence heat transfer from the body to the environment, especially as the duration of cold exposure increases. Recently, Cholewka et al. (26) demonstrated that the magnitude of the skin temperature response to extremely low temperatures used in WBC was dependent on individual features, such as BMI. Depending on age and sex, BMI has been shown to be closely correlated with body fat (27), and it is known that fat tissues in skin or in muscles may act as thermal insulation. Therefore, the subjects with a lower BMI may be more prone to transfer heat and may be more sensitive to the cold environment. The gender-linked discrepancy in thermal sensation could be related to different thermoregulation abilities in males and females. When exposed to cold environments, females generally have a lower ability to shiver (28). This may explain, in part, the higher scores for cold sensation (more uncomfortable) recorded by females.

It has also been shown that the temperature in an empty cryocabin is lower than in a cryocabin with a participant inside (29). Therefore, the morphology of the participant and the duration of the exposure could influence the temperature inside the cryocabin. Currently, chamber temperature cannot be monitored continuously, and the actual cold stimulation may not have been completely consistent among participants. The only temperature control is performed at the position of the nitrogen nozzle. Recent investigation showed that temperature variation

may occur next to the skin (5–10 °C depending on the subjects) (29). Moreover, significant temperature differences were shown among different body regions due to the colder temperature at the bottom of the cabin (cold air has higher density than warm air). Furthermore, PBC consists of an open tank at the head level that facilitates the entry of warmer air into the system; the system does not provide a constant and homogeneous temperature in the cabin. In our setting, subjects with the lowest BMI may really be more sensitive to cold exposure (higher cold perception), have transferred a higher amount of heat during the exposure or have been subjected to colder temperatures than subjects with a higher BMI.

6. Conclusion and perspectives

Globally, a 3-min exposure at –130 °C is well tolerated by athletes and can be used during a heavy competition period and/or during a training period when the load of physical exercise is very important. PBC is not perceived as extremely uncomfortable or stressful by most athletes; however, special attention should be given to female athletes with a low BMI as they seem to be much more sensitive to cold. Our recently published review emphasizes that further studies should be developed to analyse thermal sensation in connection to the physical characteristics and gender of the participants to be able to provide the most relevant PBC exposure (1). The link found between BMI and cold-perceived sensation should be explored with further analysis including subcutaneous (and even intramuscular) fat content. Technical improvements concerning temperature monitoring during cold exposure are also necessary so that the chamber can be adjusted to a given temperature throughout the exposure and to allow for an even temperature in the chamber.

6. References

1. Bouzigon R, Grappe F, Ravier G, Dugue B. Whole- and partial-body cryostimulation/cryotherapy: Current technologies and practical applications. *Journal of Thermal Biology*. 2016;61:67-81.
2. Banfi G, Lombardi G, Colombini A, Melegati G. Whole-body cryotherapy in athletes. *Sports Med*. 2010;40(6):509-17.
3. Miller E, Kotska J, Wlodarczyk T, Dugue B. Whole body cryostimulation provides benefits for fatigue and functional status in multiple sclerosis patients. *Acta neurologica Scandinavica*. 2016:In Press. DOI: 10.1111/ane.12557.
4. Dugue B, Leppanen E. Adaptation related to cytokines in man: effects of regular swimming in ice-cold water. *Clinical Physiology*. 2000;20(2):114-21.
5. Dugue BM. An attempt to improve Ferreira-Junior model concerning the anti-inflammatory action of whole-body cryotherapy after exercise induced muscular damage (EIMD). *Frontiers in physiology*. 2015;6:35.
6. Hausswirth C, Louis J, Bieuzen F, Pournot H, Fournier J, Filliard JR, et al. Effects of whole-body cryotherapy vs. far-infrared vs. passive modalities on recovery from exercise-induced muscle damage in highly-trained runners. *PLoS one*. 2011;6(12):e27749.
7. Pournot H, Bieuzen F, Louis J, Mounier R, Fillard JR, Barbiche E, et al. Time-course of changes in inflammatory response after whole-body cryotherapy multi exposures following severe exercise. *PLoS one*. 2011;6(7):e22748.
8. Leppaluoto J, Westerlund T, Huttunen P, Oksa J, Smolander J, Dugue B, et al. 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*. 2008;68(2):145-53.

9. Costello JT, Culligan K, Selfe J, Donnelly AE. Muscle, Skin and Core Temperature after -110°C Cold Air and 8°C Water Treatment. *PloS one*. 2012;7(11):e48190.

10. Bleakley CM, Hopkins JT. Is it possible to achieve optimal levels of tissue cooling in cryotherapy? *Physical Therapy Reviews*. 2010;15(4):344-50.

11. Bouzigon R, Ravier G, Dugue B, Grappe F. The use of whole-body cryostimulation to improve the quality of sleep in athletes during high level standard competitions. *British journal of sports medicine*. 2014;48(7):572.

12. Banfi C, Melegati G, Barassi A, Dogliotti G, Melzi d'Eril G, Dugue B, et al. Effects of whole-body cryotherapy on serum mediators of inflammation and serum muscle enzymes in athletes. *Journal of Thermal Biology*. 2009;34:55-9.

13. Filaire E, Sagnol M, Ferrand C, Maso F, Lac G. Psychophysiological stress in judo athletes during competitions. *The Journal of sports medicine and physical fitness*. 2001;41(2):263-8.

14. Sternberg WF, Bailin D, Grant M, Gracely RH. Competition alters the perception of noxious stimuli in male and female athletes. *Pain*. 1998;76(1-2):231-8.

15. Harung HS, Travis F, Pensgaard AM, Boes R, Cook-Greuter S, Daley K. Higher psycho-physiological refinement in world-class Norwegian athletes: brain measures of performance capacity. *Scandinavian journal of medicine & science in sports*. 2011;21(1):32-41.

16. Hohenauer E, Taeymans J, Baeyens JP, Clarys P, Clijsen R. The Effect of Post-Exercise Cryotherapy on Recovery Characteristics: A Systematic Review and Meta-Analysis. *PloS one*. 2015;10(9):e0139028.
17. Smolander J, Mikkelsen M, Oksa J, Westerlund T, Leppaluoto J, Huttunen P. Thermal sensation and comfort in women exposed repeatedly to whole-body cryotherapy and winter swimming in ice-cold water. *Physiology & behavior*. 2004;82(4):691-5.
18. Parsons KC. The effects of gender, acclimation state, the opportunity to adjust clothing and physical disability on requirements for thermal comfort. *Energy and Buildings*. 2002;34(6):593-9.
19. Glickman-Weiss EL, Nelson AG, Hearon CM, Goss FL, Robertson RJ, Cassinelli DA. Effects of body morphology and mass on thermal responses to cold water: revisited. *European journal of applied physiology and occupational physiology*. 1993;66(4):299-303.
20. Maeda T, Sugawara A, Fukushima T, Higuchi S, Ishibashi K. Effects of lifestyle, body composition, and physical fitness on cold tolerance in humans. *Journal of physiological anthropology and applied human science*. 2005;24(4):439-43.
21. Hammond LE, Cuttell S, Nunley P, Meyler J. Anthropometric Characteristics and Sex Influence Magnitude of Skin Cooling following Exposure to Whole Body Cryotherapy. *BioMed Research International*. 2014;7.
22. Klimek AT, Lubkowska A, Szygula Z, Chudecka M, Fraczek B. Influence of the ten sessions of the whole body cryostimulation on aerobic and anaerobic capacity. *International journal of occupational medicine and environmental health*. 2010;23(2):181-9.

23. Mila-Kierzenkowska C, Jurecka A, Wozniak A, Szpinda M, Augustynska B, Wozniak B. The effect of submaximal exercise preceded by single whole-body cryotherapy on the markers of oxidative stress and inflammation in blood of volleyball players. *Oxidative medicine and cellular longevity*. 2013;10.
24. Sutkowy P, Augustynska B, Wozniak A, Rakowski A. Physical exercise combined with whole-body cryotherapy in evaluating the level of lipid peroxidation products and other oxidant stress indicators in kayakers. *Oxidative medicine and cellular longevity*. 2014;7.
25. Lundgren P, Henriksson O, Kuklane K, Holmer I, Naredi P, Bjornstig U. 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*. 2014;28(3):287-91.
26. Cholewka A, Stanek A, Sieron A, Drzazga Z. Thermography study of skin response due to whole-body cryotherapy. *Skin Research and Technology*. 2012;18(2):180-7.
27. Gallagher D, Visser M, Sepúlveda D, Pierson RN, Harris T, Heymsfield SB. How Useful Is Body Mass Index for Comparison of Body Fatness across Age, Sex, and Ethnic Groups? *American journal of epidemiology*. 1996;143(3):228-39.
28. Burse RL. Sex differences in human thermoregulatory response to heat and cold stress. *Human factors*. 1979;21(6):687-99.
29. Savic M, Fonda B, Sarabon N. Actual temperature during and thermal response after whole-body cryotherapy in cryo-cabin. *Journal of Thermal Biology*. 2013;38(4):186-91.

b) Etude 2 : Résumé**The use of Whole-body Cryostimulation to improve the quality of sleep in athletes during high level standard competitions***Bouzigon R, Ravier G, Dugue B, Grappe F.*Objectif :

Cette étude a été mise en place pour évaluer les effets de la CCP sur la qualité perceptive du sommeil des joueurs des équipes de France de basketball homme et femme lors de tournoi internationaux.

Méthode :

Cette étude s'est déroulée sur les tournois internationaux de préparation de l'Euro en 2013. Vingt-trois joueurs de l'équipe de France de basketball (12 femmes et 11 hommes) ont participé à cette étude. Ils réalisaient des expositions de 3 minutes à $-130\text{ }^{\circ}\text{C}$ placées entre 17 h et 20 h. La qualité perceptive de leur sommeil a été relevée grâce au questionnaire de Spiegel (Spiegel, 1982) graduée de 0 « Je n'ai pas dormi » à 5 « J'ai dormi de façon parfaite ». Les nuits après CCP et sans CCP la veille ont ensuite été comparées.

Résultats :

Les athlètes ont rapporté une qualité perceptive du sommeil améliorée la nuit après exposition à la CCP ($3,7\pm 0,7$ contre $3,2\pm 0,9$ les nuits sans CCP la veille).

Discussion :

La CCP a amélioré la qualité perceptive du sommeil de 15 % chez les basketteurs de l'équipe de France. Elle est donc relativement intéressante sur des compétitions où le sommeil des athlètes est souvent perturbé.

Conclusion :

La CCP permet d'améliorer la qualité perceptive du sommeil des athlètes en compétition.

The use of Whole-body Cryostimulation to improve the quality of sleep in athletes during high level standard competitions

Bouzigon Romain¹, Ravier Gilles¹, Dugué Benoit² & Grappe Frédéric¹

¹Laboratoire C3S, UPFR Sports, Université de Franche-Comté ; ²Laboratoire MOVE, Université de Poitiers. romain.bouzigon@gmail.com



INTRODUCTION

Recovery phase is considered as a key phase of the training process, especially with the Quality of Sleep (QS) (1). The whole-body cryostimulation (WBC) is a new attractive recovery method (2).

High-level athletes usually experience mood changes and sleep disturbances, especially during high standard competitions or overreaching training periods. **The present study was undertaken to examine whether QS is affected during the night following the WBC exposure in male and female high-level athletes during competitions.**

METHODS

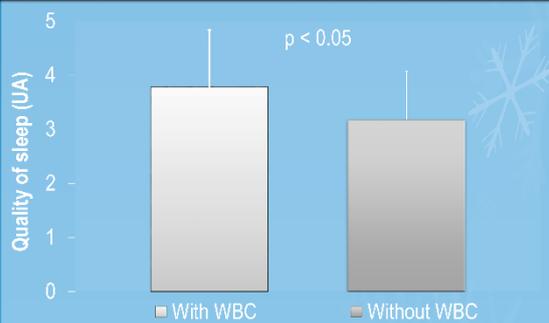
This field study occurred during one-week training camp with three international matches before the 2013 European Basketball championship for the men's and women's basketball French Teams. Twenty three basketball players participated in the study. They were exposed during 3-min at -130°C once a day and wore underwear, gloves, socks and slippers. Variable explored was the perception of the QS using a perceptive scale adapted from Spiegel's questionnaire (3) and ranged from 1 to 5. Subjects answered the question "Did you sleep well?" with the following possible answers: "1 - No, really not well" "2 - No"; "3 - Moderately well"; "4 - Yes, well"; "5 - Yes, perfectly". The possible differences in the QS in function of the previous WBC exposure was analysed using a Wilcoxon test.

RESULTS

Athletes reported better sleep the night following WBC compared to the night without (score of 3.7 ± 0.7 versus 3.2 ± 0.9 respectively, $p < 0.05$). QS was improved by 15% with WBC.

		Age	Height (cm)	Weight (kg)	Body Mass Index
Age	All	25.8 ± 3.5	192.5 ± 11.8	88.5 ± 15.7	23.5 ± 2.2
	Males	24.2 ± 2.6	200.2 ± 4.3	96.0 ± 9.1	23.9 ± 1.5
	Females	27.0 ± 3.1	183.1 ± 9.5	78.1 ± 12.4	23.2 ± 2.5

Characteristics of the subjects



Perception of the QS in 27 high level athletes in fonction of a WBC exposure or not the previous day (2 nights per condition)

DISCUSSION

The main finding of this study was the enhancement by 15% of the QS with WBC use. This result could be explained by the effects on mood states and relaxation induced by the WBC

exposure (4). The improvement of the QS during both competition and heavy training load periods appears of importance to enhance athletes' recovery. Such

situation may lead to 1) a decrease of the injury risks, 2) a better standing of the training load and 3) less fatigue before the matches.

REFERENCES

- Samuels C. Sleep, recovery, and performance: the new frontier in high-performance athletics. *Neurol clin* 26: 169-180; ix-x, 2008.
- Poumot H, Bieuzen F, Louis J, Mounier R, Fillard JR, Barbiche E, and Hausswirth C. Time-course of changes in inflammatory response after whole-body cryotherapy multi exposures following severe exercise. *PLoS one* 6: e22748, 2011.
- Spiegel R. sleep and sleeplessness in advanced age (advances in sleep research, vol 5). Wiley Subscription Services, Inc., A Wiley Company, 1982.
- Hausswirth C, Schaal K, Le Meur Y, Bieuzen F, Fillard JR, Volondat M, and Louis J. Parasympathetic activity and blood catecholamine responses following a single partial-body cryostimulation and a whole-body cryostimulation. *PLoS one* 8: e72658, 2013.



Figure 21 : Communication affichée à la Conférence Mondiale du Comité International Olympique sur la prévention des blessures et des maladies dans le sport

3. Prestations réalisées avec deux équipes cyclistes professionnelle et l'équipe de France de skicross

Les résultats présentés ci-dessous sont quelques exemples des résultats relevés sur les prestations. Un compte rendu était envoyé à chaque équipe après les prestations (figure 22).



Figure 22 : Pages de garde des compte rendus successifs aux prestations pour les équipes sportives

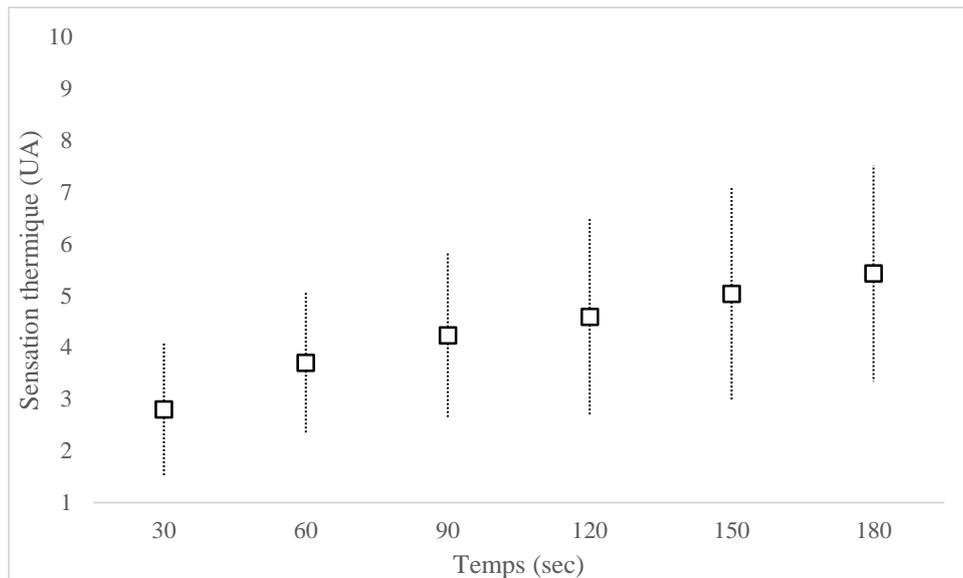


Figure 23 : Sensations thermiques moyennes au cours des expositions en fonction de la durée chez les cyclistes de deux équipes professionnelles au cours de la Vuelta

Le premier résultat intéressant était la contrainte subie par les athlètes lors de l'exposition (figure 23). Ce graphique montre que les sensations thermiques moyennes perçues par les athlètes ne dépassaient pas la valeur « 6 » sur l'échelle de sensation thermique. Cette valeur correspond à des sensations thermiques « Pas très bonnes ». Elles ne sont donc pas extrêmes. Ces valeurs relevées ont permis de se rendre compte que la contrainte liée à la CCP sur la Vuelta n'était pas trop importante pour les coureurs.

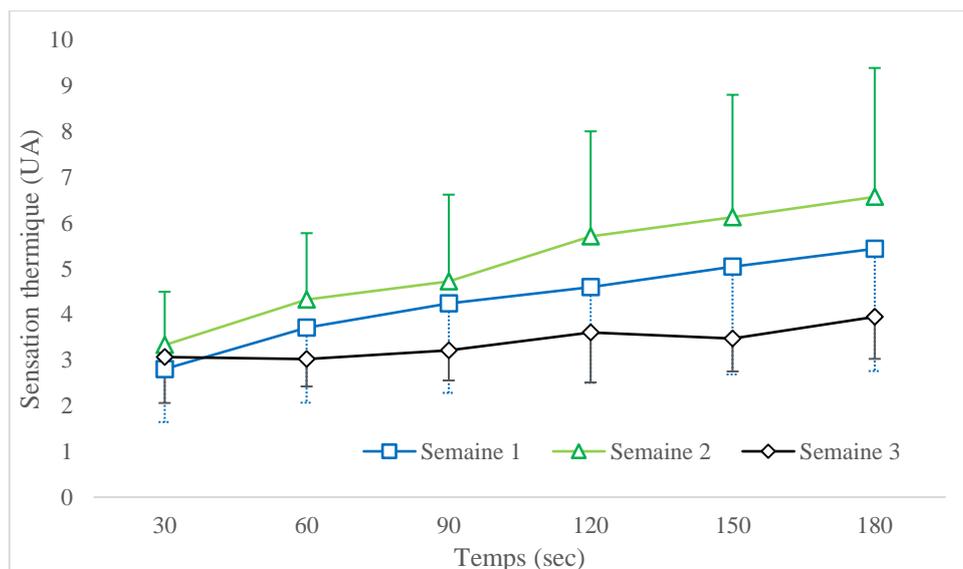


Figure 24 : Sensations thermiques moyennes en fonction des trois semaines d'étape chez les cyclistes d'une équipe professionnelle

Il a été intéressant d'observer les différences de perceptions des sensations thermiques en fonction des semaines de course (figure 24). Les expositions réalisées lors de la deuxième semaine de course semblaient plus difficiles que celles réalisées lors de la première semaine. L'explication peut être due aux conditions climatologiques. Les étapes de la première semaine de course étaient situées dans le Nord-Est de l'Espagne, une région au climat relativement sec. De plus il y avait une canicule lors de ces premiers jours, les températures environnementales moyennes relevées étaient de $28,8 \pm 4,9$ °C, avec des pics autour des 40 °C. Alors que la seconde semaine s'est déroulée en Galicie, dans le Nord-Ouest de l'Espagne, avec un climat océanique plus humide semblable à celui de la Bretagne. Les températures moyennes étaient de $18,7 \pm 1,2$ °C. Durant la troisième semaine, les sensations thermiques étaient plus agréables comparé aux deux autres semaines. La course revenait dans les zones à climat sec autour de Madrid et la température moyenne remontait à $19,8 \pm 2,8$ °C. Les meilleures sensations provenaient sans doute également d'une habitude au froid (Smolander et al., 2004). Les résultats suggèrent que la CCP est de moins en moins difficile à supporter au fur et à mesure des expositions.

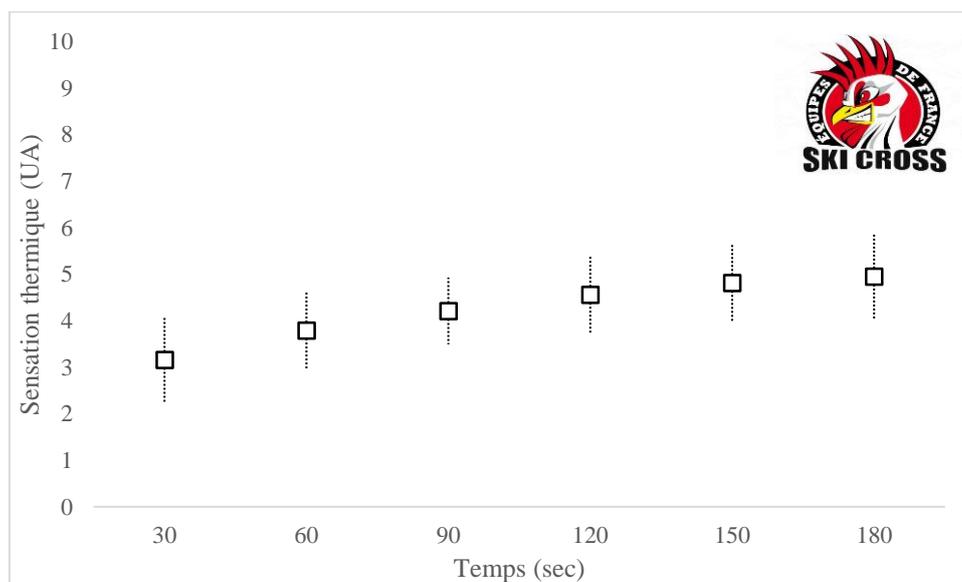


Figure 25 : Sensations thermiques moyennes au cours des expositions en fonction de la durée chez les skieurs de l'équipe de France de skicross

Les sensations thermiques moyennes relevées chez les skieurs de l'équipe de France de skicross ont également montré que la valeur maximale atteinte ne reflétait pas de contraintes thermiques importantes liées à l'exposition (figure 25).

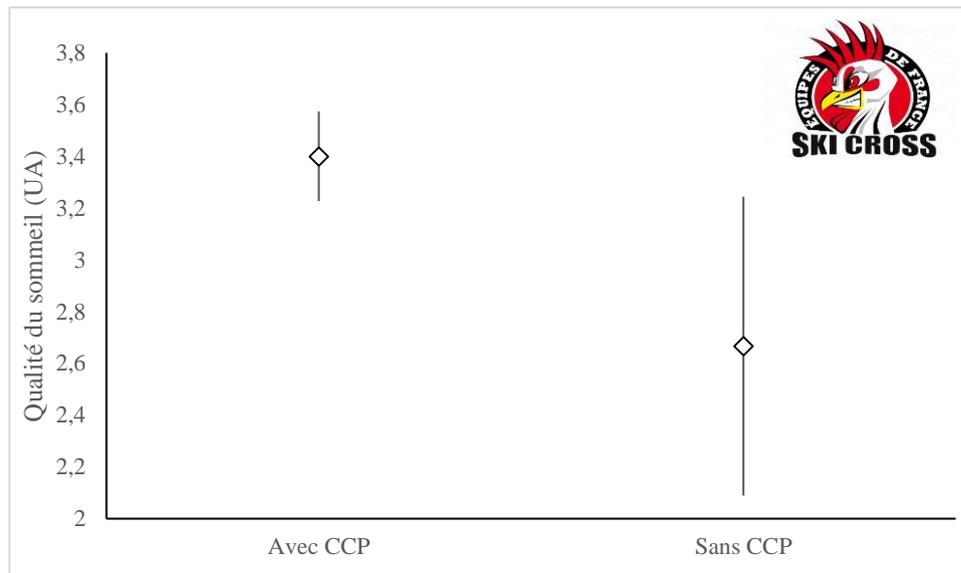


Figure 26 : Qualité du sommeil moyenne relevée chez les skieurs de l'équipe de France de skicross en fonction d'une exposition ou non à la CCP la veille

Il est intéressant de mettre en avant le fait que chez les skieurs, la qualité du sommeil était bien meilleure les nuits après exposition à la CCP que les nuits sans exposition la veille (figure 26).

Synthèse :

D'un point de vue technologique, les points essentiels relevés au cours des prestations de terrain mettent en avant qu'une nouvelle chambre de CCE doit :

- être la moins contraignante possible sur une compétition pour les athlètes ;
- être la moins onéreuse possible pour être utilisée par tous ;
- s'affranchir de la contrainte des risques représentés par l'azote ;
- être proposée en version mobile ;
- intégrer des protocoles adaptés aux caractéristiques des sujets exposés ;
- prévoir un dispositif de contrôle de l'hygrométrie à l'intérieur comme à l'extérieur des chambres et compartiments.

CHAPITRE 3 : IDENTIFICATION DES BESOINS TECHNOLOGIQUES ET METHODOLOGIQUES

1. Contexte

A la suite des prestations réalisées dans le cadre des compétitions sportives, la société Cryantal a décidé de changer d'orientation. Les limites liées aux technologies existantes relevées dans la première partie de ce manuscrit ont incité les responsables à développer leur propre dispositif de CCE. Ainsi, en plus d'être prestataire de service, la société serait la première à se positionner en qualité de fabricant français de chambre de CCE.

Le développement d'une nouvelle technologie nécessitait, en plus des différents points déjà relevés sur le terrain, une analyse des besoins existants. Cette analyse devait d'abord passer par le recensement de tous les fabricants et de toutes les technologies existantes. Ces technologies devaient être passées au peigne fin afin de pouvoir en retirer les forces et les faiblesses. Il fallait également connaître les applications de chaque technologie ainsi que leurs publics cibles. L'analyse des applications et méthodes actuelles de la CCE et de la CCP a été réalisée à travers une revue exhaustive de la littérature scientifique. Elle concernait 1) les technologies de CCE et de CCP utilisées et 2) les effets de ces technologies dans le soulagement de certaines pathologies et sur la récupération physique. Cette étude a débouché à la publication d'une revue de la littérature dans la revue à comité de lecture international « Journal of Thermal Biology » (Bouzigon et al., 2016).

2. Revue de littérature sur l'identification des besoins technologiques et des méthodes d'applications de la cryothérapie corps entier

Etude 3 : Résumé

Whole- and partial-body cryostimulation/cryotherapy: current applications and technologies

Bouzigon R, Grappe F, Ravier G, Dugue B.

Objectifs :

Cette revue de littérature avait pour objectifs 1) de définir les besoins technologiques actuels pour les dispositifs de CCE ; 2) d'étudier les effets des expositions avec les technologies

existantes sur la température cutanée ; et 3) de lister les protocoles d'exposition utilisés en fonction des effets désirés dans la littérature scientifique.

Méthode :

La revue de littérature s'est appuyée sur les articles originaux, les revues de littérature et méta-analyses relatant des effets de la CCE et de la CCP sur l'homme. Ces travaux scientifiques devaient être concernés par les effets sur les températures cutanée et centrale, les effets sur la santé psycho-physique et/ou sur la récupération physique après exercice. Ils devaient de plus être complets (pas uniquement le résumé) et rédigés en anglais.

Discussion :

Cette revue met en avant les problèmes de sécurité liés à l'utilisation de l'azote dans la plupart des technologies et le manque d'information concernant les températures réelles d'exposition à l'intérieur des chambres. En plus de ce manque d'informations, l'hétérogénéité des températures d'exposition induite par les différentes technologies utilisées dans la littérature ne permet pas de standardiser les protocoles d'exposition en fonction des effets recherchés.

En termes de développement technologique, cette revue a permis de montrer que les chambres de CCE semblaient plus efficaces que les chambres de CCP. De plus les technologies à venir se doivent d'être affranchies de l'azote, de montrer des températures d'expositions réelles et non empiriques, et d'avoir des protocoles d'expositions variables (températures d'exposition, durée, nombre de répétitions) afin de pouvoir répondre aux besoins de tous.

Cette revue a donc été indispensable dans l'évolution de notre idée et dans la conception du prototype de notre nouvelle chambre de CCE.

Conclusion :

Cette revue a relevé l'importance de développer une chambre de cryothérapie corps entier :

- affranchie de l'utilisation de l'azote afin de garantir la sécurité et de démocratiser la pratique en diminuant les coûts d'exploitation ;
- pouvant être déclinable en mobile afin d'être utilisable lors de prestations de terrain ;
- valide et précise dans la mesure de la température d'exposition ;
- Capable d'adapter les protocoles d'expositions en fonction des effets recherchés (soulagement d'une pathologie, récupération physique ou bien-être).



Whole- and partial-body cryostimulation/cryotherapy: Current technologies and practical applications



Romain Bouzigon^{a,c,*}, Frederic Grappe^a, Gilles Ravier^a, Benoit Dugue^b

^a Université de Franche Comté, Laboratoire C3S (EA 4660), Unité de Promotion, de Formation et de Recherche (UPFR) des Sports, 31 rue de l'Épitaphe, 25000 Besançon, France

^b Université de Poitiers, EA 6314, laboratoire "Mobilité, Vieillesse et Exercice (MOVE)", Faculté des Sciences du Sport, 86000 Poitiers, France

^c Société Cryantal Développement, 77186 Noisiel, France

ARTICLE INFO

Article history:

Received 28 April 2016

Received in revised form

25 August 2016

Accepted 26 August 2016

Available online 27 August 2016

Keywords:

Cryostimulation

Cryotherapy

Health

Well-being

Sport recovery

ABSTRACT

Cold therapy is commonly used as a method to relieve pain and inflammation. This review focuses primarily on two methods of cold therapy that have received recent attention: whole-body cryotherapy and partial-body cryotherapy. These methods are used to induce physiological and psychological benefits in humans in the context of medicine, health and sports. The subjects experiencing cryotherapy are dressed in minimal clothing and are exposed to very cold air (at $-110\text{ }^{\circ}\text{C}$ or less) for 1–4 min. Despite the increasing scientific interest in these methods, there is a lack of information about the technologies used. Moreover, there is no existing reference concerning exposure protocols and the relationship between temperature, duration, number of repetitions and the treatments' desired effects. The aim of this review is to compare whole- and partial-body cryotherapy effects (especially on skin temperature) and to classify the protocols for exposure according to the desired effects. This review emphasises 1) the lack of information concerning the actual temperatures inside the cabin or chamber during exposure and 2) the heterogeneity among the exposure protocols that have been reported in the scientific literature.

This review will be valuable and relevant to health professionals endeavouring to optimize the cold treatments offered to patients and producers of cryotherapy apparatus striving to create more efficient devices that meet market requirements.

© 2016 Elsevier Ltd. All rights reserved.

Contents

1. Introduction	68
2. Whole- and partial-body cryotherapy technologies	70
2.1. Partial-body cryotherapy	70
2.2. Whole-body cryotherapy devices	73
2.3. Advantages and limits	74
3. Whole- and partial-body cryotherapy exposure protocols	74
3.1. Application in the physical and quality of life domains	74
3.1.1. Rheumatoid arthritis	74
3.1.2. Fibromyalgia	75
3.1.3. Ankylosing spondylitis	75
3.1.4. Multiple sclerosis	75
3.1.5. Chronic low back pain	75
3.1.6. Depression and anxiety symptoms	76
3.1.7. In summary	76
3.2. Application in physical exercise recovery	76
3.2.1. Inflammatory response	76

* Correspondence to: 11 rue de Saint Hippolyte, 25200 Montbéliard, France.

E-mail addresses: romain.bouzigon@gmail.com, romain.bouzigon@univ-fcomte.fr (R. Bouzigon), frederic.grappe@univ-fcomte.fr (F. Grappe), gilles.ravier@univ-fcomte.fr (G. Ravier), benoit.dugue@univ-poitiers.fr (B. Dugue).

<http://dx.doi.org/10.1016/j.jtherbio.2016.08.009>
0306-4565/© 2016 Elsevier Ltd. All rights reserved.

3.2.2.	Muscle damage recovery.....	77
3.2.3.	Autonomic nervous system.....	77
3.2.4.	Quality of sleep.....	78
3.2.5.	Oxidative stress.....	78
3.2.6.	In summary.....	78
3.3.	Advantages and limits.....	78
4.	Conclusions and perspectives.....	79
	Acknowledgements.....	79
	References.....	79

1. Introduction

The use of cold in medicine has been known since antiquity. In various ancient cultures, it was one of several traditional methods for relieving physical suffering. In ancient Greece, Persia and the Roman Empire, cold remedies such as snow, ice-water mixtures and cold water were applied to treat a wide range of diseases. In contemporary times, winter swimming—regularly taking a bath in ice-cold water during the winter season for health reasons—has become a popular practice in Nordic countries (Dugue and Lepanen, 2000). Winter swimmers believe that they become sick less often and that cold stimulation improves their ability to address with daily stress (Huttunen et al., 2004; Lubkowska et al., 2013). Today, cold application remedies are being developed in the medicine, health and sport domains. This review primarily focuses on two recent methods of cold therapy: whole-body cryotherapy (WBC) and partial-body cryotherapy (PBC). WBC and PBC are two methods that expose a patient to extreme cold for a short time, and both require a specialised cold chamber (cryochamber) or cabin (cryo-cabin). These methods are used to induce physiological and psychological benefits.

Little known a few years ago, these therapies have recently been the subject of tremendous interest. According to PubMed, there were approximately 30 scientific studies concerning this topic before 2010 and there have been over 100 since then. The two most investigated domains are improvements in mental and physical health and improvements in recovery after physical exercise (Bleakley et al., 2014; Guillot et al., 2014). The populations studied include patients suffering from traumatic, inflammatory or mental diseases, healthy individuals (no sport and no disease), and athletes (all levels) as well as active participants (moderate level of sport activity). In addition to the term “cryotherapy”, the term “cryostimulation” has emerged. Although the cold stimulation is the same, cryostimulation is targeted to subjects with no pathologies (e.g., healthy athletes), whereas cryotherapy involves patients.

Since the invention of PBC and WBC, several technologies for each have emerged and, there are approximately fifteen producers worldwide (Table 1). The differences between the two methods involve the exclusion of the head in PBC treatment, different ways to create cold, and different device sizes and mobility possibilities, which can attract different populations of users (Hauswirth et al., 2013). PBC uses a moderate-sized mobile device, whereas WBC employs a larger fixed device. Thus, PBC is used more in the field with sport teams, and WBC is used more often in rehabilitation or athletic sport centres.

The differences in the temperature of exposure inside the two devices are not clear. Currently, there is no standardised method of assessing these temperatures. The temperatures reported are those provided by the device producers. With the exception of three cryo-cabin models (Criomed, Kherson, Ukraine; Juka, Niepolomice, Poland; and Cryo Manufacturing, Perigny, France), in which temperatures are measured at the outlet of the nitrogen

nozzle (Bouzigon et al., 2014; Savic et al., 2013), the site of assessment of cabins and chambers remains unknown. This lack of data is a problem for the validity of assessments in scientific research. It is not possible to know precisely what exposure temperatures were used in different studies. Furthermore, several articles (Tables 2–4) do not disclose the brand, model, producer and origin of the devices used in their materials and methods sections.

An interesting way to measure the efficiency of the different cryotherapy/cryostimulation technologies is to assess the variations in the cutaneous temperature induced by exposure. The strong variations in skin temperature induced by exposure to extreme cold lead to the stimulation of cutaneous thermoreceptors and therefore to the stimulation of the thermoregulation centre in the hypothalamus. The sympathetic adrenergic fibres are excited, which causes local arterioles and venules to constrict and reduces nervous conduction velocity (Herrera et al., 2010). Core and muscular temperature could also be affected. However, short cold exposure does not induce a large decrease in these temperatures immediately after treatment (Costello et al., 2012b; Westertlund et al., 2003).

WBC and PBC were first used to relieve rheumatic and inflammatory diseases such as rheumatoid arthritis (Hirvonen et al., 2006), fibromyalgia (Bettoni et al., 2013) or ankylosing spondylitis (Stanek et al., 2015). Currently, these methods are also being used in psychiatry to improve mental well-being, but there are only few studies on this topic. WBC and PBC treatments are used to relieve depression and anxiety syndromes (Rymaszewska and Ramsey, 2008). Previously, investigations in winter swimmers were performed to assess the effect of cold on well-being (Huttunen et al., 2004, 2001). In these studies, the adaption to cold was associated with a decrease in tension and fatigue and with an improvement in mood and memory. Winter swimmers reported feeling more vigorous, energetic, and active after a winter swimming period of four months (Huttunen et al., 2004). WBC and PBC were later used in the sports domain because cold exposure studies demonstrated their potential to enhance physical exercise recovery.

Though not completely clear, the mechanism leading to pain release and inflammatory symptom alleviation as well as recovery improvement after physical exercise appears to be related to cold-induced analgesia and cold-induced lower levels of oxidative stress and inflammation (Hauswirth et al., 2011; Leppaluoto et al., 2008; Pournot et al., 2011; Lubkowska et al., 2010; Lubkowska et al., 2012; Lubkowska et al., 2011). Cold stimulus reduces nerve conduction and acetylcholine formation (Bugaj, 1975). However, the stimulation of the sympathetic system, the release of noradrenalin and the vasoconstriction during and after the cold exposure may also have a significant impact on pain and joint and/or muscle soreness (Leppaluoto et al., 2008). Noradrenalin is released both from peripheral nerve endings and brainstem nuclei (Pertovaara et al., 1991). Moreover, noradrenalin spinal administration in animals and epidural injections of an adrenoceptor agonist in humans have been reported to alleviate pain (Pertovaara and Kalmari, 2003; Gordh, 1988). Circulating noradrenalin reaches the

Table 1
WBC and PBC technologies.

Technology	Manufacturer Model	Origin (Town, Country)	Temperature of exposure announced	Possible number of individual	CE medical/Class
PBC	Criomed PBC space cabin	Kherson, Ukraine	–120 to –170 °C	1	Yes (Unknown class)
PBC	Krion KAET-01	Saint-Petersburg, Russia	–130 to –190 °C	1	?
PBC	Cryo Manufacturing Cryocab	Perigny, France	–120 to –150 °C	1	?
PBC	Majestic Cryo Inc M-Cryo	Richardson, Texas, United States	Unknown	1	?
PBC	Asperia Group Cryoness	Gliwice, Poland	–110 to –160 °C	1	?
PBC	Impact Cryotherapy Octagon	Atlanta, Georgia, United States	–110 to –170 °C	1	?
PBC	Juka	Niepolomice, Poland	–140 to –160 °C	1	Yes, for both chambers (Unknown class)
WBC			2 chambers: –40 to –60 °C and –100 to –160 °C	2–3 or 4–5	
WBC	Zimmer Icelab	Neu-Ulm, Germany	2 or 3 chambers: –10 °C, –60 °C and –110 °C	1–4	Yes (Unknown class)
WBC	Mecotec Cryoar	Bitterfeld-Wolfen and Pforzheim, Germany	1 to 3 chambers: 1 chamber: –85 °C 2 or 3 chambers: –10 °C, –60 °C and –110 °C	1 3–4	Yes IIb and III
WBC	Kriosystem KR-2010S	Wroclaw, Poland	2 chambers: –60 °C and –110 to –160 °C	2–4	Yes (Unknown class)
WBC	Seilufreezer SMC-10	Chungcheongnam-do, South-Korea	2 chambers: –60 °C and –110 °C	2	?
WBC	Metrum Cryoflex Arctica Arctic cooling retention	Warsaw, Poland	1 to 2 chambers: –60 to –70 °C and –120 to –150 °C Open room placed in basement to keep the cold.	2 or 2–4 2–3 or 4–6	Yes (Unknown class)
WBC	Stan Mar	Poznan, Poland	Unknown temperature 2 chambers: –60 °C and –120 °C	Unknown	Yes IIa
WBC	Creator Kriekomora	Wroclaw, Poland	2 chambers: –60 °C and –80 to –160 °C	2–3, 3–4 or 5–6	?

(Abbreviations: WBC, whole-body cryotherapy; PBC, partial-body cryotherapy).

spinal cord via the posterior spinal arteries supplying, for example, the substantia gelatinosa where pain afferents from skin terminate. A cold-induced increase in noradrenalin may therefore be involved in the mechanisms that lower pain at the spinal level. Moreover, several studies have reported that cold exposure induced a decrease in oxidative stress and/or an increase in antioxidative buffering capacities (Dugué et al., 2005; Lubkowska et al., 2008, 2009, 2010, 2015) as well as a decrease in inflammatory processes due to a lower production and release of pro-inflammatory substances and/or a higher production and release of anti-inflammatory compounds (Miller et al., 2010; Lubkowska et al., 2011; Lubkowska et al., 2015). Again, the mechanisms behind these adaptations are not completely understood at the current time. However, recent studies have suggested that adhesion molecules, such as intracellular adhesion molecule-1, may play a role in the cold-induced reduction of inflammation (Dugué, 2015; Ferreira-Junior et al., 2014a).

In the context of physical exercise, the process of skin and muscle cooling during and after cold exposure may also lower enzyme activities and metabolism; induce a peripheral vasoconstriction that reduces peripheral blood flow, thereby attenuating inflammatory response and the possible formation of oedema; and limit protein degradation after exercise-induced ischaemia, which can be an important feature of recovery improvement (Paddon-Jones and Quigley, 1997; Banfi et al., 2009; Bleakley and Hopkins, 2010; Costello et al., 2012b). Another important effect that WBC and PBC have shown in exercise recovery is an improvement in the

quality of sleep (Bouzigon et al., 2014; Schaal et al., 2014). This effect may also be of importance to patients.

With the exception of 3 studies by Lubkowska et al. (2010, 2011, 2012) concerning the effects of 20 WBC exposures compared to 10 and 5 exposures, there have been no published studies regarding exposure protocols and the relationship between temperature, duration, number of repetitions and the treatments' desired effects.

Therefore, the aims of this review are to describe and compare the WBC and PBC technologies and to classify the protocols for exposure according to the desired effects. This study could provide methodological recommendations for health professionals.

A computer-based literature search was performed in March 2016 using the electronic databases PubMed and Science Direct to select relevant scientific articles. The selected studies were conducted over a 20-year period, up to and including January 2016. The key words used in the search were whole-body cryotherapy, whole-body cryostimulation, partial-body cryotherapy, partial-body cryostimulation, cryotherapy exposure, and extreme cold exposure.

Studies were eligible for inclusion if they were prospective, performed on humans and evaluated the effects of WBC and/or PBC. The research had to have been concerned with the effect of these procedures on skin and core temperature, psycho-physical health and post-exercise recovery. The studies had to be complete, include an abstract, and be written in English.

70

R. Bouzigon et al. / Journal of Thermal Biology 61 (2016) 67–81

Table 2
Summary of the investigations on the effects of WBC and PBC on skin and core temperature.

Study	WBC or PBC, temperature measurement apparatus	Exposure temperature and duration	Measurement location	Mean skin temperature (°C)	Core temperature (°C)
Savic et al. (2013)	PBC Criomed Thermal camera	3 min –140 °C	Front and back: Chest, trunk and right and left upper arms, thighs and shank	Before: 32.7 °C After: 22.8 °C Variation: 9.9 °C	
Fonda et al. (2014)	PBC Criomed Thermolazer	1 min 30 s 2 min 2 min 30 s 3 min –140 °C	Chest, arm, abdomen, thigh, calf	Variation: 1 min 30: 5.6 °C 2 min: 7.1 °C 2 min 30: 8.4 °C 3 min: 9.4 °C	
Hauswirth et al. (2013)	PBC Kriion Thermal camera	3 min –160 °C	Front side: Torso, abdominal, right and left: forearms, arms, thighs, and legs. Backside: Upper back, lower back, right and left: forearms, arms, thighs, and legs	Before: 32.1 °C After: 23.6 °C Variation: 8.5 °C	Tympanic temperature Variation: 0.05 °C 20 min after the end of the exposure
Louis et al. (2015)	PBC Kriion Thermal camera	3 min –160 °C	Front side: Torso, abdominal, right and left: cheeks, forearms, arms, thighs, and legs	Variation: 1 exposure: 8.6 °C 5 exposures: 7.7 °C	Tympanic temperature Variation: 0.14 °C 20 min after the end of the exposure
Zalewski et al. (2013)	WBC Stan Mar three rooms: –10, –60 and –120 °C Thermal camera	3 min –120 °C	Front side: Chest with shoulders, abdomen, right upper-arm, left upper-arm Backside: Upper back, lower back, right upper-arm, left upper-arm.	Before: 31.7 °C After: 15.2 °C Variation: 16.5 °C	
Selle et al. (2014)	WBC Juka two rooms: –60 and –135 °C Thermal camera	1 min 2 min 3 min –135 °C	Mean skin temperature	Variation: 1 min: 8.0 °C 2 min: 12.5 °C 3 min: 14.9 °C	Gastro intestinal temperature: No significant change
Cholewka et al. (2012)	WBC (Unknown model) two rooms Thermal camera	3 min –60 and –120 °C –120 °C	Front side: Head, chest, arms, tibia, hands, feet Backside: back	Before: 29.2 °C After: 23.4 °C Variation: 5.8 °C	Tympanic temperature Variation: 0.8 °C
Hauswirth et al. (2013)	WBC Zimmer three rooms: Thermal camera	3 min –10, –60 and –110 °C –110 °C	Front side: Torso, abdominal, right and left: forearms, arms, thighs, and legs. Backside: Upper back, lower back, right and left: forearms, arms, thighs, and legs	Before: 32.1 °C After: 18.2 °C Variation: 13.9 °C	Tympanic temperature Variation: 0.32 °C immediately after and 0.30 °C 20 min after the end of the exposure
Costello et al. (2012b)	WBC Zimmer two rooms Thermal camera	20 s –60 °C and 3 min 40 s –110 °C	Thigh	(Thigh) Before: 30.0 °C After: 18.0 °C Variation: 12.0 °C	Rectal temperature Variation: 0.25 °C 40 min after, 0.27 °C 50 min after and 0.30 °C 60 min after the end of the exposure
Costello et al. (2014)	WBC Zimmer two rooms Thermal camera	20 s –60 °C and 3 min 40 s –110 °C	Knees	Variation (knees): Right: 10.3 °C Left: 9.9 °C	
Westerlund et al. (2003)	WBC Zimmer three rooms: Thermocouples	2 min –10, –60 and –110 °C –110 °C	Front side: Forehead, chest, arm, forearm, hand, thigh, upper foot. Backside: lower back, calf	Before: 32.0 °C After: 12.5 °C Variation: 19.5 °C	Rectal temperature No change during the first 30 min
Louis et al. (2015)	WBC Zimmer only room at Thermal camera	3 min –60 °C used	Front side: Torso, abdominal, right and left: cheeks, forearms, arms, thighs, and legs	Variation: 1 exposure: 8.3 °C 5 exposures: 7.6 °C	Tympanic temperature Variation: 1 exp.: 0.28 °C 5 exp.: 0.34 °C
Hammond et al. (2014)	WBC (Unknown model) two rooms Thermal camera	30 s –60 °C 2 min –60 and –110 °C	Chest, arm, thigh and calf	Variation: Females: 12.1 °C Males: 10.1 °C	-

(Abbreviations: WBC, whole-body cryotherapy; PBC, partial-body cryotherapy).

2. Whole- and partial-body cryotherapy technologies

2.1. Partial-body cryotherapy

PBC treatment is performed in a partial cryocabin called a cryo-sauna. It is an open tank in which the subject is exposed to cold, excluding the head and neck. This device was probably the first type of extreme cold technology for the body (Metzger et al., 2000). It was developed by Professor Yamauchi and was

mentioned in the European Congress of Rheumatology in Wiesbaden, 1979 (Yamauchi, 1988). It was then further developed by Fricke (1989) in Germany and Zagrobelny et al. (1992) in Poland between 1980 and 1990. Cryo-saunas are less expensive to purchase than cryochambers, and they require less space, can be easily turned on and off and are transportable. This characteristic has recently allowed mobile PBC services to be present at sports events (e.g., the Tour de France, the Vuelta, and the European Basketball Championship). The limitations of this mobile device

Table 3
Summary of the investigations on the effects of WBC and PBC on physical and mental health.

Study	Disease	WBC or PBC treatment protocol	Modifications ('+' : positive effect; '-' : negative effect)
Gizinska et al. (2015)	RA	WBC (Unknown model) 10 exposures 1 per day/2 weeks 3 min – 10 °C, – 60 °C and – 110 °C	+ Inflammation + Pain + Fatigue + Disease score activity + Walking + Pain (greater with – 110 °C)
Hirvonen et al. (2006)	RA	WBC (Unknown model) 20 exposures 3 per day/6 days and 2 the last day – 60 °C – 110 °C	+ Disease score activity + Physician's global assessment
Jastrzabek et al. (2013)	RA	Unknown duration PBC (Unknown model) 20 exposures 2 per day/10 days 3 min – 160 °C	+ Decrease TNF- α + Disease score activity + Pain + Morning stiffness + Fatigue + Quality of life
Bettoni et al. (2013)	FM	WBC (Unknown model) 15 exposures 3 weeks 30 s at – 60 °C and 3 min at – 140 °C	+ Pain + Fatigue + Disease score activity + Quality of life
Stanek et al. (2015)	AS	WBC Creator 10 consecutive days except weekend 30 s at – 60 °C and 3 min at – 120 °C	+ Disease score index + Functional score index + Pain intensity + Spinal mobility parameters
Miller et al. (2016)	MS	WBC Kriosystem 10 exposures 3 min One per day / two weeks – 60 °C and – 110 °C to – 160 °C	+ Fatigue + Functional abilities
Miller et al. (2013)	MS	WBC (Unknown model) 10 exposures 3 min One per day/two weeks – 130 °C	+ Increase uric acid concentration in plasma + Improvement of the functional status
Miller et al. (2010)	MS	WBC (Unknown model) 10 exposures 3 min One per day/two weeks – 60 °C and – 110 °C to – 160 °C	+ Increase TAS + Increase superoxide dismutase -Decreased catalase
Nugraha et al. (2015)	Low back pain	WBC (Criomed) 10 exposures One per day 3 min at – 5 °C or 3 min at – 65 °C	+ Pain + Disability index
Szczepanska-Gieracha et al. (2013)	Spinal pain syndromes	WBC (Unknown model) 10 exposures	+ General Well-being + Quality of life
	Peripheral joint disease	1 and 2 min for the two firsts exposures) 3 min the following eight sessions – 60 °C and – 130 °C	+ Mood
Rymaszewska et al. (2008)	Depression and anxiety	WBC (Unknown model) 15 exposures 4 per week/1 per day 2 to 3 min – 60 °C and – 110 °C (first exposures) to – 160 °C (lasts exposures)	+ Depressive symptoms + Anxiety symptoms

(Abbreviations: WBC, whole-body cryotherapy; PBC, partial-body cryotherapy; RA, rheumatoid arthritis; FM, fibromyalgia; AS, ankylosing spondylitis; MS, multiple sclerosis; TNF- α , tumour necrosis factor alpha; TAS, total antioxidative status).

relate to the safety rules governing the transport and storage of nitrogen, which require the use of a second compartment (often a trailer) to transport the nitrogen tanks and the supply of nitrogen. Professional supervision is required for safe use of PBC, and appropriate safety procedures need to be applied.

PBC technology is based on direct contact between the patient and the nitrogen. Cold is created by spraying nitrogen directed at the body of the patient inside the tank. The patient's head must be out of the tank to prevent breathing nitrogen, which is an important safety problem. Nitrogen storage also involves regulatory issues. In France, it is not possible to store nitrogen tanks everywhere, and this can be a problem for both fixed and mobile devices. Centres with a fixed device must have a storage agreement, and it can be difficult to store nitrogen for mobile device services

during field competitions.

Moreover, nitrogen is expensive, costing €20,000 to €30,000 per year for the Criomed and Juka models, and cryo-saunas consume large amounts of nitrogen. An advantage of PBC devices is they do not require much maintenance. According to the producing companies, the temperature of exposure in a cryo-sauna is between – 110 °C to – 195 °C, which is a rather wide temperature range. These temperature variations are due to the characteristics of nitrogen, which is stored in liquid form and gasifies at – 195 °C. Therefore, the nitrogen sprayed inside the cryosauna during exposure is between – 195 °C and – 110 °C. Temperature adjustment is performed by spraying when the temperature inside the cabin rises above a certain level (e.g., above – 115 °C if the selected temperature of exposure was – 120 °C) at the site of the nitrogen

72

R. Bouzigon et al. / Journal of Thermal Biology 61 (2016) 67–81

Table 4
Summary of the investigations on the effects of WBC and PBC on recovery enhancement after exercise.

Study	Outcomes/Subjects	WBC or PBC treatment protocol	Modifications (*+: positive effect; -:negative effect; '=':no change)
Pournot et al. (2011)	Inflammation Trained runners 11 males	WBC Zimmer 4 exposures 1 per day 3 min -10 °C, -60 °C, -110 °C	Since first exposure: + Lower increase in IL-1 β + Increase IL-1ra + Limited increase in CRP
Banfi et al. (2009)	Inflammation Elite rugby men 10 males	WBC (Unknown model) 5 exposures 1 per day 30 s -60 °C, 2 min -110 °C	+ Increase IL-10 + Decrease IL-2 and IL-8 + Decrease sICAM-1 and PGE2
Lubkowska et al. (2011)	Inflammation Healthy men 45 males	WBC (Unknown model) 5, 10 and 20 exposures 1 per day 30 s -60 °C, 2 min 30 s -110 °C	+ Increase IL-10 and IL-6 (higher with 20 exposures) + Decrease IL-1 α
Ziemann et al. (2012)	Inflammation High rank tennis players 12 males	WBC (Unknown model) 10 exposures 2 per day 20–30 s at -60 °C, 3 min at -120 °C	+ Decrease in TNF- α + Increase in IL-6
Ziemann et al. (2014)	Inflammation Physically active colleged-aged 9 males	WBC (Unknown model) 10 exposures 2 per day 20–30 s at -60 °C, 3 min at -120 °C	+ Increase in IL-10 + Decrease in IL-1 β + Decrease in muscular damage
Mila-Kierzenkowska et al. (2013)	Inflammation Professional volleyball players 18 males	WBC Metrum Cryoflex 1 exposure Before training 10–20 s at -60 °C 2 min at -130 °C	+ Decrease in IL-6 + Limit the increase in IL-1 β + Decrease in TNF- α
Ferreira-Junior et al. (2014a, 2014b)	Muscle damage Physically active participants 13 males	PBC Cryoness 1 exposure 3 min -110 °C	+ Muscle strength + Pain = Muscle thickness
Hauswirth et al. (2011)	Muscle damage Train runners 9 Unknown gender	WBC Zimmer 3 exposures (1 h, 24 h, 48 h) 3 min in -110 °C room -10 °C, -60 °C, -110 °C	After the first exposure: + Maximal voluntary contraction + Perceived pain and well-being = Plasma CK activity
Fonda and Sarabon (2013)	Muscle damage Healthy men 11 males	PBC Criomed 6 exposures 1 per day/6 days 3 min -140 °C to -195 °C	+ Pain + knee flexion rate of torque development + Squat jump start power + Maximal torque production = CK + Heart rate variability (HRV) indices
Hauswirth et al. (2013)	ANS Healthy men 15 males WBC 15 males PBC	WBC Zimmer PBC Kriion Standard 1 exposure 3 min -110 °C (WBC) -160 °C (PBC)	+ HRV (RMSSD, HF band, SD1)
Schaal et al. (2013)	ANS Elite synchronised swimmers 11 females	WBC Zimmer 1 exposure 3 min in -110 °C room -10 °C, -60 °C, -110 °C	+ Maximal aerobic work output + Lactate variation + VO _{2peak} = Muscle pain = RPE = perceived effectiveness of recovery
Louis et al. (2015)	ANS Healthy men 10 males WBC 10 males PBC	WBC Zimmer PBC Kriion Standard 1 exposure 3 min -60 °C (WBC) -160 °C (PBC)	+ Catecholamines plasma concentration + HRV indices + ANS activity + Parasympathetic nervous system activity = Systolic and diastolic blood pressure
Westerlund et al. (2006)	ANS Healthy women 10 females	WBC Zimmer 1 to 36 exposures 2 min -10 °C, -60 °C, -110 °C	+ HRV indices (RMSSD, SD1) = Attenuation of parasympathetic activity response after 3 months of repeated WBC
Schaal et al. (2014)	Sleep Elite synchronised swimmers 10 females	WBC Zimmer 14 exposures 3 min in -110 °C room -10 °C, -60 °C and -110 °C	+ Get up time + Time in bed + Sleep latency and efficiency compared to control group + Perceived fatigue compared to control group

Table 4 (continued)

Study	Outcomes/Subjects	WBC or PBC treatment protocol	Modifications ('+' : positive effect; '-' : negative effect; '=' : no change)
Bouzigon et al. (2014)	Sleep Elite basketball players 13 females 14 males	PBC Mecacel 1 exposure 3 min –130 °C	+ Perceived quality of sleep = Cortisol
Wozniak et al. (2013)	Oxidative stress Elite rowers 6 Unknown gender	WBC kriotechnica Medycyna KN-1 12 exposures 2 per day/6 days Before training 10–20 s at –60 °C 3 min at –125 °C to –150 °C	+ Antioxidant activity + Lipid peroxidation products = CK
Mila-Kierzenkowska et al. (2009)	Oxidative stress Kayakers	WBC Metrum Cryoflex "Arctica" 1 exposure Before training 10–20 s at –60 °C 2 min at –130 °C	+ Antioxidant activity + Markers of muscle damage and inflammatory
Sutkowy et al. (2014)	Oxidative stress Elite kayakers 9 women	WBC (Unknown model) 38 exposures 2 per day Before and after training 30 s at –60 °C 3 min at –120 °C	+ Decrease in GPx + Decrease in TBARS

(Abbreviations: WBC, whole-body cryotherapy; PBC, partial-body cryotherapy; RA, rheumatoid arthritis; FM, fibromyalgia; AS, ankylosing spondylitis; MS, multiple sclerosis; TNF- α , tumour necrosis factor alpha; TAS, total antioxidative status; IL-1 α , interleukin 1 alpha; IL-1 β , interleukin 1 beta; IL-1ra, interleukin 1 receptor antagonist; IL-2, interleukin 2; IL-6, interleukin 6; IL-8, interleukin 8; IL-10, interleukin 10; CRP, C-reactive protein; CK, creatine Kinase; RMSSD, root mean square standard deviation; HF, high frequency; SD1, standard deviation 1; RPE, rated perceived exertion; ANS, autonomic nervous system; HRV, heart rate variability; GPx, glutathione peroxidase; TBARS, Thiobarbituric acid reactive substances).

nozzle. The amplitude of the temperatures before and after adjustment may range from 10 to 20 °C, making it difficult to set and control precise temperatures. One study measured the exposure temperature in an empty cryo-sauna, the Criomed Model, with a manikin and with a participant during an exposure (Savic et al., 2013). In the empty cabin, the temperature next to the nitrogen nozzle dropped lower than –150 °C but stayed at –60 °C in the middle of the cabin. When a manikin was settled in the cabin, the temperature next to the manikin was not homogeneous. After 3 min (min) of exposure, the temperature was –100 °C at the top of the cabin and –140 °C at the lowest part of the cabin. The distribution of the temperatures was also different between the front and the back of the manikin. The mean temperatures measured next to the participant were between –20 °C for the chest and –40 °C for the shank, probably due to the participant's heat convection. On the body surface, an air layer called the boundary layer is created, which is a consequence of the convection. The authors speculated that the temperature is more constant in a cryochamber than in a cryo-cabin because the chamber is larger and contains a bigger volume of cold air, they also speculated that the greater number of nozzles on cryochambers play an important role. They showed that the actual temperature in the cryo-cabin was substantially different compared to the temperature reported by the cabin producer (Savic et al., 2013).

Studies have measured the variations in mean skin temperatures between pre and post-PBC exposure, and their findings have ranged from 5.6 °C (Fonda et al., 2014) (1 min 30 s, –140 °C, PBC Criomed, measured with a thermolaser) to 9.9 °C (Savic et al., 2013) (3 min, –140 °C, PBC Criomed, measured by thermal imaging). Fonda et al. (2014) have compared different PBC exposure durations using the Criomed Model ranging from –130 to –170 °C. The calculated variations in mean skin temperature were 5.6 °C for 1 min 30 s, 7.1 °C for 2 min, 8.4 °C for 2 min 30 s, and 9.4 °C for 3 min. Nevertheless, these data should be treated with caution because skin temperature was measured with a thermolaser. Thermolasers measure temperature at a specific point, and

this measure is less sensitive than thermal imaging, which measures the temperature of the entire surface.

Hauswirth et al. (2013) measured the variations in tympanic temperatures (Kriion Model, Saint Petersburg, Russia). They found minor changes 20 min after exposure (–0.05 °C). Louis et al. (2015) also showed reductions in tympanic temperature after PBC exposure with the same device of –0.28 °C after the first exposure, and of –0.34 °C after five exposures (one exposure per day). All the reported skin and core temperatures before, during and after PBC are presented in Table 2, with the device models used if they were described in the publication. PBC has been principally used in studies of exercise recovery. Only one study of rheumatoid arthritis patients has been performed with a PBC device (unknown model) (Jastrzabek et al., 2013).

2.2. Whole-body cryotherapy devices

The second type of devices is the whole-body cryochambers, in which the subject is entirely exposed to the treatment. These cryochambers are divided into two or three compartments of different temperatures, generally –10 °C, –60 °C and –110 °C to –160 °C. Chambers are often able to accommodate four or five individuals. There are two different ways to create cold air in the chambers. Chambers with large air compressors divide oxygen and nitrogen, and, once separated, the nitrogen cools. When it is sufficiently cooled, the nitrogen is remixed with oxygen (oxygen=22 \pm 2%) and injected into the chamber. The second type chamber creates cold by circulating nitrogen inside the compartment walls. This type of technology appears to be safer because the subject is not directly in contact with the nitrogen sprays. Nevertheless, it requires windows or a camera to observe the patient/subject, a security button to stop the treatment and a security door for fast exit. Again, professional supervision is required for safe use, and appropriate safety procedures must be applied.

In terms of mobility, no truly mobile WBC technology exists. One producer has developed a device in a container that can be

transported (WBC Kriosystem). However, the mobility of this container is limited because it requires a large truck for transport. A large truck is not suitable for following athletes at events (e.g., cycling races such as the Tour de France). The other WBC models take up a great deal of space and are not mobile. For example, the Zimmer devices consist of two parts, two or three chambers and the motor, which requires another entire room. The second mobility problem is the chamber's electrical supply: the chambers require a current of 380 V, and the necessary jacks are not common. However, there are some newer products for which 240 V is sufficient. WBC devices are more expensive to purchase than PBC devices (€80,000 to €350,000 and €45,000 to €60,000, respectively). WBC devices also require important maintenance.

Studies have measured the variations in mean skin temperatures between pre- and post-exposure in WBC devices, and their findings have ranged from 5.8 °C (Cholewka et al., 2012) (3 min, –120 °C, unknown model, measured by thermal imaging) to 19.5 °C (Westerlund et al., 2003) (2 min, –110 °C, WBC Zimmer, measured with thermocouples). This second result should be viewed with caution because the lowest temperature was measured during exposure, and the measurements were performed using thermocouples. Thermocouples record temperature at a specific point, and the recorded temperature may easily have been affected by different factors during the exposure. Thermocouples also have other shortcomings. Nevertheless, the primary goal of this study was to ensure that a 2 min WBC exposure at –110 °C involved no risk of frostbite. Such an approach should be required when different exposure durations and temperatures are used. Another interesting finding of this study was the notable increase in skin temperature immediately after exposure. The study's results showed that measurements of skin temperature must be performed quickly after exposure to obtain the actual lowest skin temperature.

One study compared the effect of several WBC exposure durations on the skin temperatures of fourteen professional rugby players (Selfe et al., 2014). These findings showed that the most significant decrease in mean skin temperature occurred during a 3 min WBC exposure period (14.9 °C) rather than a 2 min (12.5 °C) or 1 min exposure period (8 °C). Hammond et al. (2014) compared skin temperature variations between females and males after a WBC exposure of 60 s at –60 °C and 2 min at –110 °C. The findings showed a greater decrease of temperature in females (12.7 °C) than in males (10.1 °C).

The effect of WBC on core temperature has been measured in several studies. Two studies reported no change in the first 30 min post-exposure for gastro intestinal (Selfe et al., 2014) and tympanic (Westerlund et al., 2003) temperatures. Three other studies demonstrated significant decreases in tympanic temperature (Cholewka et al., 2012; Hausswirth et al., 2013; Louis et al., 2015) and one study showed a significant decrease in rectal temperature (Table 2). All the reported skin and core temperature values and variations before and after WBC are shown in Table 2; the models of the devices that were used are provided when known.

Costello et al. (2012b) measured the decrease in muscular temperatures of the vastus lateralis at a depth of 1, 2 and 3 cm after a 4-min WBC exposure (30 s at –60 °C and 3 min 30 at –110 °C; WBC Zimmer, measured with a flexible intramuscular temperature probe). The authors reported significant decreases in muscular temperature 1 h after exposure for the three depths (1 cm: –1.6 °C; 2 cm: –1.2 °C; 3 cm: –1.6 °C) and a significant effect over time in deep muscle temperature (3 cm subcutaneous) compared to baseline (from –0.9 °C post 20 min to –1.7 °C post 60 min).

WBC has been used in studies measuring the effects of cryotherapy on physical and mental health and on post-exercise recovery.

2.3. Advantages and limits

PBC appears to have the most advantages in the sport recovery domain, especially when the treatment must be performed in the field. PBC devices are mobile, require less space and can easily be turned on and off. WBC devices require more space and are not mobile. However, a significant number of the available of this technology have demonstrated that WBC confers benefits in most domains. Moreover, WBC appears to induce greater mean skin temperature and core temperature variations pre- and post-exposure than PBC. WBC devices enable the treatment of several patients at the same time, and this could be important in the sport recovery domain by allowing athletes to spend less time waiting for treatment exposure during competitions days.

The first limitation of these two technologies is safety, particularly for the PBC. However, although PBC devices may be more dangerous because patients are in direct contact with nitrogen, it is easier to exit a PBC cabin. Individuals are entirely exposed in WBC chambers, and the devices require a way to communicate visually and orally with the individuals. Moreover, there must be emergency stop buttons and exits. The second limitation is energy consumption. PBC devices are less expensive to purchase; however, they are large consumers of nitrogen, and nitrogen is expensive. Furthermore, during competition services, nitrogen is not easy to supply. The electrical supply for WBC devices is also of importance and typically requires a 380 V of current. WBC chambers also require more maintenance than PBC cabins. The third limitation is the heterogeneity of the temperature during exposure in a PBC device. No data are available concerning the temperatures inside WBC chambers. Finally, the last limitation is the place of installation. PBC devices are mobile, but the regulations for nitrogen storage are restrictive. It is not possible to store nitrogen everywhere. WBC devices have fewer regulation problems and no nitrogen storage problems, but they require a great deal of space.

After reviewing studies of cryotherapy/cryostimulation, it appears that a great deal of information is lacking regarding the technology used (model, origin, etc.) and precise temperatures during exposure. The diversity of the technologies used in the studies also raises the question: What are the optimal exposure temperatures required to achieve the desired effects? Finally, the actual temperatures of exposure in both devices remain unknown. The only available study results that are relevant to this context showed a temperature of approximately –50 °C rather than the expected –110 °C.

3. Whole- and partial-body cryotherapy exposure protocols

3.1. Application in the physical and quality of life domains

3.1.1. Rheumatoid arthritis

Rheumatoid arthritis (RA) is a chronic, autoimmune, inflammatory and destructive joint disease. Patient mobility is decreased due to chronic pain and morning stiffness, and functional disability affects the quality of life of the patient (Aletaha et al., 2010). Pro-inflammatory cytokines, especially interleukin-6 (IL-6) and tumour necrosis factor- α (TNF- α) play key roles in local and systemic manifestations of RA, inducing fatigue, pain and depression (Choy, 2012).

WBC use has induced positive effects in patients with RA. During a 2-week rehabilitation program, a significant reduction in IL-6 and TNF- α was shown in 25 patients with RA after WBC treatment (Gizinska et al., 2015). The treatment protocol was ten 3-min exposures at –110 °C. Patients performed one daily exposure for the two-week period, excluding weekends. In addition

to a decrease of pro-inflammatory cytokine concentrations in the blood, the authors demonstrated an improvement in pain and fatigue status according to a visual analogue scale (VAS) and disease activity score 28 (DAS28), which considered the number of swollen and tender joints, global VAS score as assessed by the patient, and the erythrocyte sedimentation rate. Finally, walking time and the numbers of steps taken in a walking test of 50 m decreased. Jastrzabek et al. (2013) found similar results in a study of 40 RA patients. They also demonstrated a decrease in the concentration of circulating TNF- α after treatment. The study protocol consisted of twenty 3-min PBC sessions at -160°C conducted twice daily for ten days.

Another study of 40 patients with RA showed a decrease in pain sensation and morning stiffness on the VAS and in disease score activity (DAS28) and an improvement in the physician's global assessment (Hirvonen et al., 2006). The protocol consisted of twenty exposures, three daily for six days and two on the last day. Two exposure temperatures were compared: -60°C and -110°C . The duration of exposure was not indicated. The patients were randomized between the two groups (20 per group). Between the groups, the -110°C WBC group showed a greater decrease in pain than the -60°C WBC group.

A recent meta-analysis of six studies and 257 RA patients showed that consistent use of WBC (14–20 applications) significantly decreased pain on the VAS and DAS 28 (Guillot et al., 2014). It appeared that the repetition of exposure was significant in treatment efficiency.

3.1.2. Fibromyalgia

Fibromyalgia is a chronic widespread pain disorder. The allodynia and hyperalgesia induced by an imbalance in the level of the neurotransmitters and in pro- and anti-inflammatory mediators are the sources of neurological pain. Fibromyalgia involves fatigue, sleep problems and other frequent comorbid physical and mental disorders (Trinanes et al., 2014).

A study has already demonstrated that patients with fibromyalgia (FM) treated with WBC report an improvement in quality of life (Bettoni et al., 2013). This study was conducted with 50 patients with FM. The WBC treatment protocol consisted of 15 sessions over a period of 3 weeks. Each session duration was 30 s at -60°C and 3 min at -140°C . In this study, a VAS was used to measure pain and a self-assessment questionnaire regarding global health status was used to calculate the disease activity score. A qualitative score of the physical and mental health of the patients with FM was obtained via the Short Form Health Survey (SF-36). Fatigue was evaluated with the Fatigue Severity Scale. The findings showed a positive effect of WBC on the quality of life of a group of patients with FM as demonstrated by improvements in all the qualitative indexes. The authors speculated that improvement was due to the effects of cryotherapy on the balance between pro- and anti-inflammatory mediators, which have a role in the modulation of pain (Lubkowska et al., 2010, 2011; Bettoni et al., 2013).

3.1.3. Ankylosing spondylitis

Ankylosing spondylitis (AS) is a chronic, usually progressive inflammatory rheumatic disease affecting primarily the axial skeleton and sacroiliac joints. Chronic inflammation in the spine can develop into a complete fusion of the vertebrae. This phenomenon is called ankylosis, which causes a total loss of mobility of the spine. Moreover, AS may affect peripheral joints, skin, eyes, bowels or lungs (Stanek et al., 2015). The symptoms of the disease include pain and stiffness in the lower back, the upper buttock area, the neck, and the remaining regions of the spine, which may lead to structural and functional impairment (Gran and Skomsvoll, 1997).

A study of 48 males demonstrated the positive effects of WBC

treatment in AS patients. The participants were divided into two groups (Stanek et al., 2015). A group of 32 patients were exposed to WBC procedures with subsequent kinesiotherapy and a group of 16 patients were exposed only to the kinesiotherapy procedure. The WBC protocol was ten 3-min exposure sessions, once a day for 10 consecutive days, excluding the weekend. The exposure times and temperatures were 30 s in a -60°C chamber and 3 min in a -120°C chamber. Immediately after leaving the cryotherapy chamber, patients in the WBC group underwent a one-hour kinesiotherapy session. The primary outcomes consisted of the measure of two indexes, the BASDAI and the BASFI. The Bath Ankylosing Spondylitis Disease Activity Index (BASDAI) includes six questions related to fatigue, back pain, peripheral pain and swelling, local tenderness and morning stiffness (degree and length). The Bath Ankylosing Spondylitis Functional Index (BASFI) is the mean score of ten questions addressing functional limitations and levels of physical activity at home and work assessed on VAS scales (0=easy; 10=impossible). The secondary outcomes consisted of pain intensity and chosen spine mobility parameters. After the completion of the treatment, all measured parameters were improved in both groups. The examined parameters' changes were significantly higher in the WBC group than in the kinesiotherapy group. The authors observed a decrease of approximately 43% of pain intensity in the WBC group. The BASDAI estimates the disease score activity. In this study, disease scores decreased approximately 40% in the WBC group. Moreover, after the completion of the treatment, the WBC group's score value corresponded to an "inactive disease" score. The same conclusion was reached using the BASFI, which showed a decrease in pain of approximately 30% in the WBC group, with a corresponding score of "inactive disease". This study demonstrated that WBC treatment has positive effects on AS patients in terms of disease and functional score indexes, in the reduction of pain intensity and in the improvement of some spinal mobility parameters.

3.1.4. Multiple sclerosis

Multiple sclerosis (MS) is a chronic heterogeneous disease with an unpredictable clinical course. Symptoms can include paralysis, ataxia, spasticity, incontinence, and fatigue syndrome. Fatigue is considered to be the most prevalent and disabling of the symptoms at all stages of the illness, and it occurs in 70–80% of patients. This characteristic of the disease directly impacts the quality of life of patients, affecting their social, physical and occupational well-being (Miller, 2012). Heat stress also presents a problem in MS patients. It appears that a decrease in body temperature might increase the conduction of nerve signalling and alleviate many symptoms, particularly fatigue (Miller, 2012).

A recent study showed an improvement in the fatigue status and functional abilities of MS patients who had ten 3-min WBC exposures between -110°C and -130°C (Miller et al., 2016). The patients received one exposure each day for two weeks, excluding the weekend. Miller et al. (2010, 2013) also showed a long-lasting effect on the level of uric acid, the main antioxidant in human blood, in 22 MS patients who had ten 3-min exposures at -130°C . Extended disability status was assessed using a perceptivity scale, and the findings showed a decrease in disability with WBC treatment. Miller et al. (2010) also showed an increase in total antioxidative status levels in the plasma of 22 MS patients who received between 2 and 3 min of WBC exposure at -160°C . Moreover, the effect was greater in depressive MS patients ($n=12$) than in non-depressive MS patients ($n=10$).

3.1.5. Chronic low back pain

Chronic low back pain is one of the most frequent musculoskeletal pain syndromes. Acute low back pain is self-limiting and becomes a chronic pain syndrome that has an important impact

on quality of life. In one study, demonstrated pain relief in patients who suffered from low back pain was shown using three different perceptual scales (Nugraha et al., 2015). Interestingly, this study showed the same effect from ten 3-min WBC exposures (one per day) at -65°C and at -5°C in a cryochamber for this pathology.

Previous studies have shown that local analgesia in cryotherapy requires the skin temperature to be below 13.6°C , when nerve conduction and acetylcholine formation become suppressed (Bugaj, 1975). In most of the studies mentioned in the first paragraph, this temperature was not reached. Nevertheless, pain was found to be alleviated, although skin temperatures remained well above 13.6°C . Nevertheless, this temperature can be reached in the back during the exposure (Leppaluoto et al., 2008). According to Leppaluoto et al. (2008), pain alleviation can be explained by a lessening of nerve transmissions over a large area of the body, and it is also possible that humoral mechanisms may be responsible for alleviating symptoms after whole-body cryotherapy.

3.1.6. Depression and anxiety symptoms

The impact of WBC on well-being, mental state and quality of life has not been the subject of many scientific studies. The few investigations of these topics have been conducted with patients suffering from depressive symptoms, anxiety, spinal pain syndromes or peripheral joint disease. The main outcomes were assessed using perceptual scales or surveys. WBC has a beneficial effect on patient quality of life because patients experience a decrease in pain (cf. paragraph II). Such a change may be linked to hormonal responses. Indeed, WBC increases body metabolism and the plasma concentrations of catecholamine (adrenaline, noradrenaline), cortisol, adrenocorticotropic hormone (ACTH) and β -endorphins (Leppaluoto et al., 2008). However, the increase of plasma ACTH, cortisol and β -endorphins was lower after several exposures. In contrast, there was no habituation for the increase in noradrenaline.

Depression may be due to neurobiological dysfunction with a dysregulation of the hypothalamic-pituitary-adrenal axis. The brain's opioid peptide systems are known to play an important role in motivation, emotion, attachment behaviour, response to stress and pain, and the control of food intake (Nestler et al., 2002). It appears that the positive effects of WBC on both external and internal pain are due to the activation of the endogenous opioid system and "pain control system". This multi-system reaction could play a role in the treatment of mental disorders (Rymaszewska et al., 2008).

Studies have demonstrated that general well-being, quality of life and mood were improved in patients with spinal pain syndromes or peripheral joint disease who received ten 3-min WBC exposures (Szczepanska-Gieracha et al., 2013). Depressive symptoms, anxiety, and other mental states were also improved by the therapy. Moreover, this study showed that the strongest effects were noted in patients with the greatest problems in terms of mood and well-being before beginning the therapy. Rymaszewska et al. (2008) showed positive effects after one week of treatment (5 exposures) in 26 patients with depressive and anxiety disorders. The improvements continued to be significant over the entire three-week cycle of cryotherapy, with 15 exposures of 2–3 min at temperatures ranging from -110°C for the first session to -160°C for the last session.

3.1.7. In summary

According to the literature, WBC and PBC have positive effects on the physical and psychological parameters of RA patients, and WBC has positive effects on the physical and psychological parameters of patients with FM, AS and MS. It appears that the WBC and PBC exposure protocols for these types of pathologies must include at least ten 3-min WBC exposures, one per day. The

minimum necessary exposure temperature is -60°C , although a colder temperature induces greater effects (Table 3).

- Ten to twenty 3-min WBC or PBC exposures, one per day, between -60°C and -110°C appears to be effective for RA patients.
- Fifteen 3-min exposures, one per day, at -140°C appears to be effective for FM patients.
- Ten WBC exposures, 30 s at -60°C and 3 min at -120°C , one per day, appears to be effective for AS patients.
- Ten 3-min WBC exposures between -120°C to -130°C , one per day, appears to be effective for MS patients.
- Ten 3-min exposures at -5°C or -65°C , one per day, appears to be effective for low back pain patients.

WBC also appears to have positive effects on mental state and well-being in several patient groups. Studies have demonstrated the benefits of several 2- or 3-min exposures from -110°C to -160°C (Table 3).

- Ten 3-min WBC exposures, with 1- and 2-min exposures for the first two sessions at -130°C , are recommended for patients with spinal pain syndromes and peripheral joint disease.
- Fifteen 2- or 3-min WBC exposures, one per day, four per week, from -110°C to -160°C are recommended for patients with depressive or anxiety syndromes.

3.2. Application in physical exercise recovery

3.2.1. Inflammatory response

Intense training can induce muscle damage and subsequent inflammation. Muscle soreness, swelling and prolonged loss of muscle function can follow exercise. Strenuous exercise induces the release of the C-reactive protein (CRP) and an increase in the pro-inflammatory cytokines TNF- α , IL-1 β , IL-2 and IL-8 and in the myokine IL-6 in the circulatory system. In response to this phenomenon, there is a release in the interleukin inhibitor interleukin 1 receptor antagonist (IL1-ra) and in the anti-inflammatory cytokine IL-10 (Chatzinikolaou et al., 2010; Ostrowski et al., 1999).

WBC is used to limit the inflammatory process that occurs subsequent to physical exercise. A study showed the positive effects of WBC on recovery after a single bout of running exercise. Eleven well-trained runners performed a 48-min simulated training race with different intensities, which was followed by WBC (Pournot et al., 2011). The protocol consisted of 4 sessions of 3 min at -110°C after crossing through the chambers at -10°C and -60°C . The sessions were performed immediately and 24 h, 48 h and 72 h after the simulated run. The study found that a single exposure to WBC significantly alleviated inflammation after the run. Compared to a passive condition, the study observed a lower increase in IL-1 β 1 h after exercise, a greater increase in IL-1ra 1 h and 24 h after exercise, and a strongly limited increase of the CRP at 24 h up until 48 h after exercise. The authors concluded that a single session of WBC exposure for 3-min at -110°C performed immediately after exercise enhanced muscular recovery by restricting the inflammatory process due to exercise-induced low to moderate muscle damage.

A study of ten professional rugby players demonstrated an increase in the concentration of anti-inflammatory cytokine IL-10, and decreases in pro-inflammatory cytokine IL-2, chemokine IL-8, the level of soluble intercellular adhesion molecules 1 (sICAM-1) and prostaglandin. The players had to perform 5 WBC sessions, one per day, after 3 h of training. They were exposed at -60°C for 30 s and at -110°C for 2 min (Banfi et al., 2009).

Lubkowska et al. compared the effects of several repetition protocols (one per day) for WBC exposure on inflammatory

parameters (Lubkowska et al., 2011). The participants consisted of 45 healthy subjects divided into three equal groups. One group received WBC once a day for 5 consecutive days; the second group had 10 daily WBC exposures for two weeks, excluding the weekend; and the third group received 20 WBC exposures, once a day for four weeks, excluding weekends. Each WBC session lasted 3 min, 30 s at -60°C and then 2 min 30 s at -130°C . Several participants occupied the chamber at the same time. The levels of myokine IL-6 and anti-inflammatory cytokine IL-10 increased after 5, 10 and 20 WBC exposures, returning to the initial state two weeks after exposure. The most significant increase was observed with 20 exposures. The level of pro-inflammatory cytokine IL-1 α decreased with the three treatments and remained decreased two weeks after the series of 20 exposures. The authors suggest that a series of 20 exposures conveys higher anti-inflammatory effects.

Ziemann et al. (2012) showed that the use of WBC for 5 days combined with moderate-intensity training was more effective for the recovery process, especially for decreasing inflammatory syndrome after exercise, than the training alone. Indeed, at the end of a five-day training camp, the authors observed an improvement in the cytokine profiles of twelve professional tennis players who were exposed to WBC after training. The players had to perform ten 3-min WBC exposures at -120°C twice a day for five days. A decrease in TNF- α and an increase in IL-6 were observed. Similar findings were found in 9 healthy active men (Ferreira-Junior et al., 2014b). These subjects performed eccentric exercises to induce muscle damage and then rested for five days, during which they had two 3-min WBC sessions at -110°C each day. They then performed a second round of eccentric exercise, and the study showed that the five days of rest accompanied by WBC significantly enhanced the concentration of the anti-inflammatory cytokine IL-10, significantly reduced the level of pro inflammatory cytokine IL-1 β and reduced muscle damage. Moreover, after the second round of exercise, the concentration of IL-10 was two-fold higher in comparison to the baseline, whereas the concentration in the control group remained unchanged.

Mila-Kierzenkowska et al. (2013) showed that WBC exposure (2 min at -130°C) before a submaximal exercise limited inflammation after exercise in 18 professional volleyball players, compared to a control group that did not receive WBC.

3.2.2. Muscle damage recovery

An unusual and/or high-intensity physical exercise can induce delayed-onset muscle soreness, resulting in a sensation of discomfort, predominantly within the skeletal muscles. Muscular performance may temporarily be impaired for several minutes, hours or days following very intense exercise. This may interfere with athletic training or competition (Costello et al., 2012a).

Some studies have investigated the effects of WBC and PBC on muscle damage recovery. A study of 26 physically active males demonstrated faster recovery of muscle strength and relieved pain 72 h after damaging exercises (five sets of twenty drop jumps from a 0.6 m box) with no alteration in muscle thickness one 3-min PBC exposure at -110°C was used 10 min after the exercise in comparison with a control group (Ferreira-Junior et al., 2014b). Hausswirth et al. (2011) assessed the effects of three WBC exposures at 1 h, 24 h and 48 h after a damaging simulated trail run in nine highly-trained endurance runners. They demonstrated that maximal muscle strength and perceived sensations (pain and well-being) were recovered after the first WBC session (post 1 h) while recovery took 24 h when using a passive recovery method. The participants using WBC traversed two rooms at -10°C and -60°C and stayed at -110°C for 3 min.

Improvements in pain, knee flexion, rates of torque development, start squat jump power and maximal torque protection were in eleven healthy males with PBC exposure after plyometric

exercise (Fonda and Sarabon, 2013). Subjects performed six PBC exposures, one per day, for six consecutive days after the plyometric exercise (the first exposure was organised 1 h after the end of the exercise). The protocol was a 3-min exposure at -140°C to -195°C . Pain sensation was lower in the treatment group than in the control group from the first exposure to the fourth (post 72 h). Squat jump start power was higher for the treatment group than the control group after the first exposure, while maximal torque production and torque rate of development were better after the second exposure (post 24 h).

These articles demonstrate the beneficial effects of WBC and PBC on pain and well-being sensations and on muscle strength recovery after exercise-induced muscle damage resulting from moderate (trail run) and high intensity (plyometric) exercise. Nevertheless, two WBC exposures two hours apart for 3 min at -110°C performed 24 h after the muscle-damaging exercise were not able to improve muscle soreness or force recovery (Costello et al., 2012a). These findings were probably due to the time between exercise and WBC exposure and the physical activity level of the participants. The subjects were not very physically active and the exercise-induced damage may have been too great. In this study, the physical exercise was only eccentric; whereas in the other studies, the physical exertion was a combination of concentric and eccentric exercises, which induced a lower level of muscular damage. WBC and PBC may have positive effects on muscle pain and strength recovery, but to obtain these benefits muscular damage should not be too extensive, and exposure should be performed in the first few hours after exercise.

3.2.3. Autonomic nervous system

The autonomic nervous system (ANS) influences the modulation of cardiac activity. At rest, the two branches of the ANS establish an equilibrium for the heart rate. The sympathetic branch accelerates the heart rate through neural and humoral pathways (catecholamine), while the parasympathetic branch decelerates the heart rate through neural pathways. Parasympathetic activity is known to be related to exercise recovery and to a decreased risk of cardiovascular incidents (Bieuzen et al., 2015).

Another study further demonstrated increased ANS activity, predominantly of the parasympathetic branch, after a single exposure of WBC and PBC (Hausswirth et al., 2013). The study involved 40 healthy men who received a single 3-min WBC exposure at -110°C and a single 3-min PBC exposure at -160°C . The results showed that WBC had a greater effect on ANS. According to the authors, head exposure to the cold accentuates parasympathetic activation by cold stimulation in the trigeminal brain stem. However, another study showed less variation in the effects of these two methods on ANS (Louis et al., 2015). The authors compared the effects of PBC at -160°C and WBC at -60°C . Plasma norepinephrine concentration after the first exposure was similar for both techniques. However, this study evaluated WBC exposures at -60°C , and the authors reported that plasma catecholamine concentrations and ANS activity responses were lower at this temperature than in studies with WBC exposure at -110°C .

A study of eleven elite synchronised swimmers also reported an increase in heart rate variability indices reflecting parasympathetic activity with a single 3-min WBC exposure at -110°C conducted after ballet training (Schaal et al., 2013). The authors also observed a larger clearance of plasma lactate. The swimmers reached higher VO_2 peak values in the second exercises when they received a WBC exposure after the first exercise. It was interesting to observe the strong influence of a single WBC exposure received shortly after a maximal exercise on parasympathetic reactivation in this study.

Westerlund et al. (2006) also showed an increase in

parasympathetic activity in ten females who were moderately physically active after a single 2-min WBC exposure at -110°C . However, when such exposures were repeated over 3 months with 3 exposures per week, an attenuation in the increase of the parasympathetic tone was observed. It would be interesting to investigate this “cold habituation” finding in a study on exercise recovery.

3.2.4. Quality of sleep

The quality of sleep is considered key to the recovery process of athletes (Samuels, 2008). Two studies have recently demonstrated the beneficial effect of WBC and PBC on sleep quality. The first study investigated the effects of fourteen 3-min WBC exposures at -110°C (one per day for fourteen consecutive days) in ten elite synchronised swimmers during an intense training period (experiment leading to a functional overreaching in athletes) (Schaal et al., 2014). The authors demonstrated the positive effects of the treatment on sleep latency and efficiency and perceived fatigue compared to the control group. The second study, conducted during international competitions, showed a 15% enhancement in perceived sleep quality in 27 elite basketball players after a single 3-min PBC exposure at -130°C (Bouzigon et al., 2014).

3.2.5. Oxidative stress

The cells continuously produce free radicals and reactive oxygen species (ROS) as part of the metabolic process. These free radicals are neutralised by elaborate antioxidant defence systems consisting of enzymes such as superoxide dismutase, catalase and glutathione peroxidase and numerous non-enzymatic antioxidants (Stankovic and Radovanovic, 2012). Physical exercise induces an enhanced formation of ROS, which is closely correlated with muscle action intensity. The imbalance between ROS and antioxidants is called oxidative stress. If the increase in free radicals is greater than the ability to neutralise them, the radicals will attack cellular components, especially lipids. This phenomenon is called lipid peroxidation and leads to the generation of more radicals and ROS that can harm other cellular components and induce membrane damage (Urso and Clarkson, 2003). A pioneering study in winter swimmers has shown that repeated extreme cold exposure induces significant oxidative stress (Siems and Brenke, 1992). These results have since been counterbalanced, and several studies have shown that acute and regular WBC and winter swimming lead to an increase in plasma antioxidative capacity (a protective effect). A series of thirty-six 2-min WBC exposures at -110°C during a period of 12 weeks or after winter swimming sessions (Dugue et al., 2005), as well as a series of twenty 3-min WBC exposures at -130°C were able to increase plasma antioxidative capacity (Lubkowska et al., 2012). Lubkowska et al. (2008, 2009) suggested that one-time WBC is a stress-inducing factor for a healthy body with a low level of oxidative stress and that a repetition of exposures may lead to the activation of antioxidant defence mechanisms in the body. The authors demonstrated that a single session of 3-min WBC exposure at -130°C was able to significantly lower the level of plasma total oxidative status 30 min after the end of the exposure. This level remained low the following day, whereas the level of total antioxidative status decreased after cold exposure and increased the following day. The same observation was found in a study of obese participants (Lubkowska et al., 2015). The study demonstrated that two treatments of 20 daily WBC exposures before and after six months of moderate aerobic activity resulted in an increase in the activity of the anti-oxidant enzyme superoxide dismutase in the period following the WBC exposure.

The use of WBC prior to training may reduce the risk of oxidative stress and the extent of muscle fibre injuries provoked by intense exercise (Wozniak et al., 2013). These effects were

demonstrated in a study on six elite rowers. Two daily WBC sessions before trainings were organised over 6 days. The exposure protocol was 10–20 s at -60°C and 3-min from -125°C to -150°C . The activity of superoxide dismutase and glutathione peroxidase in blood was lower after the third day of training in the subjects who received WBC than in the subjects who were not exposed to WBC. WBC exposure before the training also led to a decrease in circulating peroxidation products in elite rowers, whereas the training alone led to an increase in the concentration of those products.

The same findings were observed in a study of eighteen male professional volleyball players (Mila-Kierzenkowska et al., 2013). The players experienced one 2-min WBC exposure before a 40-min sub-maximal exercise period on a cycle ergometer. The activity of superoxide dismutase and catalase were lower after exercise preceded by WBC. The study also found a lower concentration of the pro-inflammatory cytokine IL-1 β after exercise preceded by WBC. The protocol was a single 2-min exposure at -130°C after 10–20 s at -60°C .

Sutkowy et al. (2014) showed a decrease in oxidative stress in 16 international level kayakers who combined WBC with their training during preparation for the world championship. The athletes received two exposures per day, before and after training, for 19 days. They were exposed for 30 s at -60°C and 3 min at -120°C . After 5 days, a decrease in glutathione peroxidase (GPx) occurred. However, after 19 days, there was a decrease in thio-barbituric acid reactive substances (T-BARS), indicating a decrease in lipid peroxidation.

3.2.6. In summary

Current literature suggests that single and repeated short-term treatments with WBC or PBC after exercise have beneficial effects on exercise recovery (Table 4).

- A decrease in the inflammatory process seems to occur with a single 2- or 3-min WBC exposure at -110°C after exercise. A 2-min WBC exposure at -130°C before submaximal exercise also resulted in a decrease in the inflammatory response after exercise.
- Relief of exercise-induced muscular pain is obtained from one to six 3-min PBC or WBC exposures. The exposure temperatures can range between -110°C and -195°C . However, the muscular damage must not be too extensive, and the exposure must occur less than 24 h after the end of the exercise.
- Improvement in ANS activity, especially parasympathetic post-exercise reactivation, is shown to occur after the first cold exposure and through a series of 38 exposures (two per day, before and after training). However, with prolonged treatment, the parasympathetic activity response is attenuated. The exposure can be conducted with either PBC or WBC. The protocol for WBC should be a 2- or 3-min exposure from -60°C to -110°C ; the protocol for PBC should be a 3-min exposure at -160°C .
- Enhancement of the quality of sleep was observed after a single 3-min PBC exposure at -130°C and after fourteen 3-min WBC exposures at -110°C (one exposure per day).
- Finally, WBC exposure before exercise reduces exercise-induced oxidative stress. This effect occurs after only one exposure. The duration can be a 2-min exposure at -130°C or a 3-min exposure between -125°C and -150°C .

3.3. Advantages and limits

It appears that WBC and the PBC have significant positive effects in several domains. Furthermore, no negative effects on the studied parameters were found. While several studies reported no effect, none of them reported negative effects.

The current problems in need of resolution include the absence of standardisation in PBC and WBC protocols. Studies showed the beneficial effect of PBC and WBC, but the protocols were often different, especially in terms of exposure temperature. This may be explained by the differences between the technologies used of the two treatments and by the differences among the devices used in the studies. It is of primary importance to determine the validity and practicality of the two technologies. Additionally, the exposure temperatures inside each PBC and WBC model should be measured with a higher degree of precision.

The same cold stimulus at the same temperature for the same duration may be perceived differently by different subjects. Anthropometric characteristics, especially body mass index (BMI), are known to influence thermal transfer in humans subjected to cold stimuli (Dugue and Leppanen, 2000; Glickman-Weiss et al., 1993; Parsons, 2002; Smolander et al., 2004). Moreover, it appears that gender may also have an influence. Therefore, it would be of interest to consider the anthropometric and gender characteristics of patients/subjects to determine individualised exposure protocols (duration and temperature). This methodological paragraph also highlights the small number of PBC studies and the lack of comparisons among temperatures regarding cold-induced effects (e.g., the effects of WBC at $-110\text{ }^{\circ}\text{C}$ vs WBC at $-130\text{ }^{\circ}\text{C}$).

More extensive investigations over longer periods of time are needed to study the long-term effects of WBC and PBC on health outcomes. Although several studies assessed the effects of multiple exposure treatments, the longest duration of assessment was three months (Dugue et al., 2005; Miller et al., 2013). Consequently, there is no data available regarding the effects of WBC and PBC beyond three months of treatment. Additionally, data should be collected at intervals after the end of the WBC/PBC series of exposures to learn whether the cold-induced benefits are kept.

4. Conclusions and perspectives

WBC and PBC are experiencing considerable development in several domains. The two treatments have become a common topic in the areas of health, sport and well-being. Additionally, an increasing number of scientific articles have reported the effects of these therapies. It was therefore necessary to take stock of the technological and scientific evolution of these treatments. This review demonstrated the lack of information regarding actual temperatures inside the cabin or chamber during exposure. Currently, the temperature provided by the WBC device producers is $-110\text{ }^{\circ}\text{C}$, but it is very difficult to verify this temperature without data. The only measurement performed during an exposure showed a temperature of approximately $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ in the centre of a cabin without a participant inside (Savic et al., 2013). Indeed, it appears that the technologies used are not able to effectively control the temperature inside the cabins and chambers. More elaborate future systems should help to optimize treatment protocols by offering a more precise temperature control inside the room and a better distribution of cold.

This review also demonstrated the heterogeneity among the exposure protocols used in the scientific literature. To develop a truly effective repertoire of exposure protocols, a method should be established to measure the temperatures in all of the WBC and PBC models. Additionally, the wide variety of protocols in place across the different exposure times will certainly require more methodological relevance. It would be interesting to more precisely study the effects of different temperature, and the duration and the number of exposures. The anthropometric characteristics and gender of the patient should consider. Additionally, improved precision would allow observation of the dose-response effect of different exposure protocols. The accumulation of data would lead

to optimisation of WBC and PBC exposure protocols, which would serve the function of achieving the desired effect according to each individual's needs.

Technologically, it is imperative to develop a safe device for the patient. Indeed, Table 1 shows that there is a lack of information relating to the European community medical marking (CE Medical) on several models. With regard to the safety of these technologies (one death in a cryo-sauna in 2015), the certification of medical devices seems inevitable. The mobility of the devices appears to be important, and this feature will require an optimised means of supplying the devices while they are mobile and a size that is better adapted for installation.

This review contributes to the optimisation of cold treatments offered by health professionals and medical and paramedical personnel (kinesiotherapists, coaches, physical trainers, wellness centre operators, and others). This review will enable professionals to choose the technologies and adapt the protocols best suited to their activities so that they may optimize their services and achieve the desired effects for their patients or customers. Cryotherapy/cryostimulation apparatus producers can also use the scientific results to create more efficient devices that meet market requirements.

Acknowledgements

Samuel Queniat and Jean Gratacos and their team from Cryantal Développement are warmly thanked for their logistical support. Romain Bouzigon received a grant from the French Government (Grant no. 703/2012). The study was supported by Cryantal Développement.

References

- Aletaha, D., Neogi, T., Silman, A.J., Funovits, J., Felson, D.T., Bingham, C.O., Birnbaum, N.S., Burmester, G.R., Bykerk, V.P., Cohen, M.D., Combe, B., Costenbader, K.H., Dougados, M., Emery, P., Ferraccioli, G., Hazes, J.M., Hobbs, K., Huizinga, T.W., Kavanaugh, A., Kay, J., Kvien, T.K., Laing, T., Mease, P., Menard, H.A., Moreland, L.W., Naden, R.L., Pincus, T., Smolen, J.S., Stanislawski-Biernat, E., Symmons, D., Tak, P.P., Upchurch, K.S., Vencovsky, J., Wolfe, F., Hawker, G., 2010. 2010 Rheumatoid arthritis classification criteria: an American College of Rheumatology/ European League against Rheumatism collaborative initiative. *Arthritis Rheumatol.* 62, 2569–2581.
- Banfi, C., Melegati, G., Barassi, A., Dogliotti, G., Melzi d'Eril, G., Dugue, B., Corsi, M., 2009. Effects of whole-body cryotherapy on serum mediators of inflammation and serum muscle enzymes in athletes. *J. Therm. Biol.* 34, 55–59.
- Bettoni, L., Bonomi, F.G., Zani, V., Manisco, L., Indelicato, A., Lanteri, P., Banfi, G., Lombardi, G., 2013. Effects of 15 consecutive cryotherapy sessions on the clinical output of fibromyalgic patients. *Clin. Rheumatol.* 32, 1337–1345.
- Bieuzen, F., Louis, J., Hausswirth, C., 2015. Cryothérapie corps entier et exercice. *Sci. Sports* 30, 113–118.
- Bleakley, C.M., Hopkins, J.T., 2010. Is it possible to achieve optimal levels of tissue cooling in cryotherapy? *Phys. Ther.* 15, 344–350.
- Bleakley, C., Bieuzen, F., Davison Gareth, W., Costello, J., 2014. Whole-body cryotherapy: empirical evidence and theoretical perspectives. *Open Access J. Sports Med.* 5, 25–36.
- Bouzigon, R., Ravier, G., Dugue, B., Grappe, F., 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.
- Bugaj, R., 1975. The cooling, analgesic, and rewarming effects of ice massage on localized skin. *Phys. Ther.* 55, 11–19.
- Chatzinkolaou, A., Fatouros, I.G., Gourgoulis, V., Avloniti, A., Jamurtas, A.Z., Nikolaidis, M.G., Douroudos, I., Michailidis, Y., Beneka, A., Malliou, P., Tofas, T., Georgiades, I., Mandalidis, D., Taxildaris, K., 2010. Time course of changes in performance and inflammatory responses after acute plyometric exercise. *J. Strength Cond. Res.* 24, 1389–1398.
- Cholewicka, A., Stanek, A., Sieron, A., Drzazga, Z., 2012. Thermography study of skin response due to whole-body cryotherapy. *Skin Res. Technol.* 18, 180–187.
- Choy, E., 2012. Understanding the dynamics: pathways involved in the pathogenesis of rheumatoid arthritis. *Rheumatology* 51, 3–11.
- Costello, J.T., Algar, L.A., Donnelly, A.E., 2012a. Effects of whole-body cryotherapy ($-110\text{ }^{\circ}\text{C}$) on proprioception and indices of muscle damage. *Scand. J. Med. Sci. Sports* 22, 190–198.
- Costello, J.T., Culligan, K., Selfe, J., Donnelly, A.E., 2012b. Muscle, skin and core

- temperature after -110°C cold air and 8°C water treatment. *PLoS One* 7, e48190.
- Costello, J.T., Donnelly, A.E., Karki, A., Selfe, J., 2014. Effects of whole body cryotherapy and cold water immersion on knee skin temperature. *Int. J. Sports Med.* 35, 35–40.
- Dugue, B., Leppanen, E., 2000. Adaptation related to cytokines in man: effects of regular swimming in ice-cold water. *Clin. Physiol.* 20, 114–121.
- Dugue, B., Smolander, J., Westerlund, T., Oksa, J., Nieminen, R., Moilanen, E., Mikkelsen, M., 2005. Acute and long-term effects of winter swimming and whole-body cryotherapy on plasma antioxidative capacity in healthy women. *Scand. J. Clin. Lab. Invest.* 65, 395–402.
- Dugue, 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.
- Ferreira-Junior, J.B., Bottaro, M., Loenneke, J.P., Vieira, A., Vieira, C.A., Bemben, M.G., 2014a. Could whole-body cryotherapy (below -100°C) improve muscle recovery from muscle damage? *Front. Physiol.* 5, 247.
- Ferreira-Junior, J.B., Bottaro, M., Vieira, A., Siqueira, A.F., Vieira, C.A., Durigan, J.L., Cadore, E.L., Coelho, L.G., Simoes, H.G., Bemben, M.G., 2014b. One session of partial-body cryotherapy (-110°C) improves muscle damage recovery. *Scand. J. Med. Sci. Sports*, 524–530.
- Fonda, B., Sarabon, N., 2013. Effects of whole-body cryotherapy on recovery after hamstring damaging exercise: a crossover study. *Scand. J. Med. Sci. Sports*, 270–278.
- Fonda, B., De Nardi, M., Sarabon, N., 2014. Effects of whole-body cryotherapy duration on thermal and cardio-vascular response. *J. Therm. Biol.* 42, 52–55.
- Fricke, R., 1989. Ganzkörperkältebehandlung in einer Kältekammer mit Temperaturen um -110°C . *Z. Phys. Med. Balneol. Med. Klimatol.* 18, 1–10.
- Gizinska, M., Rutkowski, R., Romanowski, W., Lewandowski, J., Straburzynska-Lupa, A., 2015. Effects of whole-body cryotherapy in comparison with other physical modalities used with kinesiotherapy in rheumatoid arthritis. *BioMed. Res. Int.* 2015, 7.
- Glickman-Weiss, E.L., Nelson, A.G., Heaton, C.M., Goss, F.L., Robertson, R.J., Cassinelli, D.A., 1993. Effects of body morphology and mass on thermal responses to cold water: revisited. *Eur. J. Appl. Physiol. Occup. Physiol.* 66, 299–303.
- Gordh, T., 1988. Epidural clonidine for treatment of postoperative pain after thoracotomy. A double-blind placebo-controlled study. *Acta Anaesthesiol. Scand.* 32, 702–709.
- Gran, J.T., Skomsvoll, J.F., 1997. The outcome of ankylosing spondylitis: a study of 100 patients. *Br. J. Rheumatol.* 36, 766–771.
- Guillot, X., Tordi, N., Mourou, L., Demougeot, C., Dugue, B., Prati, C., Wendling, D., 2014. Cryotherapy in inflammatory rheumatic diseases: a systematic review. *Expert Rev. Clin. Immunol.* 10, 281–294.
- Hammond, L.E., Cuttill, S., Nunley, P., Meyler, J., 2014. Anthropometric characteristics and sex influence magnitude of skin cooling following exposure to whole body cryotherapy. *BioMed. Res. Int.* 2014, 7.
- Hauswirth, C., Louis, J., Bieuzen, F., Pournot, H., Fournier, J., Filliard, J.R., Brisswalter, J., 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.
- Hauswirth, C., Schaal, K., Le Meur, Y., Bieuzen, F., Filliard, J.R., Volondati, M., Louis, J., 2013. Parasympathetic activity and blood catecholamine responses following a single partial-body cryostimulation and a whole-body cryostimulation. *PLoS One* 8, e72658.
- Herrera, E., Sandoval, M.C., Camargo, D.M., Salvini, T.F., 2010. Motor and sensory nerve conduction are affected differently by ice pack, ice massage, and cold water immersion. *Phys. Ther.* 90, 581–591.
- Hirvonen, H.E., Mikkelsen, M.K., Kautiainen, H., Pohjolainen, T.H., Leirisalo-Repo, M., 2006. Effectiveness of different cryotherapies on pain and disease activity in active rheumatoid arthritis. A randomised single blinded controlled trial. *Clin. Exp. Rheumatol.* 24, 295–301.
- Huttunen, P., Rintamaki, H., Hirvonen, J., 2001. Effect of regular winter swimming on the activity of the sympathoadrenal system before and after a single cold water immersion. *Int. J. Circumpolar Health* 60, 400–406.
- Huttunen, P., Kokko, L., Ylijokuri, V., 2004. Winter swimming improves general well-being. *Int. J. Circumpolar Health* 63, 140–144.
- Jastrzabek, R., Straburzynska-Lupa, A., Rutkowski, R., Romanowski, W., 2013. Effects of different local cryotherapies on systemic levels of TNF- α , IL-6, and clinical parameters in active rheumatoid arthritis. *Rheumatol. Int.* 33, 2053–2060.
- Leppälaito, J., Westerlund, T., Huttunen, P., Oksa, J., Smolander, J., Dugue, B., Mikkelsen, M., 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.
- Louis, J., Schaal, K., Bieuzen, F., Le Meur, Y., Filliard, J.R., Volondati, M., Brisswalter, J., Hauswirth, C., 2015. Head exposure to cold during whole-body cryostimulation: influence on thermal response and autonomic modulation. *PLoS One* 10, e0124776.
- Lubkowska, A., Chudecka, M., Klimek, A., Szygula, Z., Fraczek, B., 2008. Acute effect of a single whole body cryostimulation on prooxidant-antioxidant balance in blood of healthy, young men. *J. Therm. Biol.* 33, 464–467.
- Lubkowska, A., Dolegowska, B., Szygula, Z., Klimek, A., 2009. Activity of selected enzymes in erythrocytes and level of plasma antioxidants in response to single whole-body cryostimulation in humans. *Scand. J. Clin. Lab. Invest.* 69, 387–394.
- Lubkowska, A., Szygula, Z., Klimek, A.J., Torii, M., 2010. Do sessions of cryostimulation have influence on white blood cell count, level of IL6 and total oxidative and antioxidative status in healthy men? *Eur. J. Appl. Physiol.* 109, 67–72.
- Lubkowska, A., Szygula, Z., Chlubek, D., Banfi, G., 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. *Scand. J. Clin. Lab. Invest.* 71, 419–425.
- Lubkowska, A., Dolegowska, B., Szygula, Z., 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, A., Dolegowska, B., Szygula, Z., Bryczkowska, I., Stańczyk-Dunaj, M., Salata, D., Budkowska, M., 2013. Winter-swimming as a building-up body resistance factor inducing adaptive changes in the oxidant/antioxidant status. *Scand. J. Clin. Lab. Invest.* 73, 315–325.
- Lubkowska, A., Dudzinska, W., Bryczkowska, I., Dolegowska, B., 2015. Body composition, lipid profile, adipokine concentration, and antioxidant capacity changes during interventions to treat overweight with exercise programme and whole-body cryostimulation. *Oxid. Med. Cell. Longev.* 2015, Article ID 803197, <http://dx.doi.org/10.1155/2015/803197>.
- Metzger, D., Zwingmann, C., Protz, W., Jäckel, W.H., 2000. Die bedeutung der ganzkörperkältebehandlung im rahmen der rehabilitation bei patienten mit rheumatischen erkrankungen. *Rehabilitation* 39, 93–100.
- Mila-Kierzenkowska, C., Wozniak, A., Wozniak, B., Drewna, G., Rakowski, A., Jurecka, A., Rajewski, R., 2009. Whole-body cryostimulation in kayaker women: a study of the effect of cryogenic temperatures on oxidative stress after the exercise. *J. Sports Med. Phys. Fit.* 49, 201–207.
- Mila-Kierzenkowska, C., Jurecka, A., Wozniak, A., Szpinda, M., Augustynska, B., Wozniak, B., 2013. The effect of submaximal exercise preceded by single whole-body cryotherapy on the markers of oxidative stress and inflammation in blood of volleyball players. *Oxid. Med. Cell. Longev.* 10.
- Miller, E., Mrowicka, M., Malinowska, K., Mrowicki, J., Saluk-Juszczak, J., Kedziora, J., 2010. Effects of whole-body cryotherapy on a total antioxidative status and activities of antioxidative enzymes in blood of depressive multiple sclerosis patients. *World J. Biol. Psychiatry: Off. J. World Fed. Soc. Biol. Psychiatry* 12, 223–227.
- Miller, E., 2012. Multiple sclerosis. *Adv. Exp. Med. Biol.* 724, 222–238.
- Miller, E., Saluk, J., Morel, A., Wachowicz, B., 2013. Long-term effects of whole body cryostimulation on uric acid concentration in plasma of secondary progressive multiple sclerosis patients. *Scand. J. Clin. Lab. Invest.* 73, 635–640.
- Miller, E., Kotska, J., Włodarczyk, T., Dugue, B., 2016. Whole body cryostimulation provides benefits for fatigue and functional status in multiple sclerosis patients. *Acta Neurol. Scand.* . <http://dx.doi.org/10.1111/ane.12557>
- Nestler, E.J., Barrot, M., Dileone, R.J., Eisch, A.J., Gold, S.J., Monteggia, L.M., 2002. Neurobiology of depression. *Neuron* 34, 13–25.
- Nugraha, B., Gunther, J.T., Rawert, H., Siegert, R., Gutenbrunner, C., 2015. Effects of whole body cryo-chamber therapy on pain in patients with chronic low back pain: a prospective double blind randomised controlled trial. *Eur. J. Phys. Rehabil. Med.* 51, 143–148.
- Ostrowski, K., Rohde, T., Asp, S., Schjerling, P., Pedersen, B.K., 1999. Pro- and anti-inflammatory cytokine balance in strenuous exercise in humans. *J. Physiol.* 515, 287–291.
- Paddon-Jones, D.J., Quigley, B.M., 1997. Effect of cryotherapy on muscle soreness and strength following eccentric exercise. *Int. J. Sports Med.* 18, 588–593.
- Parsons, K.C., 2002. The effects of gender, acclimation state, the opportunity to adjust clothing and physical disability on requirements for thermal comfort. *Energy Build.* 34, 593–599.
- Pertovaara, A., Kauppila, T., Jyväskylä, E., Kalso, E., 1991. Involvement of supraspinal and segmental alpha-2-adrenergic mechanism in the medetomidine-induced antinociception. *Neuroscience* 44, 705–714.
- Pertovaara, A., Kalmari, J., 2003. Comparison of the visceral antinociceptive effects of spinally administered MPV-2426 (fadolmidine) and clonidine in the rat. *Anesthesiology* 92, 189–194.
- Pournot, H., Bieuzen, F., Louis, J., Mounier, R., Fillard, J.R., Barbiche, E., Hauswirth, C., 2011. Time-course of changes in inflammatory response after whole-body cryotherapy multi exposures following severe exercise. *PLoS One* 6, e22748.
- Rymaszewska, J., Ramsey, D., 2008. Whole body cryotherapy as a novel adjuvant therapy for depression and anxiety. *Arch. Psychiatry Psychother.* 2, 49–57.
- Rymaszewska, J., Ramsey, D., Chludzinska-Kiejna, S., 2008. Whole-body cryotherapy as adjunct treatment of depressive and anxiety disorders. *Arch. Immunol. Ther. Exp.* 56, 63–68.
- Samuels, C., 2008. Sleep, recovery, and performance: the new frontier in high-performance athletics. *Neurol. Clin.* 26, 169–180.
- Savic, M., Fonda, B., Sarabon, N., 2013. Actual temperature during and thermal response after whole-body cryotherapy in cryo-cabin. *J. Therm. Biol.* 38, 186–191.
- Schaal, K., Le Meur, Y., Bieuzen, F., Petit, O., Hellard, P., Toussaint, J.F., Hauswirth, C., 2013. Effect of recovery mode on postexercise vagal reactivation in elite synchronized swimmers. *Appl. Physiol. Nutr. Metab.* 38, 126–133.
- Schaal, K., Le Meur, Y., Louis, J., Filliard, J.R., Hellard, P., Casazza, G., Hauswirth, C., 2014. Whole-body cryostimulation limits overreaching in elite synchronized swimmers. *Med. Sci. Sports Exerc.* 46, 1416–1425.
- Selfe, J., Alexander, J., Costello, J.T., May, K., Garratt, N., Atkins, S., Dillon, S., Hurst, H., Davison, M., Przybyla, D., Coley, A., Bitcon, M., Littler, G., Richards, J., 2014. The effect of three different (-135°C) whole body cryotherapy exposure durations on elite rugby league players. *PLoS One* 9, e86420.
- Siems, W., Brenke, R., 1992. Changes in the glutathione system of erythrocytes due to enhanced formation of oxygen free radicals during short-term whole body

- cold stimulus. *Arct. Med. Res.* 51, 3–9.
- Smolander, J., Mikkelsen, M., Oksa, J., Westerlund, T., Leppaluoto, J., Huttunen, P., 2004. Thermal sensation and comfort in women exposed repeatedly to whole-body cryotherapy and winter swimming in ice-cold water. *Physiol. Behav.* 82, 691–695.
- Stanek, A., Cholewka, A., Galuda, J., Drzazga, Z., Sieron, A., Sieron-Stolny, K., 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. Res. Int.*, Article ID 404259, <http://dx.doi.org/10.1155/2015/404259>
- Stankovic, M., Radovanovic, D., 2012. Oxidative stress and physical activity. *Sportologia* 8, 1–11.
- Sutkowy, P., Augustynska, B., Wozniak, A., Rakowski, A., 2014. Physical exercise combined with whole-body cryotherapy in evaluating the level of lipid peroxidation products and other oxidant stress indicators in kayakers. *Oxid. Med. Cell. Longev.* 7.
- Szczepanska-Gieracha, J., Borsuk, P., Pawik, M., Rymaszewska, J., 2013. Mental state and quality of life after 10 sessions whole-body cryotherapy. *Psychol. Health Med.* 19, 40–46.
- Trinanes, Y., Gonzalez-Villar, A., Gomez-Perretta, C., Carrillo-de-la-Pena, M.T., 2014. Profiles in fibromyalgia: algometry, auditory evoked potentials and clinical characterization of different subtypes. *Rheumatol. Int.* 34, 1571–1580.
- Urso, M.L., Clarkson, P.M., 2003. Oxidative stress, exercise, and antioxidant supplementation. *Toxicology* 189, 41–54.
- Westerlund, T., Oksa, J., Smolander, J., Mikkelsen, M., 2003. Thermal responses during and after whole-body cryotherapy (–110 °C). *J. Therm. Biol.* 28, 601–608.
- Westerlund, T., Uusitalo, A., Smolander, J., Mikkelsen, M., 2006. Heart rate variability in women exposed to very cold air (–110 °C) during whole-body cryotherapy. *J. Therm. Biol.* 31, 342–346.
- Wozniak, A., Mila-Kierzenkowska, C., Szpinda, M., Chwalbinska-Moneta, J., Augustynska, B., Jurecka, A., 2013. Whole-body cryostimulation and oxidative stress in rowers: the preliminary results. *Arch. Med. Sci.* 9, 303–308.
- Yamauchi, T., 1988. Whole-body cryotherapy is a method of extreme cold (–175 °C) treatment initially used for rheumatoid arthritis. *Z. Phys. Med. Balneol. Med. Klimatol.* 15, 311.
- Zagrobefny, Z., Halawa, B., Negrusz-Kawecka, M., Spring, A., Gregorowicz, H., Wawrowska, A., Rozwadowski, G., 1992. Hormonal and hemodynamic changes caused by whole body cooling in patients with rheumatoid arthritis. *Pol. Arch. Med. Wewn.* 87, 34–40.
- Zalewski, P., Klawe, J.J., Pawlak, J., Tafil-Klawe, M., Newton, J., 2013. Thermal and hemodynamic response to whole-body cryostimulation in healthy subjects. *Cryobiology*, 295–302.
- Ziemann, E., Olek, R.A., Kujach, S., Grzywacz, T., Antosiewicz, J., Garszka, T., Laskowski, R., 2012. Five-day whole-body cryostimulation, blood inflammatory markers, and performance in high-ranking professional tennis players. *J. Athl. Train.* 47, 664–672.
- Ziemann, E., Olek, R.A., Grzywacz, T., Kaczor, J.J., Antosiewicz, J., Skrobot, W., Kujach, S., Laskowski, R., 2014. Whole-body cryostimulation as an effective way of reducing exercise-induced inflammation and blood cholesterol in young men. *Eur. Cytokine Netw.* 25, 14–23.

Synthèse :

Il existe de nombreux fabricants de dispositifs de cryothérapie sur le marché. Néanmoins, les technologies fonctionnent quasiment toutes de la même manière. La CCE (électrique et/ou à azote) est réalisée dans des chambres et la CCP (à azote) dans des cabines. Ces modes d'alimentation restent chers et présentent des problèmes de sécurité.

Malgré l'accroissement du nombre d'études publiées dans la littérature spécialisée, peu de modèles ont été scientifiquement validés. Pour les autres, il a été montré un manque de sensibilité dans la mesure des températures d'exposition. L'optimisation des effets de la CCE et de la CCP doit passer par une standardisation de la mesure des températures d'exposition dans chaque dispositif afin de pouvoir définir des protocoles précis et adaptés en fonction des effets recherchés.

DISCUSSION

Le premier chapitre de cette partie a été consacré à la recherche bibliographique liée à l'histoire de l'utilisation du froid. Il a montré que malgré l'utilisation très ancienne du froid dans l'amélioration de notre quotidien, les techniques de CCE sont relativement récentes dans notre société. Notre culture plutôt latine des soins et du bien-être a favorisé le développement de technologies utilisant davantage la chaleur que le froid. Il faut également reconnaître qu'il est plus facile technologiquement de créer de la chaleur plutôt que du froid. Cependant, la multitude d'effets positifs liés aux expositions à la CCE relevés dans la littérature scientifique encouragent le développement de l'utilisation du froid. A l'heure actuelle, ce sont dans les domaines du soulagement de la douleur et de la récupération sportive que cette technologie est la plus utilisée. Mais il ne fait aucun doute qu'elle connaîtra d'autres applications telles que l'amélioration du bien-être ou encore de la qualité du sommeil.

Le travail de recherche bibliographique qui a été conduit sur les effets de la CCE a été une étape incontournable dans le lancement de la thèse. Il a permis de lancer des pistes de travail rationnelles pour optimiser les prestations et les études scientifiques à réaliser. Il est très important pour un prestataire de services et fabricant de chambres de CCE, de connaître précisément les effets et réponses de la CCE sur l'Homme. La plupart des partenaires de la société Cryantal sont des équipes sportives de haut niveau (athlètes et leurs encadrements), des médecins du sport, préparateurs physique, entraîneurs ou kinésithérapeutes. Il est donc primordial de proposer une solution technologique innovante associée à une méthodologie rationnelle.

Le second chapitre de cette partie a été consacré aux études de terrain en situation réelle de compétition. La première étude réalisée a permis d'observer que la CCP proposée lors d'une compétition sportive de niveau international n'était pas contraignante pour les athlètes. En effet, les résultats ont démontré que les sensations thermiques ressenties par les athlètes pendant les expositions étaient relativement confortables. Cela suggère que la CCP n'est en rien nuisible à leurs performances. Chez les femmes, les athlètes qui possédaient un indice de masse corporel moins important avaient une perception des sensations thermiques plus froides que celles qui possédaient un indice de masse corporel plus élevé. Chez les hommes, aucune différence n'a été mise en évidence rapporté à cet indice. Les résultats attestent donc de l'existence d'une différence interindividuelle importante dans les sensations thermiques ressenties entre les deux sexes. Les effets de la CCE sont principalement dus à la réponse adaptative du corps au stimulus du froid (Bouzigon et al., 2016). Une différence de ressenti peut alors suggérer une différence

dans les réponses adaptatives et donc une différence en termes d'effets induits. Les résultats obtenus chez les femmes suggèrent qu'il est important de prendre en compte cette information pour éviter de faire subir des contraintes thermiques trop importantes à des athlètes féminines qui ont un faible indice de masse corporelle. Cette étude conduite pendant une période compétitive soulève ainsi la question de la quantification de la dose-effets de la CCE et de la CCP en fonction des caractéristiques morphologiques des individus. Actuellement, les protocoles d'exposition sont quasiment tous similaires, à savoir -110 °C pendant 3 minutes. Néanmoins, à la vue des différences morphologiques possibles à l'intérieur de la population, il semblerait qu'un protocole universel soit injustifié.

La seconde étude de terrain réalisée en situation de compétition a permis de montrer que les athlètes ressentaient un sommeil de meilleure qualité lors des nuits consécutives aux expositions à la CCP. Le sommeil est en effet un pilier important de la récupération physique nécessaire à la récupération des processus cognitifs et des fonctions métaboliques qui sont indispensables à la performance (Samuels, 2008). Les contraintes de stress liées aux compétitions nuisent à la qualité du sommeil des athlètes et peuvent induire une diminution de leur niveau de performance (Reilly and Edwards, 2007). L'amélioration de la qualité perceptive du sommeil observée dans cette étude réalisée en situation de compétition est donc d'un intérêt considérable pour les équipes sportives.

Les prestations de terrain qui n'ont pas fait l'objet de publication ont apporté certaines pistes de réflexion. Il a ainsi été mis en avant une incidence des conditions environnementales (notamment la température et l'hygrométrie) sur les sensations thermiques perceptives. Les athlètes semblent en effet avoir une sensation de froid plus importante lorsque la température environnementale diminue et/ou lorsque le pourcentage d'hygrométrie environnementale augmente. Il serait donc judicieux de prendre en compte les conditions environnementales dans les protocoles d'exposition. Ils devraient pouvoir être modulés en fonction de la température et de l'hygrométrie environnementales. Les fabricants de chambre et de cabine ont peut-être alors également intérêt à créer des technologies à l'intérieur desquelles l'humidité est limitée afin de diminuer les contraintes thermiques.

Les mesures effectuées sur le terrain dans les conditions réelles de compétition sont par conséquent importantes pour les équipes sportives. Cela leur permet d'apprécier 1) la crédibilité de la technologie mise en place et 2) la qualité du travail de la société Cryantal qui mesure et transmet les résultats de ses prestations. Pour la société, les études de terrains permettent également d'optimiser ses prestations dans la durée. Cette démarche scientifique de terrain au

plus proche des acteurs est indispensable à la réalisation de prestations de qualité et évolutives dans le temps.

Le troisième chapitre de cette partie a été consacré à l'étude des besoins technologiques et méthodologiques actuels de la CCE. La revue de littérature effectuée sur les applications pratiques et sur les effets validés de la CCE et de la CCP a été incontournable dans l'analyse de ces besoins.

D'un point de vue technologique, elle met en avant le manque d'informations concernant les températures réelles d'expositions à l'intérieur des technologies de CCE et de CCP existantes. Le manque de données valides concernant les températures d'exposition entrave grandement l'optimisation des protocoles. Il n'est en effet pas possible de déterminer un protocole d'exposition objectif sans une valeur réelle de la température d'exposition. Le second aspect relevé est le problème de sécurité de la pratique lié aux technologies utilisant l'azote. Ce gaz, qui peut être mortel en cas d'inhalation prolongée, est difficilement compatible avec une pratique sûre. Enfin, le dernier aspect pointé réside dans les contraintes économiques liées aux technologies existantes. A cause des technologies actuelles énergivores, le coût d'exploitation est élevé et les prestations sont onéreuses. Or, il est difficile de démocratiser une pratique si elle n'est pas rendue accessible pour le plus grand nombre.

D'un point de vue méthodologique, l'ensemble des protocoles d'expositions à la CCE et à la CCP utilisés dans le soulagement des pathologies traumatiques et rhumatismales et dans le domaine de la récupération physique ont été triés et classés dans la revue de littérature (Bouzigon et al., 2016). Cette revue peut être utilisée comme un premier référentiel permettant aux professionnels de la santé et du milieu sportif de choisir des protocoles adaptés à leurs pratiques. Le manque de données concernant l'individualisation des protocoles d'exposition a également été relevée. Il manque en effet des informations importantes sur les effets de la CCE en fonction des températures réelles d'exposition ou encore des caractéristiques morphologiques des individus exposés. La revue de littérature montre donc la nécessité d'effectuer encore de nombreuses études en vue de décortiquer les effets de la CCE et de pouvoir optimiser les protocoles de traitement.

CONCLUSION

La première partie de la thèse a permis de dresser un premier portrait de la CCE. Elle montre la nécessité de démocratiser cette pratique. Le froid est utilisé comme moyen thérapeutique et de relaxation depuis des millénaires. La CCE, qui est à l'aube de son développement, a déjà montré une multitude de bienfaits sur l'Homme. Elle a besoin d'être démocratisée afin de pouvoir être accessible à un plus grand nombre.

A travers les études de terrain en situation de compétition, nous avons montré que la CCE était une méthode efficace et peu contraignante pour les athlètes. Toutefois, les protocoles d'expositions méritent d'être optimisés et individualisés afin de mieux répondre aux effets induits sur les individus. A cet effet, il est indispensable que les valeurs de températures réelles d'exposition à l'intérieur des chambres et cabines soient mesurées précisément et communiquées. La revue de littérature effectuée au cours de cette partie est déjà une première réponse à cet objectif. Elle présente un premier référentiel des technologies de CCE et de CCP existantes sur le marché, ainsi que des différents protocoles d'expositions. Elle devrait être utile aux professionnels de la santé et du milieu sportif.

Nous avons également mis en évidence dans cette partie que les freins sécuritaires et économiques liés à l'utilisation des technologies de CCE nuisaient à la démocratisation de la pratique. Il apparaît donc nécessaire de palier à ces lacunes technologiques afin de contribuer à une plus grande démocratisation de la CCE en développant une technologie de chambre pertinente et efficace.

Cette première partie a donc été indispensable dans l'optimisation des prestations proposées par la société Cryantal mais également dans le développement d'une nouvelle technologie de chambre de CCE pertinente.

**PARTIE 2 : DEVELOPPEMENT ET VALIDATION D'UNE NOUVELLE
CHAMBRE DE CRYOTHERAPIE CORPS ENTIER**

CHAPITRE 1 : DEVELOPPEMENT D'UN PROTOTYPE DE CHAMBRE DE CRYOTHERAPIE CORPS ENTIER

1. Identification des besoins technologiques

A partir des résultats observés dans la première partie de la thèse, plusieurs points ont été pris en considération dans le développement de la nouvelle technologie de CCE. Elle devra répondre au besoin du marché dans le but de contribuer à la démocratisation de la pratique. Cette démocratisation représente pour la société Cryantal un enjeu économique, mais elle est également un enjeu de santé publique. Actuellement, la CCE est réservée à une élite, divisée entre les sportifs de haut niveau et les patients atteints de pathologies graves. Il semblerait important, au vu des bénéfices mis en avant dans la première partie de ce manuscrit, que le plus grand nombre puisse en avoir l'accès. Les freins à la démocratisation de la CCE sont aujourd'hui essentiellement économiques et techniques. Son expansion n'est pas possible tant que les principaux freins ne seront pas levés.

a) Freins technologiques

Sécurité

Le premier frein technologique est lié à l'aspect sécuritaire des dispositifs existants. Le facteur d'insécurité le plus important est dû à l'utilisation de l'azote. L'azote est un gaz qui n'est pas respirable à haute dose puisqu'il empêche l'inhalation de l'oxygène et par conséquent entraîne un évanouissement qui peut aller jusqu'à la mort. Un décès récent à l'intérieur d'une cabine de CCP aux Etats-Unis en atteste malheureusement. Il existe également des contraintes réglementaires liées au stockage de l'azote. Il n'est pas possible de placer des bonbonnes ou des cuves remplies d'azote à n'importe quel endroit. Cela représente une véritable contrainte dans le cas d'une technologie fixe si l'exploitant ne dispose pas de l'autorisation de stockage. Sur le terrain, la contrainte devient problématique lorsque les responsables des lieux de prestations (hôtels, stades, ...) n'autorisent pas le stationnement du camion de CCE sur leur parking.

Au niveau de la conception et de l'exploitation des technologies de CCP et de CCE, il existe actuellement un vide juridique. Le développement rapide de la pratique va entraîner à court terme de nouvelles exigences juridiques et il est fort probable que les technologies utilisant l'azote soient fortement impactées, si elles ne deviennent pas proscrites. Pour développer une

technologie performante et sécurisée, il était important de se poser les bonnes questions afin de répondre aux normes qui risquent d'entrer en vigueur dans un proche avenir.

Approvisionnement énergétique et pièces détachées

L'approvisionnement nécessaire à l'utilisation des technologies existantes représente une seconde contrainte, notamment sur les prestations mobiles. Les bonbonnes d'azote se vident rapidement (180 Litres d'azote liquide constitue 15 à 20 expositions groupées) et il faut prévoir un approvisionnement régulier. Les distributeurs d'azote se déplacent avec des camions citernes. Il faut donc prévoir un raccordement qui peut aller jusqu'aux camions ou pouvoir amener les bonbonnes à l'extérieur. Lors des prestations, le camion peut venir assez simplement jusqu'à la remorque, encore faut-il trouver des distributeurs locaux. Les chambres électriques existantes qui n'ont pas besoin d'apport externe en azote sont affranchies de ces contraintes, mais elles fonctionnent sur 380V et dans le cadre des prestations, il est difficile de trouver des prises avec ce voltage partout.

Le développement d'une nouvelle technologie de CCE en France serait également stratégique pour trouver facilement des pièces détachées en cas de panne. Le désagrément survenu sur le premier Tour de France en est la preuve.

Taille des chambres

La taille des chambres actuelles représente une contrainte pour les versions mobiles. Les chambres de CCE ont été réalisées afin de pouvoir contenir plusieurs personnes. Mais plus l'espace à refroidir est important, plus il faut de la puissance pour générer du froid et plus cela est coûteux en énergie. De plus, une chambre à plusieurs personnes peut être intéressante dans le milieu sportif, mais pas forcément dans le milieu médical et du bien-être. Les sportifs peuvent effectivement effectuer des séances en groupe. Cela apporte un côté ludique et aide à mieux supporter l'exposition. Sur les compétitions, cela représente également un gain de temps non négligeables dans la gestion des journées souvent bien remplies. D'un autre côté, les personnes atteintes d'une pathologie ou désireuse de se relaxer n'ont pas forcément envie de partager une ambiance close, qui plus est en sous-vêtements, avec d'autres individus.

La taille des chambres implique également un problème de logistique car il faut prévoir un camion beaucoup plus grand pour pouvoir les développer en version mobiles. La mobilité n'est donc pas possible pour les imposantes chambres de CCE actuelles. Elle est pourtant indispensable pour les professionnels afin d'effectuer des prestations et faire leur promotion. Les camions et remorques de CCP actuels sont de véritables vitrines pour les fabricants et les

prestataires. Le développement et la démocratisation de la CCE passent évidemment par une plus grande visibilité. Les technologies mobiles sont enfin un poids dans le développement des études scientifiques sur le terrain comme en laboratoire. Elles peuvent être déplacées près des laboratoires contenant du matériel de mesure spécifique aux effets étudiés.

b) Freins économiques

L'aspect économique est également important à prendre en compte. Les prestataires n'utiliseront pas la technologie si celle-ci ne leur permet pas de réaliser un chiffre d'affaire convenable et les clients ne solliciteront pas les prestataires si les expositions sont trop onéreuses. Actuellement, une séance de CCE de 3 minutes coûte entre 50 et 60 €. Ces prix restreignent l'accès à la pratique et limite le développement des centres de CCE. Les coûts d'exploitation doivent diminuer afin de rendre plus abordable et à la portée d'un plus grand nombre le prix des séances. Si le nombre de clients potentiels augmente, alors davantage de centres spécialisés verront le jour.

La première solution pour diminuer les prix d'exploitation réside dans le développement d'une technologie qui ne nécessite pas l'utilisation de l'azote. L'azote est un gaz qui coûte cher et les technologies actuelles sont trop énergivores. Il est important également de prendre en compte que le prix de l'azote varie entre les pays. Il convient par conséquent de faire très attention lors des prestations réalisées à l'extérieur de la France. L'azote étant donc un frein économique important dans le développement de la CCE, il faut s'en affranchir. Il existe actuellement des technologies qui n'utilisent pas l'apport d'azote liquide et sont purement électriques. Malheureusement elles sont alimentées avec du 380 V et sont très énergivores. Elles restent donc onéreuses à l'exploitation.

Le coût d'entretien des chambres et cabines est aussi à prendre en compte. Le froid extrême induit avec l'humidité le développement de givre et de glace. Cette glace peut dégrader l'intérieur des chambres. Les joints de porte sont par exemple à changer fréquemment sur plusieurs technologies, engendrant des coûts supplémentaires.

2. Solutions technologiques en réponses aux besoins envisagés

A partir de l'identification des principaux problèmes relevés, un cahier des charges a été rédigé pour le développement de la nouvelle chambre de cryothérapie corps entier.

Selon ce cahier des charges, cette chambre devait rassembler les éléments suivants :

- descendre à -110 °C ;
- ne pas nécessiter d'azote ;
- être peu énergivore ;
- être mobile ;
- pouvant se raccorder très facilement à une source d'énergie ;
- nécessiter peu d'entretien ;
- être individuelle ;
- être conceptualisée et fabriquée de manière à pouvoir prétendre aux Conformités Européennes Médicales ;
- comprendre un dispositif permettant de diminuer l'hygrométrie à l'intérieur de la chambre pour la rendre plus agréable et limiter la formation de givre ;
- pouvant s'adapter à différents protocoles d'exposition ;
- produisant une température d'exposition homogène entre le haut et le bas de la chambre.

Dès la fin de l'année 2012, des consultations industrielles ont été effectuées afin de trouver un bureau d'étude capable de concevoir une chambre de CCE en suivant ce cahier des charges.

3. Développement du prototype de la nouvelle chambre de CCE

C'est un bureau d'étude de Bretagne qui a répondu à l'appel d'offre à la fin de l'année 2012. Avant d'aller plus en avant dans l'explication plus détaillée du développement de la chambre, il apparaît nécessaire de présenter le mécanisme de fonctionnement de ce type de dispositif de création de froid.

a) Fonctionnement général des dispositifs de cryothérapie à l'azote

Premièrement, il faut bien comprendre que chercher à faire du froid ne signifie pas créer du froid à proprement parler. Refroidir signifie en fait diminuer une température dans un endroit confiné. Le froid se fait toujours par extraction de chaleur. Pour permettre la diminution de cette chaleur, les dispositifs de cryothérapie sont composés de trois grands ensembles : un groupe froid, un échangeur, et un compartiment refroidi.

Le groupe froid

Le groupe froid est la partie qui crée le refroidissement. Il est la plupart du temps composé d'un compresseur et d'un détendeur de gaz (figure 27). Le compresseur va servir à comprimer le gaz utilisé (variable en fonction des dispositifs). Quand un gaz est comprimé, les molécules sont

très rapprochées, elles s'entrechoquent et se frottent violemment et rapidement, il va donc s'échauffer. Celui-ci va être conservé comprimé jusqu'à ce que sa température redevienne normale. Cette diminution de température va entraîner la liquéfaction du gaz. Le liquide ainsi créé va être à température ambiante, mais à haute pression. Lorsque la pression va être libérée, le liquide va bouillir et s'évaporer. Cette réaction d'évaporation va consommer de la chaleur. Le liquide et la chaleur combinés se transforment donc en un gaz sans chaleur, très froid. Le principe de la production de gaz extrêmement froid comme l'azote est le refroidissement en série de plusieurs bonbonnes de gaz. Le gaz refroidi de la première bonbonne, envoyé pour refroidir une seconde bonbonne de gaz liquéfié, va permettre d'obtenir un gaz encore plus froid. C'est donc la détente de ces gaz, induisant une diminution de la pression, qui va permettre leur refroidissement. Le choix des gaz en fonction de la température ciblée est important à prendre en compte. Par exemple, l'azote liquide est maintenu à $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$, et l'hélium liquide à $-269\text{ }^{\circ}\text{C}$.



Figure 27 : Exemple d'un compresseur frigorifique

L'échangeur

L'échangeur, placé entre le groupe froid et la chambre à refroidir, est la partie à l'intérieur de laquelle il y a un échange thermique entre l'air chaud provenant de la chambre et l'air froid provenant du groupe froid. La chaleur va se propager vers le groupe froid, puis sera évacuée. L'air à l'intérieur de l'échangeur va alors perdre sa chaleur, il sera donc refroidi. Il pourra ensuite être envoyé vers le compartiment à refroidir. Il faut donc, pour développer un dispositif de froid, se pencher sur le moyen de refroidir l'air, mais également sur le moyen de le diffuser.

Le compartiment à refroidir

Le compartiment à refroidir est pour la CCE la partie de la chambre dans laquelle se situe l'individu au cours de l'exposition. Si elle n'a pas véritablement vocation à refroidir elle-même, elle doit cependant être douée de dispositifs d'isolation. Les différences de températures entre l'intérieur et l'extérieur des chambres de CCE ou des cabines de CCP sont très importantes. Il

est donc indispensable d'avoir des compartiments bien isolés pour ne pas que la chaleur puisse entrer.

b) Les différentes étapes du développement de la nouvelle chambre de CCE

Décembre 2012 – Mai 2013 : Tentative de création d'un dispositif thermodynamique

La première solution imaginée était le développement d'une machine thermodynamique exploitant un cycle de compression/détente d'un fluide alimenté par une pompe. L'utilisation de l'air ambiant permettant un apport énergétique gratuit avec cette technologie, l'air aurait été utilisé pour produire directement du froid. Malheureusement cette solution trop complexe à développer a été abandonnée en mai 2013 (figure 28).



Figure 28 : Premier schéma de la future chambre de CCE Cryantal

Mai 2013 – Février 2014 : Tentative d'utilisation d'un dispositif de thermodynamique existant

Nous avons décidé en collaboration avec les ingénieurs du bureau d'étude de garder l'échangeur développé pour le premier dispositif. En revanche, le projet du moteur thermodynamique ayant échoué, nous nous sommes tournés vers l'exploitation de compresseurs à haute puissance d'origine américaine déjà existants. Ce type de compresseurs était normalement utilisé pour le refroidissement dans la fabrication de composants électroniques en nanotechnologies. En décembre 2013, une chambre munie de deux moteurs de ce type a été installée dans un centre de bien-être basée à Lognes (77), en région Parisienne. Cette chambre comportait trois pièces : La chambre froide, un sas qui sépare cette chambre de l'extérieur, et une pièce contenant les moteurs.

Plusieurs problèmes sont rapidement apparus. La chambre entière prenait beaucoup trop de place. La chambre froide dans laquelle étaient réalisées les expositions à -110 °C était trop

petite et peu rassurante. En effet, elle ne disposait pas de hublot et était fabriquée dans un alliage proche du titane. De plus, le design de la chambre était très proche des chambres froides utilisées en boucherie (figure 29).

Le plus gros problème rencontré avec ce prototype était que les moteurs américains utilisés développaient beaucoup trop de chaleur qu'il était impossible d'évacuer. La conséquence directe était l'inaptitude du prototype à descendre en température. La seconde solution technologique n'était donc pas envisageable. Il fallait penser au développement d'une autre solution.



Figure 29 : Prototype muni des moteurs américains et installé au centre

Février 2014 – Décembre 2014 : Premier succès et sortie du prototype

Après toutes les difficultés rencontrées avec les premières solutions, technologiques nous avons fini par aborder le problème différemment. Au lieu de réfléchir à la manière de créer du froid, nous nous sommes d'abord penchés sur les effets recherchés lors d'une exposition afin d'induire un froid optimal.

Il a été montré dans la littérature scientifique que la diminution brusque de la température cutanée était à la base de la plupart des adaptations recherchées. Il fallait donc trouver un moyen d'induire une diminution importante de la température cutanée. C'est à partir de ce constat qu'une nouvelle solution technologique à partir du froid ressenti a été imaginée. Il existe deux solutions pour augmenter la sensation de froid : l'humidité et le vent. Il n'était bien sûr pas concevable d'utiliser l'humidité qui augmenterait le risque de gelures et de givres dans la chambre. La solution retenue a donc été d'induire du vent à l'intérieur de la chambre afin d'augmenter la sensation de froid. En effet, le froid est avant tout un signal sensitif.

c) Le froid « ventilé » ou froid « éolien »

Le froid « ventilé », ou froid « éolien » est utilisé dans le domaine météorologique pour calculer la température ressentie à l'extérieur en présence de vent. En effet, le vent va induire une diminution de la température cutanée si elle est plus chaude que la température atmosphérique (LeBlanc et al., 1976). Ce phénomène est appelé « refroidissement éolien ». Plus le vent va être important est plus la température va diminuer.

Le métabolisme interne d'un être homéotherme va faire augmenter la température de l'air en contact avec la peau et créer une fine couche d'air isolante appelée couche limite équivalente (Schlichting, 1968). L'application d'un vent sur la peau va entraîner une diminution de la couche thermique protectrice. La peau sera en permanence au contact de l'air ambiant. Le transfert de chaleur entre la peau et l'air est alors augmenté et la température cutanée va diminuer plus rapidement (Osczevski and Bluestein, 2005).

Le froid éolien a été mesuré et calculé pour la première fois par Siple et Passel au cours d'une expédition en Antarctique entre 1939 et 1941. Les deux chercheurs ont mesuré le temps de congélation d'une bouteille en plastique suspendue au toit d'un bâtiment. De ces observations a été calculé l'Indice de Refroidissement Eolien (Wind Chill Index : WCI), représentant le taux de perte de chaleur du cylindre par unité de surface (Siple and Passel, 1999). Suite à cette expérimentation, plusieurs imperfections ont ensuite été pointées dans cette étude : La grande variabilité entre les données pour les différentes zones de mesures, la petite taille du cylindre, l'absence de prise en compte des résistances thermiques internes ou encore l'hypothèse que toute la surface de mesure est à température constante. Cet indice a ensuite été amélioré puis traduit en température équivalente au froid ressenti (T_{eq} en °C) (Osczevski and Bluestein, 2005). Les travaux d'Osczevski et al. (Osczevski and Bluestein, 2005; Osczevski, 1995) ont permis le calcul du froid éolien à l'intérieur d'une chambre, avec un vent de face et non pas mesuré à dix mètres de haut comme dans la plupart des études (tableau 3).

Tableau 3 : Tableau de refroidissement éolien d'Osczevski et Bluestein (Osczevski and Bluestein, 2005).

		Air Temperature (°C)												
Calm		10	5	0	-5	-10	-15	-20	-25	-30	-35	-40	-45	-50
Wind Speed (km h ⁻¹)	10	9	3	-3	9	-15	-21	-27	-33	-39	-45	-51	-57	-63
	15	8	2	-4	-11	-17	-23	-29	-35	-41	-48	-54	-60	-66
	20	7	1	-5	-12	-18	-24	-31	-37	-43	-49	-56	-62	-68
	25	7	1	-6	-12	-19	-25	-32	-38	-45	-51	-57	-64	-70
	30	7	0	-7	-13	-19	-26	-33	-39	-46	-52	-59	-65	-72
	35	6	0	-7	-14	-20	-27	-33	-40	-47	-53	-60	-66	-73
	40	6	-1	-7	-14	-21	-27	-34	-41	-48	-54	-61	-68	-74
	45	6	-1	-8	-15	-21	-28	-35	-42	-48	-55	-62	-69	-75
	50	6	-1	-8	-15	-22	-29	-35	-42	-49	-56	-63	-70	-76
	55	5	-2	-9	-15	-22	-29	-36	-43	-50	-57	-63	-70	-77
	60	5	-2	-9	-16	-23	-30	-37	-43	-50	-57	-64	-71	-78
	70	5	-2	-9	-16	-23	-30	-37	-44	-51	-59	-66	-73	-80
80	4	-3	-10	-17	-24	-31	-38	-45	-52	-60	-67	-74	-81	

(Calm : Sans vent ; Wind Speed : Vitesse du vent ; Air Temperature : Température de l'air)

Cet indice de froid éolien a été calculé avec l'équation d'Osczevski et Bluestein (Osczevski and Bluestein, 2005):

$$T_{eq} = 13.12 + 0.6215T - 11.37V^{0.16} + 0.3965TV^{0.16} \text{ (équation 1)}$$

avec, T (température en °C) et V (vitesse du vent en km/h). Si le vent est mesuré à 1m en face de la personne, il faut multiplier sa vitesse en km/h par 1,5.

Une technologie basée sur une convection forcée, telle qu'avec l'apport du vent, permettrait alors d'augmenter le froid ressenti avec une température d'exposition moins froide. C'est une avancée intéressante puisque la chambre serait ainsi moins coûteuse en énergie. De plus, les besoins en maintenance seraient diminués (moins de froid = moins de givre). Enfin, le point fondamental est que cette technologie ne nécessiterait pas l'utilisation de l'azote.

4. Description du prototype de chambre de CCE Cryantal

a) Groupe froid et échangeur

Le groupe froid a été basé sur le fonctionnement de deux compresseurs en série. Un premier compresseur va faire diminuer la température d'un gaz puis un autre compresseur va venir le refroidir une seconde fois. Le gaz va ensuite se propager sur des colonnes à ailettes placées à l'intérieur de l'échangeur. Le liquide frigorigère (non communiqué) contenu dans les colonnes va se refroidir à son tour. L'air chaud contenu dans la chambre va se diriger vers l'échangeur

qui est devenu plus froid (principe du transfert thermique) et sera ensuite évacué. L'intérieur de la chambre va ainsi être refroidi. De plus, lors de la séance, deux ventilateurs placés derrière les colonnes à l'intérieur de l'échangeur propulseront l'air froid à l'intérieur de la chambre. Trois autres ventilateurs seront placés à l'intérieur de la chambre pour induire le refroidissement éolien recherché (figure 30).



Figure 30 : Ventilateurs situés à l'intérieur de la chambre principale

b) Compartiments à refroidir

Le prototype est composé de deux compartiments à refroidir, plus communément appelés « chambres ». La première chambre est un sas refroidi grâce à un climatiseur (figure 31). La seconde est la chambre principale équipée des ventilateurs. La température à l'intérieur du sas doit normalement descendre aux alentours de -25 °C et celle de la chambre froide à -110 °C en T_{eq} au cours de l'exposition. Le froid créé dans le premier sas passe à l'intérieur des murs de la chambre froide afin de créer une couche isolante supplémentaire. La chaleur issue du sas est aspirée puis éjectée par le haut. Le climatiseur est également muni d'un assécheur d'air afin de limiter l'humidité à l'intérieur des deux chambres.

Lors de la mise en route de la chambre, la porte entre le sas et la chambre froide doit rester ouverte pour permettre cet assèchement. Elle est ensuite fermée pour que la température de la seconde chambre descende encore plus bas.



Figure 31 : Climatiseur pour le refroidissement du sas

Les cloisons de la chambre froide sont un assemblage de trois plaques collées et sont épaisses de 50 cm. Un hublot en verre a été créé afin de voir la personne exposée. Il est composé de 10 verres séparés par une lame d'air inerte.

Trois sondes sont placées à l'intérieur du prototype pour mesurer la température, une dans le groupe froid, une dans l'échangeur, et une dans le compartiment à refroidir.

Les ventilateurs, comme les sondes, sont reliés à un écran de commande, appelé interface homme machine (figure 32) depuis lequel nous pouvons actionner et arrêter les ventilateurs, suivre la durée de la séance, observer la température d'exposition et chauffer la zone de l'échangeur pour la dégivrer lorsqu'il y en a besoin (une fois tous les trois mois environ).



Figure 32 : Interface homme machine du prototype

c) Alimentation

La chambre a la propriété d'être peu énergivore (4000 W), soit l'équivalent de deux petits radiateurs électriques, et de disposer d'un raccordement électrique de 230 V.

d) Mobilité

La chambre prend peu de place et est réalisée en version mobile. Elle est placée à l'intérieur d'une remorque chauffée et éclairée (figure 33). Les cloisons sont étudiées pour pouvoir supporter les déplacements. Elles sont très hermétiques et permettent de conserver le froid. La chambre peut alors rester froide lors des déplacements. La descente en température est alors moins longue une fois arrivé sur le lieu de la prestation. La remorque est aménagée afin que les individus puissent se changer. Elle peut être déplacée simplement par une voiture, ne nécessitant pas de camion pour la mobiliser.



Figure 33 : Remorque du prototype

e) Fiche technique de la chambre

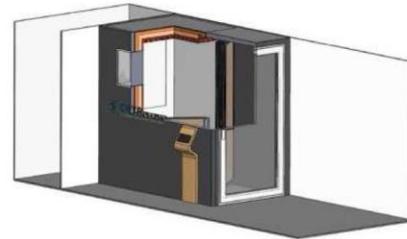
Afin que les partenaires de la société Cryantal visualisent mieux le projet de chambre de CCE, une fiche technique a été réalisée (figure 34).



CryoCabine Corps Complet

Généralités :

- Raccordement électrique standard 230 v 50hz.
- Groupe froid électrique d'une puissance de 4kw/h.
- Déshumidificateur dans la zone tampon.
- Produits d'isolations hautes performances.
- Hublot de surveillance.
- Miroir intérieur (prévention de la claustrophobie)
- Une barre de soutien pour le patient.



Equipements :

- Ecran de contrôle :
 - Visualisation de temps de séance.
 - Visualisation de la température de la zone de traitement
- Une interphase homme/machine :
 - Configuration du temps de séance.
 - Configuration de la température dans la zone de traitement.
 - Ambiance sonore et lumineuse dans la zone de soins .

SAS CRYANTAL DEVELOPPEMENT , Société en création,
15 cours des Roches 77186 Noisiel / 06.50.76.28.84

Architecture Cabine

La cabine a comme dimensions :

Hauteur : 2450 mm
 Hauteur utile de la zone de traitement : 2150 mm
 Largeur : 1430 mm
 Longueur : 2800 mm

Les dimensions peuvent être modifiées en fonction des contraintes liées à votre local

Zone de traitement (jusque -110°C) :

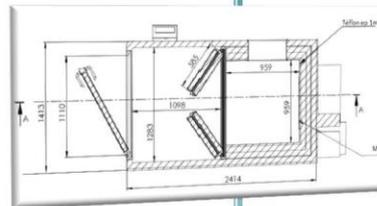
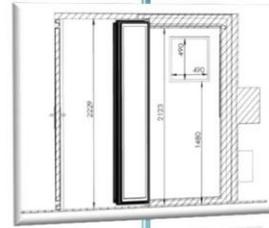
Surface au sol de la zone de traitement : 979 mm * 979 mm.
 Hauteur de la zone de traitement : 2150 mm
 Hauteur utile (sous le diffuseur de froid) : 2100 mm.

Sas :

Le sas a une fonction de déshydratation de l'air.
 La profondeur de ce sas est de 700 mm.
 Porte entre l'extérieur et le sas.
 Largeur du sas 1300 mm et hauteur de 2400 mm.

Hublot :

Hublot de 500 mm * 500 mm situé (bas du hublot) à 1500 mm du sol.
 Le vitrage du hublot est réalisé sur mesure. Il se compose de 10 verres, séparés par une lame d'air inerte.

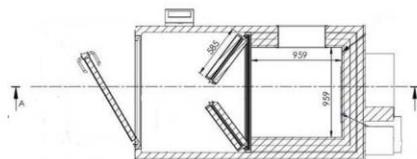


Contraintes d'installation

Emplacement de la cabine:

Réseau électrique :

Accessibilité:



**SAS CRYANTAL DEVELOPPEMENT , Société en création,
 15 cours des Roches 77186 Noisiel / 06.50.76.28.84**

Figure 34 : Exemple d'une fiche technique du prototype

Synthèse :

La seconde partie de la thèse, qui s'est déroulée de décembre 2012 à décembre 2014 a permis :

- D'identifier les besoins technologiques liés au marché de la CCE. Nous avons montré que la démocratisation de cette technologie passait par les points essentiels que sont la sécurité, le coût d'exploitation et la mobilité.
- De développer le prototype d'une nouvelle chambre mobile, n'utilisant pas d'azote et très peu coûteuse en électricité. Elle est donc un modèle intéressant dans le processus de démocratisation de la CCE.

CHAPITRE 2 : ETUDE DE VALIDATION TECHNOLOGIQUE DU PROTOTYPE DE CHAMBRE DE CCE

1. Démarrage de la chambre et premiers relevés de température d'exposition

Une fois la remorque du prototype installée près de notre centre, nous avons pu commencer la mise à froid des chambres. Le climatiseur du sas a été démarré ainsi que le groupe froid. Ensuite, la porte extérieure du sas a été fermée et la porte entre la chambre froide et le sas laissée ouverte. Dans cette configuration, le climatiseur pouvait assécher les deux chambres. Une fois le sas à -15 °C, la porte de la chambre froide a été fermée. Cette première étape a pris plusieurs heures. Une fois la chambre froide fermée, la diminution de la température à l'intérieur pouvait se faire de manière discontinue pendant au moins 48 h. Les premiers relevés de températures effectués ont ainsi été réalisés depuis l'interface homme machine, un écran insérer à l'extérieur de la chambre et qui permet de la contrôler (figure 35). L'interface homme machine affichait la température des trois sondes : la sonde du groupe froid, la sonde de l'échangeur et celle de la chambre. La température du sas était affichée directement sur le climatiseur qui servait à le refroidir.

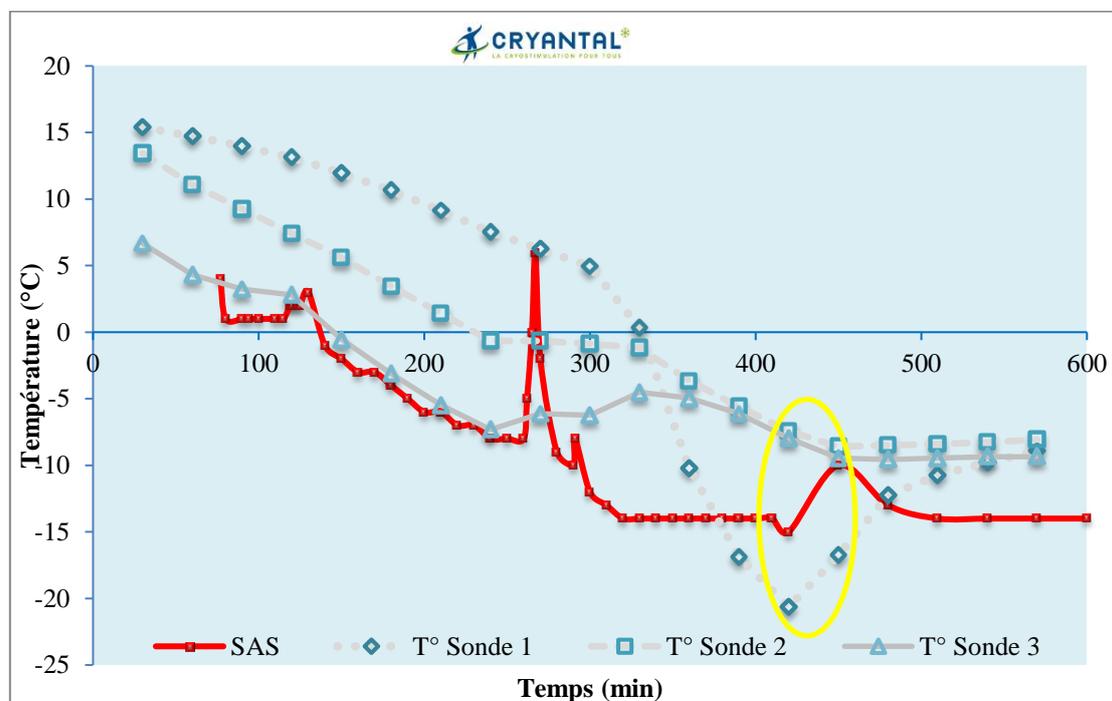


Figure 35 : Premiers relevés effectués pendant une descente en température. Sonde 1 : groupe froid ; Sonde 2 : échangeur ; Sonde 3 : chambre. Le cercle jaune dénote une anomalie qui a entraîné une remontée de la température

Plusieurs imperfections sont rapidement apparues dans la chambre. Le climatiseur du sas qui était monté à l'intérieur de la remorque produisait beaucoup trop de chaleur qu'il n'était pas en mesure d'évacuer. Il s'arrêtait très souvent pour se réguler. La température de ce climatiseur situé sur une paroi du sas posait également un problème dans le refroidissement optimal de celui-ci. De plus, l'air qui circulait dans les murs autour de la chambre froide est également refroidi par le climatiseur. Il devait alors être efficace pour que la chambre principale puisse fonctionner correctement.

La position des sondes a également été source de problème. La t_{eq} était calculée avec la température mesurée sur la sonde 1. Or celle-ci a été placée dans le groupe froid (figure 36). Certes, la sonde 1 affichait des températures qui descendaient jusqu'à $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$, ce qui entraînaient des valeurs de températures ressenties t_{eq} de $-110\text{ }^{\circ}\text{C}$, mais ces températures n'avaient aucun sens puisqu'elles étaient calculées avec une sonde placée dans le groupe froid et non dans la chambre (figure 37). C'est à l'intérieur de la chambre d'exposition que le $-110\text{ }^{\circ}\text{C}$ est recherché. Au regard des premiers relevés, il est apparu que la sonde 3, placée dans la chambre, enregistrerait une température beaucoup moins froide que la sonde 1. Nous n'avons malheureusement pas pu continuer à observer les températures mesurées grâce aux sondes 2 et 3 car celle-ci sont rapidement tombées en panne. Il n'était donc pas possible de connaître la température exacte à l'intérieur de la chambre, ce qui est pourtant indispensable.

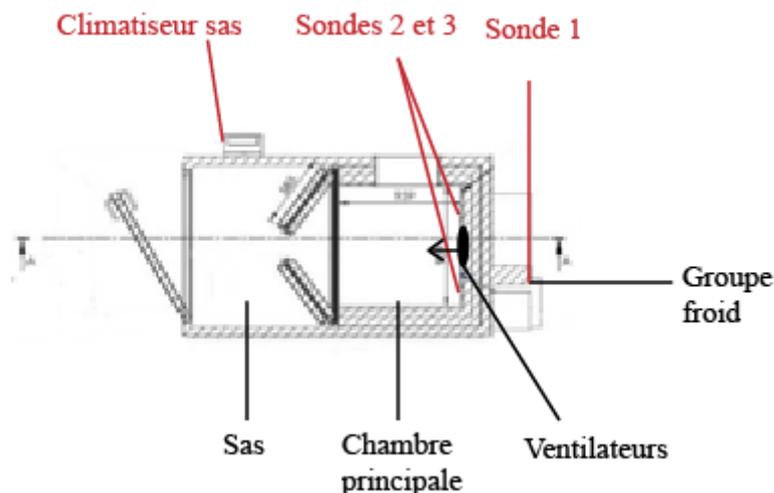


Figure 36 : Schéma du prototype de la chambre de CCE Cryantal vu du dessus

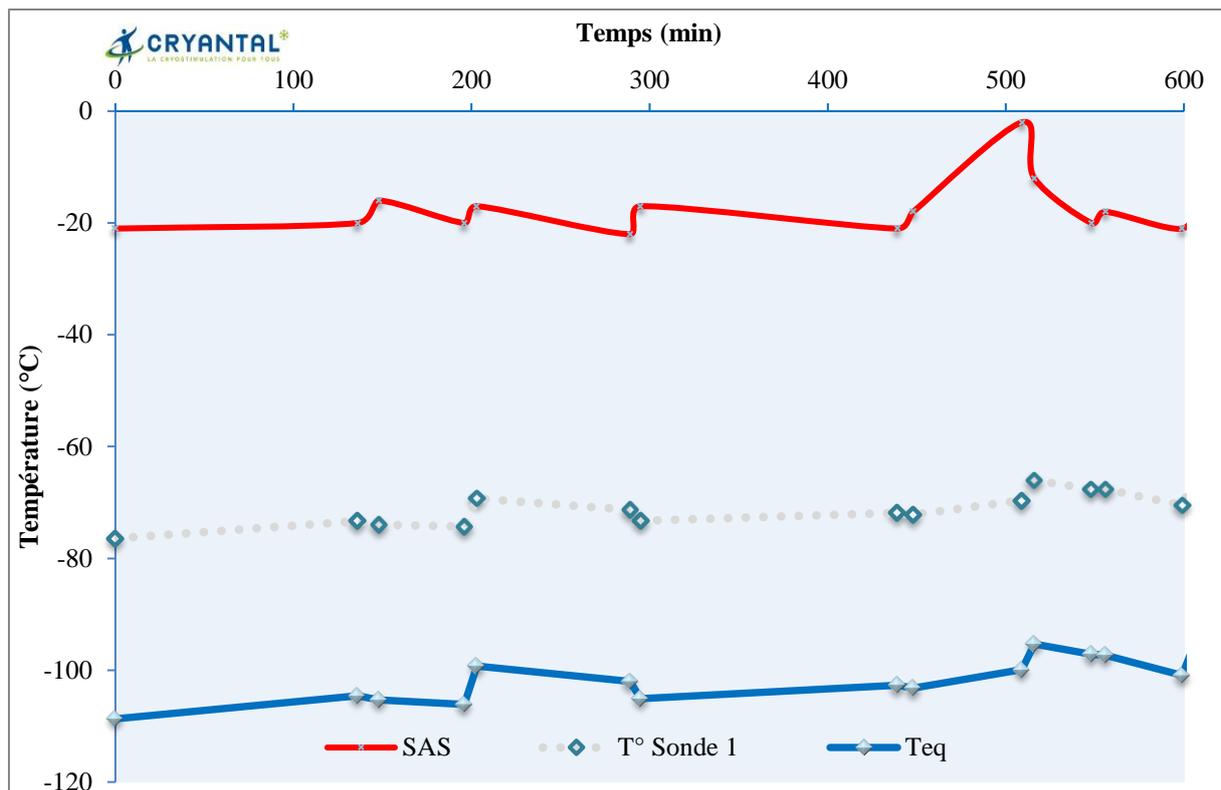


Figure 37 : Relevés effectués après 48h de descente en température. Abréviations : Sas : Température du sas ; T° Sonde 1 : Température de la sonde 1 ; Teq : Température équivalente ressentie

2. Collaboration avec l'Université de Champagne Ardennes

Afin de réaliser des mesures valides, nous avons choisi de nous diriger vers des spécialistes de la thermorégulation et de la mesure thermique. Nous avons pris contact avec une équipe de chercheurs du « Groupe de Recherches en Sciences Pour l'Ingénieur (GRESPI) / Biomécanique / EA 4694 » de l'UFR STAPS de l'Université de Champagne Ardennes de Reims. Une étude préliminaire a été conduite avec Ahlem ARFAOUI (MCF HDR) et Benoit JARLOT (ingénieur). Ainsi, nous nous assurons avec cette nouvelle équipe de spécialistes d'avoir une méthodologie de mesure valide, sensible et fiable, ainsi qu'un matériel de mesure adapté.

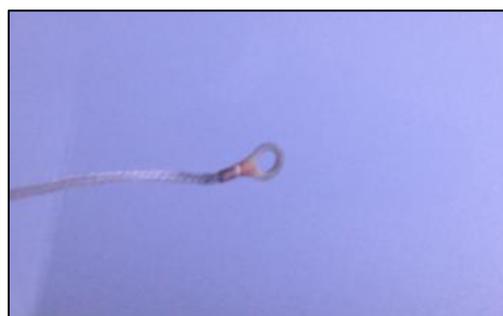


Figure 38 : Thermocouple de type T utilisé

3. Etude de validation technologique du prototype

Etude 4 : Résumé

Validation of a new whole-body cryotherapy chamber based on forced convection

Bouzigon R, Arfaoui A, Ravier G, Jarlot B, Dugue B, Grappe F.

Objectif :

Cette étude a été mise en place pour 1) mesurer les températures d'exposition réelles à l'intérieur des deux chambres du prototype et 2) évaluer les effets d'une exposition de 3 minutes à $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ sur les températures cutanée et mesurées dans le canal de l'oreille des sujets. Ces effets ont ensuite été comparés aux effets mesurés avec des technologies déjà existantes.

Méthode :

15 sujets sains (10 hommes et 5 femmes) ont été volontaires pour participer à cette étude. Ils ont réalisé une exposition de 30 secondes dans le premier sas puis de 3 minutes à $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ en t_{eq} dans la chambre principale. Les températures à l'intérieur du sas et de la chambre principale vides ont été mesurées avec cinq thermocouples de type T (TC Direct, Dardilly, France) (figure 38) placés à 55, 90, 125 et 160 cm de hauteur. Un thermocouple a également été placé dans le sas et un autre dans la chambre principale au cours de l'exposition des individus. La température cutanée des participants a été mesurée immédiatement avant, immédiatement après et à 1, 3, 5, 10, 15 et 20 minutes après l'exposition grâce à une caméra thermique VarioCAM® hr head (Jenoptik, Jena, Germany). Les zones d'intérêt mesurées étaient le front, la poitrine, les bras, l'abdomen et le haut des cuisses. La température mesurée dans le canal de l'oreille a été mesurée immédiatement avant et à 3, 10 et 20 minutes après l'exposition avec un thermomètre tympanique Thermoscan (Braun, Kronberg, Germany).

Résultats :

Températures à l'intérieur des chambres

Les températures relevées à l'intérieur du sas et de la chambre principale vides sont rapportées dans le tableau 4. Les relevés effectués montrent une certaine homogénéité haut/bas des températures à l'intérieur de la chambre. Les températures moyennes mesurées au cours des exposition des participants étaient de $-13,4\pm 2,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ dans le sas et de $-34,5\pm 3,0\text{ }^{\circ}\text{C}$ (t_{eq}) dans la chambre principale.

Tableau 4 : Températures d'exposition relevées à l'intérieur du sas et de la chambre principale vides

Position des thermocouples en hauteur (cm)	Température du sas (°C)	Température de la chambre principale (°C)	T_{eq} dans la chambre principale (°C)
160	-20,3	-32,9	-46,7
125	-19,8	-33,0	-42,8
90	-20,2	-32,1	-41,7
55	-20,5	-31,8	-40,2
20	-20,7	-31,9	-40,4
Coefficient de variation (CV%)	1,7	1,8	6,2

Températures cutanées

La température cutanée a diminué de manière significative après les expositions pour toutes les zones mesurées ($p < 0,001$) et toutes les tailles d'effets sont fortes ($> 0,8$) (tableau 5).

Tableau 5 : Températures cutanées avant et après exposition (Moyenne \pm Ecart type), taille de l'effet et intervalle de confiance (IC : 95 %)

Zone d'intérêt	Avant	Après	Taille de l'effet (IC 95 %)
Front	33,5 \pm 1,1	24,0 \pm 1,9	6,2 (5,6/6,7)
Poitrine	32,5 \pm 1,4	22,6 \pm 2,1	5,7 (5,1/6,3)
Bras	32,5 \pm 0,9	22,5 \pm 3,0	4,8 (4,0/5,5)
Abdomen	32,0 \pm 1,5	20,3 \pm 2,2	6,3 (5,6/7,0)
Haut des cuisses	30,6 \pm 1,5	17,0 \pm 1,8	8,7 (8,1/9,2)
Moyenne des zones d'intérêt	32,2 \pm 1,0	21,2 \pm 1,7	8,3 (7,8/8,8)

Les températures cutanées ont ensuite augmenté de manière significative au cours des 20 minutes après expositions ($p < 0,001$). La température des bras a augmenté significativement pendant 3 minutes, la température du front et de la poitrine pendant 10 minutes et la température de l'abdomen, du haut des cuisses pendant 15 minutes. La température moyenne de toutes les

zones mesurées a augmenté significativement pendant 20 minutes après l'exposition (figure 39).

Seule la température du front est revenue à la valeur mesurée avant exposition. Elle est revenue à cette valeur au bout de 10 minutes après la fin de l'exposition.

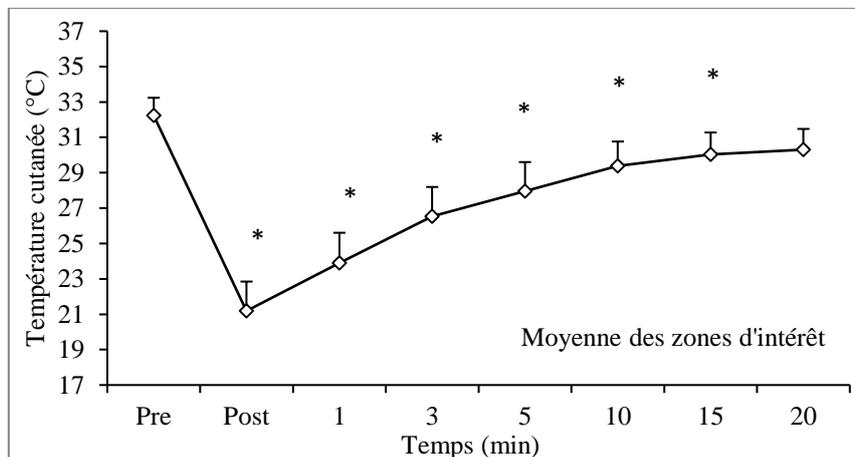


Figure 39 : Température cutanée moyenne des zones d'intérêt avant, immédiatement après et pendant 20 minutes après l'exposition. * = différence significative avec la valeur précédente

Température mesurée dans le canal de l'oreille

Aucune différence significative n'a été trouvée pour la température mesurée dans le canal de l'oreille.

Sensations thermiques

Les sensations thermiques relevées ont montré que les participants percevaient une température d'exposition « froide » et des sensations thermiques « moyennement agréables ».

Discussion :

Une exposition de 3 minutes à -40°C dans le prototype Cryantal a induit les mêmes effets sur la diminution de la température cutanée que des expositions de 3 minutes entre -60°C et -160°C dans des technologies de CCE et de CCP existantes. Ce résultat est probablement dû à l'utilisation de la convection forcée qui a entraîné une diminution du phénomène de couche équivalente autour du corps des individus exposés. Ainsi, les échanges entre la peau et l'air ambiant ont été augmentés, diminuant davantage la température cutanée.

Cette nouvelle technologie basée sur la convection forcée permet d'induire les effets recherchés sur la température cutanée sans utiliser d'azote et sans être trop énergivore. La température

moins froide à l'intérieur des chambres permet également de diminuer les besoins en maintenance.

La variation de température entre la chambre principale vide et avec un individu à l'intérieur est moins importante dans la chambre Cryantal (-19 %) que la variation mesurée dans une cabine de CCP Juka (-77 %). La température d'exposition est également plus homogène dans la chambre Cryantal que dans les cryosaunas. En effet, la ventilation dans la nouvelle chambre Cryantal est permanente alors que dans les cryosaunas le froid est généré par pulvérisation irrégulière d'azote à l'intérieur de la cabine.

En revanche, l'unilatéralité de la ventilation peut poser le problème du refroidissement total du corps.

Ainsi, il serait plus pertinent de développer une technologie avec des ventilateurs soufflant sur au moins deux côtés du corps.

Les sensations thermiques perceptives relevées montrent enfin que les contraintes thermiques liées aux expositions à l'intérieur de cette technologie ne sont pas trop difficiles à supporter.

Conclusion :

La nouvelle technologie de chambre Cryantal basée sur une convection forcée a été montrée comme efficace pour la diminution de la température cutanée. Néanmoins, une ventilation sur deux côtés serait encore plus pertinente.

Cette nouvelle technologie de CCE apparaît donc efficace, moins dangereuse et peu énergivore. Elle contribue ainsi au développement de la pratique de la CCE et à sa démocratisation.

Validation of a new whole-body cryotherapy chamber based on forced convection

Romain BOUZIGON^{a,d}, Ahlem ARFAOUJ^b, Gilles RAVIER^a, Benoit JARLOT^b, Benoit DUGUE^c, Frédéric GRAPPE^a

^aUniversité de Franche Comté, EA 4660, Laboratoire « Culture Sport Santé Société (C3S) », Unité de Promotion, de Formation et de Recherche (UPFR) des Sports, 31 rue de l'Épitaphe, 25000 Besançon, France.

^bUniversité de Reims Champagne-Ardenne, EA 4694, laboratoire « Groupe de Recherches en Sciences Pour l'Ingénieur (GRESPI)/Biomécanique », Unité de Formation et de Recherche (UFR) STAPS, Campus du Moulin de la Housse, BP 1039, 51687 Reims, France.

^cUniversité de Poitiers, EA 6314, laboratoire « Mobilité, Vieillesse et Exercice (MOVE) », Faculté des sciences du sport, 86000 Poitiers, France.

^dSociété Cryantal Développement, 15 cours du Lizard, 77186 Noisiel, France.

Abstract

Whole-body cryotherapy (WBC) and partial-body cryotherapy (PBC) are two methods of extreme cold exposure (from -110°C to -195°C according to the manufacturer), in which subjects are exposed for a period of one to four minutes. However, likely due to human body convection, temperatures ranging from -25°C to -50°C during a 3-min PBC exposure have been measured. Moreover, on the surface of the human body, an air layer called the boundary layer is created during the exposure and limits heat transfer from the body to the cabin air. Incorporating forced convection in a chamber with a participant inside could reduce this boundary layer. The aim of this study was to establish the validation of a new WBC technology based on forced convection through the measurement of skin temperature. Fifteen individuals were subjected to a 3-min WBC exposure at -40°C . The variation of the skin temperature was measured with a thermal camera just before exposure, just after exposure and at 1, 3, 5, 10, 15 and 20 min after exposure. Skin temperature significantly decreased just after exposure ($p<0.001$) and significantly increased within the 20 min post exposure ($p<0.001$). The mean skin temperature dropped by 11°C . This decrease was greater than the mean decreases in all of the cryosauna devices with reported exposures between -140°C and -160°C and those in two other WBC devices with reported exposures between -60°C and -110°C . The use of this new technology based on forced convection provides the ability to reach decreases in skin temperature similar to other technologies. We conclude that the new chamber is suitable and relevant for use as a WBC device.

Keywords: Cryotherapy; cryostimulation; thermal imaging; skin temperature; wind chill equivalent temperature

1. INTRODUCTION

Whole-body cryotherapy (WBC) and partial-body cryotherapy (PBC) are two methods that consist of exposing one to several subjects to extremely cold dry air for a period of one to four minutes. It has been reported that cold applications provide physiological, psychological and physical benefits (Bouzigon et al., 2016; Dugue, 2015). These methods have been developed to improve exercise recovery and relieve pain, depression and anxiety symptoms in patients suffering from rheumatism and inflammatory diseases (Bouzigon et al., 2016).

Currently, there are two types of technology for these treatments. Whole-body cryotherapy requires a cryogenic chamber in which the individual is entirely exposed to cold, and PBC consists of an open cabin in which the individual is exposed to cold, excluding the head and neck. For both treatments, individuals wear minimal clothing (a bathing suit, cap, gloves, socks, slippers and a surgical facemask for the WBC). These two types of technology require the use of nitrogen to create extremely cold temperatures (Bouzigon et al., 2016). At present, there is a lack of information in the literature concerning WBC and PBC, especially regarding the actual temperature of exposure inside the chamber or cabin. Only one study has presented the actual temperature in a PBC device (Criomed, Kherson, Ukraine) during an exposure (Savic et al., 2013). The authors reported temperatures of approximately -25°C with a participant inside the cabin and -50°C in the centre of the cabin without a participant inside. These data are important as they indicate a difference in the temperature of exposure produced by the PBC device (from -140°C to -195°C) and the actual temperature. No data are available concerning the temperatures inside WBC chambers. The temperature provided by the WBC device is -110°C , but no data have been presented in published studies. The discrepancy between temperatures provided by devices and actual temperatures during exposure may be due to the position of thermal sensors. In PBC, temperatures are measured at the outlet of nitrogen nozzles (Bouzigon et al., 2016). Due to the properties of nitrogen, the temperature of sprayed nitrogen can range from -110°C to -195°C but may differ from the actual temperature in the centre of the cabin. Moreover, when a participant is situated inside the cabin, the temperature increases (Savic et al., 2013). On the surface of the human body, an air layer called the boundary layer is created during the exposure and limits heat transfer from the body to the cabin air (Schlichting, 1968). Human body convection and the

boundary layer are thus important to consider in the efficiency of WBC and PBC devices when cooling air, especially in small compartments such as a PBC cabin.

Nevertheless, incorporating a forced convection (wind chill) in a chamber with a participant inside could reduce the boundary layer phenomenon (Osczevski and Bluestein, 2005). By definition, wind chill is a three- or four-digit number representing the rate of heat loss of a plastic bottle per unit of area (Siple and Passel, 1999). This index has been improved through several studies (Osczevski and Bluestein, 2005; Osczevski, 1995) and has been transformed into wind chill equivalent temperature (WCET in degrees Celsius and Fahrenheit). The WCET provides the perceived temperature in a chamber according to the wind speed in front of the individual.

The efficiency of WBC and PBC devices is traditionally assessed by measuring the variation in an individual's skin temperature before and after exposure (Bouzigon et al., 2016; Hauswirth et al., 2013; Savic et al., 2013). Indeed, the interaction between the human body and the cryocabin or cryochamber occurs principally at the skin, and skin temperature may reflect the balance between heat loss to the environment and heat produced by metabolically active tissues (Cholewka et al., 2006). However, due to the short duration of exposure, it is necessary to remain cautious about this assumption. The extreme cold could lead to a vasoconstrictive effect, which increases insulation and reduces heat exchange (Stocks et al., 2004). During a cold exposure, the body's thermoregulatory system attempts to maintain a constant core temperature ($37.0 \pm 0.8^\circ\text{C}$) through the vasoconstriction mechanism and an increase in metabolism (shivering). Short exposures lead to a small decrease in core temperature (Costello et al., 2012), but the skin temperature drops immediately. The strong variations in skin temperature induced by exposure to extreme cold lead to stimulation of cutaneous thermoreceptors and, therefore, the thermoregulation centre in the hypothalamus. The sympathetic adrenergic fibres become excited, causing local arterioles and venules to constrict and thereby reducing nervous conduction velocity (Herrera et al., 2010). Moreover, the decrease in blood flow reduces local metabolic processes, consequently attenuating inflammatory symptoms and the formation of oedema around injured tissues (Paddon-Jones and Quigley, 1997), which can occur after physical exercise or in some pathologies.

To date, no data are available concerning the use of WBC with a forced convection system for human skin temperature changes during cold exposure.

The aim of this study was to establish the validation of a new WBC technology based on forced convection by measuring the decrease in skin temperature during a 3-min exposure at -40°C . We hypothesized that the decrease in skin temperature in the chamber would be similar to those measured in other existing classical chambers and cabins.

2. MATERIAL AND METHODS

2.1 Study design

This study was conducted to assess the effects of a WBC technology based on WCET (Cryantal Development, Noisiel, France) on skin temperature and temperature measured in the ear canal. This WBC device (Figure 1) comprised two chambers. The first chamber was used to habituate the individual to the cold, dry air and to isolate the second chamber. The second chamber was the main exposure compartment. In this chamber, three fans, combined with the cold temperature, allowed for even colder conditions.

Skin and ear temperatures were assessed before, immediately after and within 20 min after exposure. The temperature of exposure was measured when the chambers were empty and when participants were inside. The study took place in a fitted trailer that contained a mobile WBC. The mean temperature inside the trailer during the investigation was $21.0 \pm 1.6^{\circ}\text{C}$, and the mean hygrometry was $51.7 \pm 8.9\%$.

2.2 Participants

Fifteen healthy volunteers (10 males and 5 females) participated in this study. Their characteristics are presented in Table 1. Body fat percentage was assessed using the sum of skinfold measures (biceps, triceps, subscapular and supra-iliac) with a Harpenden skinfold calliper. All of the participants volunteered and signed a statement of informed consent at their enrolment. All of the participants performed WBC regularly, and this study did not expose them to unknown extreme conditions. The study, whose protocol was accepted by the local medical commission, was conducted in a medical centre (Noisiel, France) and in accordance with the Declaration of Helsinki (2001).

Table 1: Characteristics of participants

	Age (year)	Height (cm)	Weight (kg)	Body fat (%)	BMI (kg.m ⁻²)
All participants (n=15)	38.7±8.2	174.6±8.0	70.8±10.0	20.1±8.4	23.1±2.3
Males (n=10)	38.6±9.8	179.0±4.2	74.9±8.1	15.5±5.0	23.3±2.0
Females (n=5)	39.0±4.5	165.8±6.5	62.6±8.6	29.5±5.4	22.8±3.1

2.3 Exposure protocol

First, volunteers were exposed to -20°C for 30 s in the first chamber and then -40°C for 3 min in the main chamber. During the exposure, volunteers wore a headband over their ears, a surgical mask, underwear, gloves, socks and slippers. Inside the chamber, they were required to stand still in front of the fans. At the end of the exposure, they exited the chamber within 10 s and were instructed not to rub their skin. They removed their mask, gloves and headband and situated themselves in the same position as before the exposure when their prior thermal measurement was taken.

2.4 Measurements

2.4.1 Chamber temperature

Before the experiments, the temperatures inside of the two empty chambers were controlled with five T type thermocouples (TC Direct, Dardilly, France). The sensitivity of these thermocouples was ±0.05°C. The thermocouples were fixed on a tripod at heights of 20, 55, 90, 125 and 160 cm. Due to the tripod's large size, only one thermocouple (90 cm high) per chamber was used during each participant exposure.

In the main chamber, the WCET was calculated using the equation by Oscezevski et al. (Oscezevski and Bluestein, 2005):

$$\text{WCET } (^{\circ}\text{C}) = 13.12 + 0.6215T - 11.37S^{0.16} + 0.3965T^2S^{0.16}$$

T is the temperature (°C) and S is the wind speed (km.h⁻¹). The wind speed must be multiplied by 1.5 due to the distance in front of the individual (Oscezevski and Bluestein,

2005) and was measured with a Kestrel 4250 anemometer (Kestrel, Birmingham, United Kingdom).

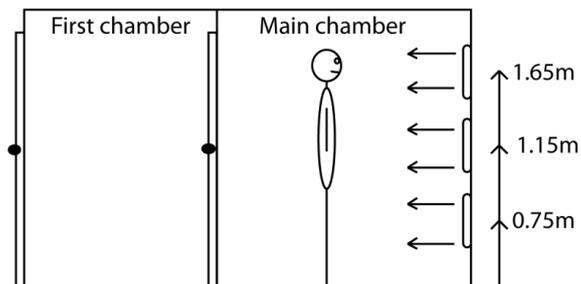


Figure 1: Scheme of the chambers with the three fans placed in the main chamber

2.4.2 Skin temperature

Skin temperature was measured before, immediately after (post, 10 s) and within 20 min after the exposure with a VarioCAM® hr head thermal camera (Jenoptik, Jena, Germany) and connected to the IRBIS3® Infratec software.

The infrared thermal camera is a non-invasive tool for measuring temperature and provides the surface temperature of a body. Thermal imaging was considered a safe and suitable method for monitoring skin temperature during and after a cryotherapy treatment at both clinical and sports levels (Matos et al., 2015). On the camera, we installed a type 1 lens with a focal length of 50 mm (Infratec Infrared. Available online: www.infratec-infrared.com/fileadmin/downloads/pdf/VC_hr/VC_hr_head_en.pdf). This allowed us to retain 99% of the information 1.4 m away. The range of temperature measurement of the VarioCAM® hr was between -40°C and 1200°C with an accuracy of $\pm 2\%$ in the measurement range. The radiometric thermographic system was based on an uncooled microbolometer FPA detector at 640×480 IR pixels. The camera spectral range was between 7.5 and 14 μm .

Participants were instructed to stand still in the same posture before and after the exposure. They were instructed to stand in front of the thermal camera with palms open and head straight. Thermal captures were performed before the exposure and 10 s and 1, 3, 5, 10, 15 and 20 min after the exposure.

The emissivity of the body was set within a range of 0.97 to 0.98 (Villasenor-Mora et al., 2009). The camera was mounted on a tripod and positioned in a corner of the trailer. The distance between the camera and the participants was 1.60 m. The size of the trailer did not allow a greater distance and consequently did not provide a view of the entire body. The measurement zone was between the forehead and the upper thighs. The zones of interest were the forehead, right and left chest, arms, forearms, abdomen, upper thighs and palms (Figure 2). The mean skin temperatures corresponded to the mean values calculated of the forehead, chest, arms, abdomen and upper thighs. The temperatures of the palms were removed because of the poor quality of the captures of these zones in several participants.



Figure 2: Measurement zones

2.4.3 Ear canal temperature

The temperature measured in the ear canal was assessed before the exposure and 3, 10 and 20 min after the exposure with an infrared Thermoscan tympanic thermometer (Braun, Kronberg, Germany) (Nimah et al., 2006).

2.4.5 Thermal sensations

The rate of perceived temperature and thermal sensations during WBC were recorded after the exposure using perceptual scales. Perceived temperature was assessed with a nine-point scale "4 – Very hot, 3 – Hot, 2 – Warm, 1 – Slightly warm, 0 – Neutral, -1 – Slightly cool, -2 – Cool, -3 – Cold, -4 – Very cold" (Smolander et al., 2004). Thermal sensation was assessed

with a thermal sensation scale graduated from “0 – Excellent” to “10 – Unbearable” (Lundgren et al., 2014). After the exposure, participants were asked the question, “On average, how did you feel during the exposure?”.

2.5 Statistical analysis

The statistical program used was SigmaPlot 12.0 Software (Systat Inc., San Jose, CA, USA). The results were expressed as the mean and standard deviation (SD). We tested the normality of each variable using the Shapiro-Wilk test. Skin temperature and cardiovascular data were logarithmically transformed to reduce non-uniformities of their distribution when they were not normally distributed (Hopkins et al., 2009). The analysis of the differences in skin temperature before and after the exposure were performed with the Mann-Whitney test. Furthermore, a 95% confidence interval (CI) for between-condition differences was estimated, and a Cohen’s *d* effect size (ES) analysis was performed to determine the magnitude of the effect of WBC on skin temperature. According to Cohen (Cohen, 1990), effect sizes of <0.20 are classified as trivial, 0.20–0.49 are small, 0.50–0.79 are moderate, and >0.80 are large effects. An analysis of variance (ANOVA) with repeated measures was used to determine the significant mean effects for changes over time after exposure. A post hoc comparison was performed with the Holm-Sidak multiple comparisons test. Test-retest reliability of the skin temperature measurement was assessed using change in mean skin temperature, typical error, and Pearson’s correlation, as proposed by Hopkins (Hopkins, 2000). Two 3-min exposures with an average of 3 days in-between were performed in 12 participants, and the variations in mean skin temperature before and immediately after the exposures were compared.

3. RESULTS

3.1 Chamber temperature

The wind speed measured inside the empty main chamber was $3.7 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ in front of the upper fan, $1.9 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ in front of the middle fan and $1.5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ in front of the lower fan. The actual temperatures inside the empty chambers are presented in Table 2. During participant exposure, the mean temperature measured inside the first chamber was $-13.4\pm 2.1^\circ\text{C}$, and in the main chamber, it was $-34.5\pm 3.0^\circ\text{C}$ (WCET).

Table 2: Temperatures inside the empty chambers

Thermocouple position (cm)	First chamber temperature (°C)	Main chamber temperature (°C)	Main chamber WCET (°C)
160	-20.3	-32.9	-46.7
125	-19.8	-33.0	-42.8
90	-20.2	-32.1	-41.7
55	-20.5	-31.8	-40.2
20	-20.7	-31.9	-40.4
Coefficient of variation (CV%)	1.7%	1.8%	6.2%

3.2 Skin temperature

3.2.1 Thermal imaging measures reproducibility

A significant correlation ($r=0.75$; $p<0.001$), a nonsignificant change in means ($p=0.92$; Confidence interval (95%): $-0.87/1.38$) and typical error of 0.08°C and 0.14°C indicated good reproducibility of the skin temperature measurements with the thermal camera.

3.2.2 Difference in skin temperature before and after the exposure

Skin temperature decreased significantly for all of the zones of interest ($p<0.001$). All of the effect sizes were large (Table 3). The most important effect size was reported for the skin temperature decrease of the upper thighs. The mean decrease in skin temperature for the whole body was -11°C .

Table 3: Skin temperatures before and immediately after 3 min exposure (Mean±SD), effect size (ES) and confidence interval (CI: 95%) in fifteen participants

Zones of interest	Before	After	Effect size (CI 95%)
Forehead	33.5±1.1	24.0±1.9	6.2 (5.6/6.7)
Chest	32.5±1.4	22.6±2.1	5.7 (5.1/6.3)
Arms	32.5±0.9	22.5±3.0	4.8 (4.0/5.5)
Abdomen	32.0±1.5	20.3±2.2	6.3 (5.6/7.0)
Upper thighs	30.6±1.5	17.0±1.8	8.7 (8.1/9.2)
Mean skin temperature	32.2±1.0	21.2±1.7	8.3 (7.8/8.8)

3.2.3 Change in skin temperature within 20 minutes after exposure

The skin temperature for each zone of interest significantly increased within the 20 min after the exposure ($p < 0.001$) (Figure 3). The skin temperature of the arms increased significantly within 3 min ($p < 0.001$); the forehead and chest skin temperatures increased significantly within 10 min ($p < 0.001$); and the abdomen, upper thighs and mean skin temperature increased significantly within 15 min ($p < 0.001$).

After the exposure, the forehead skin temperature was the only one to recover its baseline value. In fact, there was no significant difference between forehead skin temperature before the exposure and 10 min after the exposure.

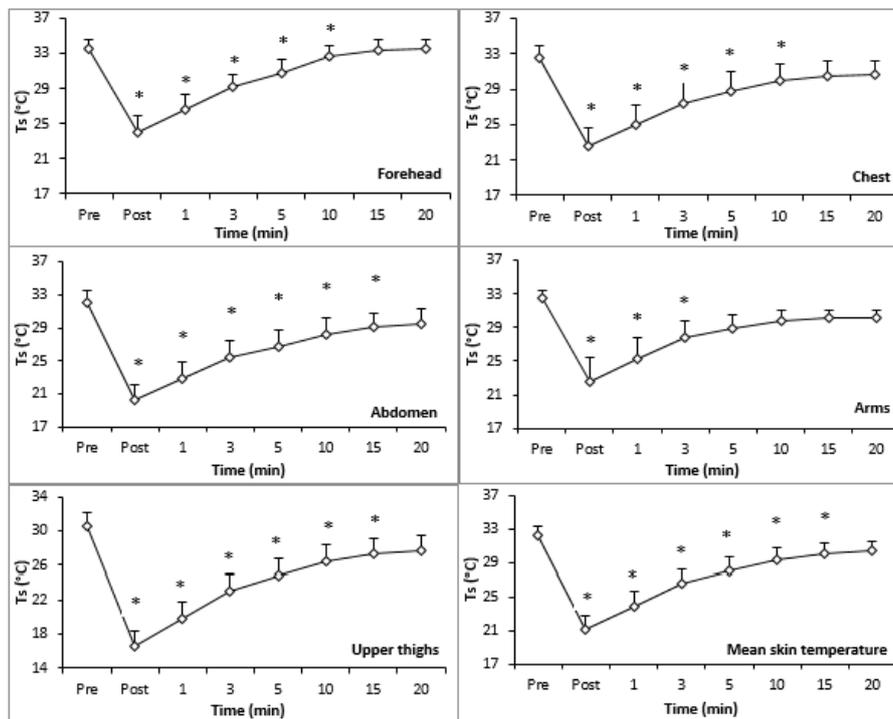


Figure 3: Skin temperature before, just after and during 20 min after a 3-min WBC exposure in fifteen participants (*: significant difference from the previous measurement). Abbreviation: T_s : skin temperature.

3.3 Ear canal temperature

The ear canal temperature did not decrease after a 3-min exposure. The mean ear canal temperature before the exposure was $36.1 \pm 0.6^\circ\text{C}$, and it was $35.8 \pm 0.6^\circ\text{C}$ for three and five minutes after the exposure and $36.1 \pm 0.5^\circ\text{C}$ ten minutes after the exposure.

3.4 Thermal sensations

The mean perceived temperature during a 3-min exposure was -3.0 ± 0.8 , corresponding to "cold", and the score for thermal sensations was 6.0 ± 1.9 , corresponding to "not very good" sensations.

Table 4: Variation in skin temperature after PBC and WBC exposure as a function of the technology used

Studies	Technology/ exposure protocol/ measurement tools	Forehead	Chest	Arms	Abdomen	Thighs	Mean skin temperature
Present study	WBC Cryantal 3 min -40°C Thermal imaging	-9.5°C	-9.9°C	-10°C	-11.7°C	-13.6°C (upper thighs only)	-11.0°C
Savic et al. 2013 (Savic et al., 2013)	PBC Criomed 3 min -140°C Thermal imaging		-7.3°C	-5.7°C	-11.5°C		-9.7°C
Fonda et al. 2014 (Fonda et al., 2014)	PBC Criomed 3 min -140°C Thermolazer		-6.7°C	-10.5°C	-9.3°C	-12.6°C	-9.4°C
Hauswirth et al. 2013 (Hauswirth et al., 2013)	PBC Krion 3 min -160°C Thermal imaging		-7.1°C	-7.5°C			-8.3°C
Louis et al. 2015 (Louis et al., 2015)	PBC Krion 3 min -160°C Thermal imaging 1 st exp/3 rd exp	-1.2°C -1.1°C					-8.2°C -7.6°C

Zalewski et al. 2013 (Zalewski et al., 2013)	WBC Stan Mar 3 min -120°C Thermal imaging	-17.4°C	R: -19.0°C L: -21.7°C	-17.6°C
Selfe et al. 2014 (Selfe et al., 2014)	WBC Juka 3 min -135°C Thermal imaging			-14.8°C
Cholewka et al. 2012 (Cholewka et al., 2012)	WBC (Unknown model) 3 min -120°C Thermal imaging	-2.3°C	-4.9°C	-5.6°C -4.9°C
Hauswirth et al. 2013 (Hauswirth et al., 2013)	WBC Zimmer 3 min -110°C Thermal imaging		-12.4°C	-13.5°C -13.7°C
Louis et al. 2015 (Louis et al., 2015)	WBC Zimmer 3 min -60°C Thermal imaging 1 st exp/3 rd exp	-7.8°C -7.1°C		-8.7°C -7.6°C
Costello et al. 2012 (Costello et al., 2012)	WBC Zimmer 3 min 40 -110°C			R. knee: -8.8°C L. knee: -9.9°C
Costello et al. 2014 (Costello et al., 2014b)	Thermal imaging			-12.1°C

(Abbreviations: PBC: Partial body-cryotherapy; WBC: Whole-body cryotherapy; Min: Minute; R: Right, L: Left; Exp: Exposure)

4. DISCUSSION

The aim of this study was to establish the first validation of a new WBC technology based on forced convection through the measurement of skin temperature.

The first important finding of this study was the marked decrease in skin temperature with this new technology. The mean skin temperature dropped by 11°C after a 3-min exposure. This finding was consistent with those reported in previous studies using other cold-producing technologies. This decrease was greater than the mean decreases in all of the cryosauna devices with reported 3-min exposures between -140°C to -160°C. It was also greater than the decrease in the WBC Zimmer for a 3-min exposure at -60°C. Additionally, it was greater than the decrease in an unknown model of WBC chamber used by Cholewka et al. (Cholewka et al., 2012) for a 3-min exposure at -110°C. The only studies that reported a greater decrease in mean skin temperature for the whole body with 3-min exposures at -110°C and -135°C (Hauswirth et al., 2013; Selfe et al., 2014) (Table 4). In the literature, the decrease in mean skin temperature with a 3-min PBC exposure varied from -7.6°C to -9.7°C (Fonda et al., 2014; Hauswirth et al., 2013; Louis et al., 2015; Savic et al., 2013) and varied from -4.9 to -14.8°C with a 3-min WBC exposure (Cholewka et al., 2012; Hauswirth et al., 2013; Selfe et al., 2014). Table 4 summarizes the changes in skin temperature produced using our new techniques as well as the changes observed previously using other technologies. The decrease in skin temperature per zone indicated that the wind chill WBC technology was more efficient than the PBC and WBC chambers (unknown model) used in the study by Cholewka et al. (Cholewka et al., 2012). In relation to the forehead, the skin temperature decrease after exposure with wind chill WBC technology was greater than the decrease after the exposure in PBC Krion (Krion, Saint Petersburg, Russia) and the decrease after the exposure in an unknown WBC model used in the Cholewka study (Cholewka et al., 2012; Louis et al., 2015). Our results related to the forehead temperature decrease are interesting because it has been demonstrated that skin temperature decreases in the face accentuate the benefits of WBC in the sympathetic nervous system (Hauswirth et al., 2013). The authors hypothesized that a higher magnitude of the baroreflex would concomitantly occur with the activation of the trigemino-cardiac reflex receptors when the face was exposed to cold. For the other zones of interest, the wind chill WBC technology remained slightly less effective than existing WBC chambers.

In the main chamber, since the cold comes from above, the temperature was colder at the top of the room. Interestingly, we observed that even if the colder temperature of exposure in the WBC Cryantal was measured at the top of the room, the most important variation in skin temperature was measured at the level of the upper thighs (Table 3 and 4). This was probably because the most important fat layer is in this area of the body. Fat is an insulator, and it is more difficult to decrease the temperature of a thick fat layer (Hammond et al., 2014). However, once cooled, the fat layer warms up more slowly. Thus, the colder skin temperatures measured at the level of the upper thighs may have been due to the cooled fat layer in this area.

Even if the temperature was colder at the top of the main chamber, the coefficient of variation between the temperatures of the top and bottom of the chambers was low, indicating strong homogeneity of the temperature.

After the exposure, the forehead skin temperature was the only one to recover its baseline value, and it did so in a short time (post 10 minutes). It is interesting to note that the forehead temperature had the smallest decrease during the exposure and was the fastest return to the baseline temperature after the exposure. However, the temperatures of other zones of interest did not return to baseline values within 20 minutes after the exposure. These findings were consistent with those reported in other studies (Fonda et al., 2014; Hauswirth et al., 2013; Savic et al., 2013; Selfe et al., 2014; Westerlund et al., 2003). However, Zalewski et al. (Zalewski et al., 2013) showed higher skin temperatures than baseline values 3 hours after exposure.

Interestingly, the wind chill WBC technology appeared to be suitable for decreasing skin temperature. This could be explained by the ability of wind to extract heat from the body. Air has a poor heat transfer coefficient, but if wind is added, the heat transfer is increased by forced convection (Osczevski and Bluestein, 2005). This technology based on WCET allows for decreases in skin temperature to be reached that are similar to those of other technologies while the actual temperature of the exposure is less cold. A 3-min exposure at -40°C with wind chill WBC technology appeared suitable to induce a skin temperature decrease. This finding was interesting because it demonstrated the efficiency of a new technology to decrease skin temperature without having to produce a temperature of -110°C inside the chamber.

The second interesting finding of this study was the small difference in temperature between an empty chamber and a chamber with a participant inside. It has been shown that an empty PBC can reach -110°C , but with a participant inside, the temperature of exposure is approximately -25°C (Savic et al., 2013). The authors hypothesized that the air temperature in a PBC with a participant inside would drop less due to the heat transfer from the participant's body to the cabin. The difference in temperatures observed in this study between an empty chamber and a chamber with a participant inside was less important than the difference in PBC. This could have been explained by the wind around the participant, which decreased the convection effect. Moreover, the homogeneity of the temperature between the top and bottom of the room was better in the wind chill WBC than in the PBC cabin. This finding could explain the greater decrease in mean skin temperature after exposure in wind chill WBC technology than in PBC. Wind chill WBC technology prevents the body convection effect and increases heat extraction from the body. The homogeneity of the temperature of exposure allows the entire body to be cooled in a consistent way. In PBC, temperature adjustment is performed by spraying nitrogen when the temperature inside the cabin rises above a certain level (e.g., above -115°C if the selected temperature of exposure was -120°C) at the site of the nitrogen nozzle. The amplitude of the temperatures before and after adjustment may range from 10 to 20°C , making it difficult to set and control precise temperatures and leading to the heterogeneity of the exposure temperature (Bouzigon et al., 2016).

In addition to the efficiency in skin temperature decrease, this technology was interesting because nitrogen was not used. Thus, exposures were safer and less costly. Moreover, this WBC chamber was the first mobile WBC technology.

The absence of ear canal temperature variation within the 20 minutes after the exposure was inconsistent with some studies that showed a decrease immediately after, 20 minutes, 40, 50 and 60 minutes after WBC and PBC exposures (Costello et al., 2014a; Costello et al., 2012; Hausswirth et al., 2013; Louis et al., 2015). Westerlund et al. (Westerlund et al., 2003) did not find a decrease in rectal temperature after a 2-min WBC exposure, and Selfe et al. (Selfe et al., 2014) showed no difference in gastrointestinal temperature after 1, 2 and 3 minutes of WBC exposure. The lack of changes in our study could be explained by the unilaterality of the wind inside the chamber. During the exposure, participants stood with

their faces to the fans and their backs exposed to the cold but not to the wind. However, it could be worthwhile to record the ear canal temperature for a longer period of time. The ear canal temperature could decrease later.

Finally, even if important differences in interindividual thermal sensations were noted, the wind chill WBC technology did not appear to be unpleasant. The reported sensations were uncomfortable, similar to those reported with WBC Zimmer and Juka, but they remained bearable (Selfe et al., 2014; Smolander et al., 2004; Westerlund et al., 2003). This finding could be explained by the wind, which induced a perception of more penetrative cold air.

The main limitation of this study was that the measurement of skin temperature was performed only on the front side of the body. The study was conducted within a trailer, and it was not possible to place another camera behind the participants. To maintain the quality of the thermal measurements and avoid extra convection, participants were not allowed to turn their bodies. In this study, participants were placed in front of the fans. Thus, decreases in skin temperature measured in this study did not truly reflect decreases of the entire body. Nevertheless, the study showed the capacity of this technology to decrease skin temperature with fans.

The second limitation was the lack of space in the trailer. In fact, it was impossible to capture the participants' entire body with the thermal camera, which explained the small zone of measurement of the thighs.

5. CONCLUSIONS

This new WBC technology based on WCET appeared suitable to induce skin temperature decrease in all of the measured zones of interest. In fact, a 3-min exposure at -40°C with a forced convection could be as effective as a 3-min exposure at -110°C to -195°C in traditional WBC and PBC devices. However, the effects could be improved with the addition of more fans to more effectively cool the entire body (front and back). This technology is interesting because nitrogen is not used, making it safer and less costly to implement. Further studies should be performed to assess the effect of this technology on other variables. Studies on colder temperatures of exposure (e.g., 80°C , -110°C) using this new technology are merited.

6. ACKNOWLEDGEMENTS

We warmly thank GRESPI Laboratory and Cryantal Development for their resources and logistical support. This study was supported by Cryantal Development.

7. CONFLICTS OF INTEREST

The first author, Romain Bouzigon, is employed by Cryantal Development as part of a collaboration between the university and the company. Romain Bouzigon received a grant from the French Government (Grant no. 703/2012).

8. REFERENCES

Bouzigon, R., Grappe, F., Ravier, G., Dugue, B., 2016. Whole- and partial-body cryostimulation/cryotherapy: Current technologies and practical applications. *Journal of Thermal Biology* 61, 67-81.

Cholewka, A., Drzazga, Z., Sieron, A., 2006. Monitoring of whole body cryotherapy effects by thermal imaging: preliminary report. *Physica Medica* 22, 57-62.

Cholewka, A., Stanek, A., Sieron, A., Drzazga, Z., 2012. Thermography study of skin response due to whole-body cryotherapy. *Skin Research and Technology* 18, 180-187.

Cohen, J., 1990. Statistical power analysis for the behavioral sciences. *Computers, Environment and Urban Systems* 14, 71.

Costello, J., McNamara, P.M., O'Connell, M.L., Algar, L.A., Leahy, M.J., Donnelly, A.E., 2014a. Tissue viability imaging of skin microcirculation following exposure to whole body cryotherapy (-110°C) and cold water immersion (8°C). *Archives of Exercise in Health and Disease* 4, 243-250.

Costello, J.T., Culligan, K., Selfe, J., Donnelly, A.E., 2012. Muscle, Skin and Core Temperature after -110°C Cold Air and 8°C Water Treatment. *PloS one* 7, e48190.

Costello, J.T., Donnelly, A.E., Karki, A., Selfe, J., 2014b. Effects of whole body cryotherapy and cold water immersion on knee skin temperature. *International journal of sports medicine* 35, 35-40.

Dugue, 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). *Frontiers in physiology* 6, 35.

Fonda, B., De Nardi, M., Sarabon, N., 2014. Effects of whole-body cryotherapy duration on thermal and cardio-vascular response. *Journal of Thermal Biology* 42, 52-55.

Hammond, L.E., Cuttell, S., Nunley, P., Meyler, J., 2014. Anthropometric Characteristics and Sex Influence Magnitude of Skin Cooling following Exposure to Whole Body Cryotherapy. *BioMed Research International*, 7.

Hauswirth, C., Schaal, K., Le Meur, Y., Bieuzen, F., Filliard, J.R., Volondat, M., Louis, J., 2013. Parasympathetic activity and blood catecholamine responses following a single partial-body cryostimulation and a whole-body cryostimulation. *PLoS one* 8, e72658.

Herrera, E., Sandoval, M.C., Camargo, D.M., Salvini, T.F., 2010. Motor and sensory nerve conduction are affected differently by ice pack, ice massage, and cold water immersion. *Physical therapy* 90, 581-591.

Hopkins, W.G., 2000. Measures of reliability in sports medicine and science. *Sports Med* 30, 1-15.

Hopkins, W.G., Marshall, S.W., Batterham, A.M., Hanin, J., 2009. Progressive statistics for studies in sports medicine and exercise science. *Medicine and science in sports and exercise* 41, 3-13.

Louis, J., Schaal, K., Bieuzen, F., Le Meur, Y., Filliard, J.R., Volondat, M., Brisswalter, J., Hauswirth, C., 2015. Head Exposure to Cold during Whole-Body Cryostimulation: Influence on Thermal Response and Autonomic Modulation. *PLoS one* 10, e0124776.

Lundgren, P., Henriksson, O., Kuklane, K., Holmer, I., Naredi, P., Bjornstig, U., 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, 287-291.

Matos, F., Neves, E.B., Norte, M., Rosa, C., Reis, V.M., Vilaça-Alves, J., 2015. The use of thermal imaging to monitoring skin temperature during cryotherapy: A systematic review. *Infrared Physics & Technology* 73, 194-203.

Nimah, M.M., Bshesh, K., Callahan, J.D., Jacobs, B.R., 2006. Infrared tympanic thermometry in comparison with other temperature measurement techniques in febrile children. *Pediatr Crit Care Med* 7, 48-55.

Osczevski, R., Bluestein, M., 2005. The new wind chill equivalent temperature chart. *Bulletin of the American Meteorological Society* 86, 1453-1458.

Osczevski, R.J., 1995. The Basis of Wind Chill. *ARCTIC; Vol 48, No 4 (1995): December: 313–405* DOI - 10.14430/arctic1262.

Paddon-Jones, D.J., Quigley, B.M., 1997. Effect of cryotherapy on muscle soreness and strength following eccentric exercise. *International journal of sports medicine* 18, 588-593.

Savic, M., Fonda, B., Sarabon, N., 2013. Actual temperature during and thermal response after whole-body cryotherapy in cryo-cabin. *Journal of Thermal Biology* 38, 186-191.

Schlichting, H., 1968. *Boundary-layer theory*. McGraw-Hill.

Selfe, J., Alexander, J., Costello, J.T., May, K., Garratt, N., Atkins, S., Dillon, S., Hurst, H., Davison, M., Przybyla, D., Coley, A., Bitcon, M., Littler, G., Richards, J., 2014. The effect of three different (-135 degrees c) whole body cryotherapy exposure durations on elite rugby league players. *PloS one* 9, e86420.

Siple, P.A., Passel, C.F., 1999. Excerpts from: measurements of dry atmospheric cooling in subfreezing temperatures. 1945. *Wilderness & environmental medicine* 10, 176-182.

Smolander, J., Mikkelsen, M., Oksa, J., Westerlund, T., Leppaluoto, J., Huttunen, P., 2004. Thermal sensation and comfort in women exposed repeatedly to whole-body cryotherapy and winter swimming in ice-cold water. *Physiology & behavior* 82, 691-695.

Stocks, J.M., Taylor, N.A., Tipton, M.J., Greenleaf, J.E., 2004. Human physiological responses to cold exposure. *Aviat Space Environ Med* 75, 444-457.

Villasenor-Mora, C., Sanchez-Marin, F.J., Calixto-Carrera, S., 2009. An indirect skin emissivity measurement in the infrared thermalrange through reflection of a CO2 laser beam. *Revista Mexicana de Fisica* 55, 387-392.

Westerlund, T., Oksa, J., Smolander, J., Mikkelsen, M., 2003. Thermal responses during and after whole-body cryotherapy (-110°C). *Journal of Thermal Biology* 28, 601-608.

Zalewski, P., Klawe, J.J., Pawlak, J., Tafil-Klawe, M., Newton, J., 2013. Thermal and hemodynamic response to whole-body cryostimulation in healthy subjects. *Cryobiology*, 295-302.

Synthèse :

Le prototype de la nouvelle chambre de CCE Cryantal a montré une réelle efficacité en termes de diminution de la température cutanée. Néanmoins il peut encore être davantage développée pour être encore plus pertinent.

A cet effet, un système de ventilation bilatéral permettrait de mieux ventiler l'ensemble du corps de la personne exposée. Le climatiseur qui refroidit le sas devrait être placé à l'extérieur de la remorque afin de ne pas créer de chaleur trop importante. Les sondes de mesures de la température devraient être placées à l'intérieur de la chambre principale.

D'un point de vue méthodologique, l'avenir semble tendre vers la conception de technologies capables d'individualiser les protocoles d'exposition en fonction des caractéristiques morphologiques de chacun et des effets recherchés (soulagement d'une pathologie, récupération sportive ou bien-être). Le développement de technologies intelligentes apparaît ainsi inévitable dans l'optimisation de la pratique de CCE. L'optimisation des protocoles d'exposition permettrait également une élévation du niveau de sécurité de la pratique en identifiant des limites à ne pas dépasser lors des expositions (durée, température, répétitions, ...).

CHAPITRE 3 : PERSPECTIVES D'EVOLUTION DE LA CHAMBRE DE CRYOTHERAPIE CORPS ENTIER

1. Développement d'une cryothérapie corps entier intelligente

Manifestement, la CCE prend de plus en plus d'importance au sein de notre société. Il semble important de pouvoir créer une technologie adaptée à tous les publics. La revue de littérature effectuée dans la première partie montre qu'il existe plusieurs protocoles d'exposition en termes de durée, de température et de fréquence d'exposition. Elle montre également que la prise en compte des caractéristiques morphologiques des personnes n'est pas encore très développée. Ces éléments sont pourtant incontournables dans l'optimisation des protocoles de CCE. L'empirisme actuel lié au manque d'études scientifiques et au manque de diversité des technologies existantes doit évoluer. La CCE est une pratique médicale et l'optimisation des protocoles d'expositions doit être basée sur une objectivité scientifique. Une exposition optimale devrait passer par un protocole individualisé. Nous avons donc décidé de mettre en place prochainement des études qui seront réalisées sur différentes populations en termes de caractéristiques morphologiques et d'effets recherchés. Pour ce faire, des collaborations universitaires sont envisagées (exemple de dossier pour l'Université de Franche-Comté en Annexe 1). Ce travail devra permettre de développer une technologie de CCE intelligente capable de définir des séances individualisées et évolutives en fonction des caractéristiques morphologiques de chacun et des effets désirés.

2. Certificat de Conformité Européenne Médical

Dans le but de répondre aux normes de sécurité Européenne, nous avons débuté la rédaction d'un dossier de Conformité Européenne (CE) pour les dispositifs médicaux (DM). Cette notion de DM est utilisée en Europe pour définir les exigences réglementaires applicables à un dispositif médical et aux activités du fabricant. Il existe quatre classes pour les DM, par ordre de criticité : I, IIA, IIB, III (figure 40). La criticité est établie en fonction des risques potentiels pour les patients, du personnel soignant ou de toute autre personne intervenant lors de l'utilisation du dispositif. Afin de définir cette classe, les aspects pris en considération sont la finalité du dispositif (thérapeutique, diagnostic, chirurgical), le caractère invasif et implantable, le caractère actif, la durée d'utilisation et les parties du corps concernées.

La durée d'utilisation concerne la durée maximale durant laquelle le DM est susceptible d'être utilisé en continu. Le dispositif invasif désigne les DM qui pénètrent dans le corps par un orifice

naturel ou par voie chirurgicale (désigné sous le terme dispositif invasif de type chirurgical). Le dispositif implantable est invasif et destiné à rester dans le corps. Le dispositif chirurgical est quant à lui destiné à accomplir des actes chirurgicaux. Les dispositifs actifs, thérapeutiques, destinés au diagnostic sont des DM électriques utilisant une énergie non fournie par un humain ou la pesanteur (un pèse patient électrique est considéré comme actif mais un pèse personne mécanique ne l'est pas). Ils peuvent être des dispositifs à finalité thérapeutiques (soulagement des douleurs ou du handicap) ou destinés au diagnostic. Les logiciels sont considérés comme DM actifs. La criticité de ces dispositifs est donc apportée par le risque lié à l'énergie comme l'électrocution.



Figure 40 : Classement des dispositifs médicaux en fonction de leur dangerosité

La définition de la classe du DM est importante, elle définit le choix de la procédure à suivre pour le marquage CE (figure 41). Le marquage CE indique que le dispositif est conforme aux exigences applicables en Europe et qu'il a été évalué selon les procédures prévues. Il n'est pas possible d'utiliser un dispositif dans le cadre médical en Europe sans le marquage CE.

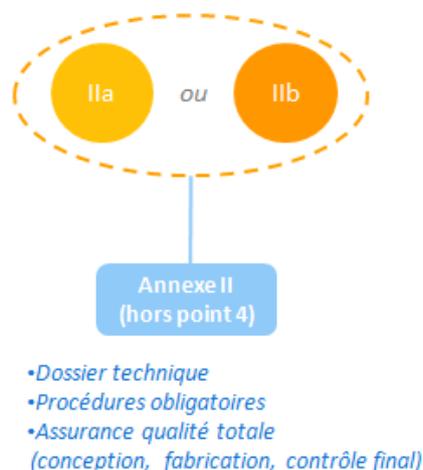


Figure 41 : Evaluation de la conformité des dispositifs médicaux de classe IIa et IIb

La chambre de CCE Cryantal est classée entre les niveaux IIa et IIb. Le marquage CE pourra être obtenu après une procédure bien définie. Le fabricant doit générer un dossier technique et mettre en place des processus obligatoires dans tout le déroulement des tâches de la conception à la vente du dispositif (Annexe 2). Il doit également mettre en place un système complet d'assurance qualité qui est contrôlé par un organisme notifié. Ce choix de certification demande généralement un an de travail selon Guillaume PROMÉ, consultant et membre de la commission Afnor S95B "Management de la Qualité et aspects généraux correspondants des Dispositifs Médicaux". Mon rôle le plus important dans la rédaction du dossier en vue d'obtenir un marquage médical est de rédiger un rapport d'évaluation clinique lié aux effets de la CCE (Annexe 3).

3. Accessoires

La nouvelle chambre sera munie de plusieurs accessoires comme des outils de mesure physiologiques (aspect sécuritaire et performance de la chambre) ou encore des accessoires axés sur le bien-être (musique, communication vocale entre l'intérieur et l'extérieur de la chambre, jeux de lumière, odeurs). Au niveau du design, la chambre devrait être rendue plus attirante. Un designer est actuellement à la tâche pour effectuer ce nouveau design.

4. Mise en place de formation de cryothérapeute

Afin de développer davantage le côté sécuritaire de la pratique, une formation de « cryothérapeutes » sera développée par Cryantal à plusieurs niveaux. La première formation sera une formation technique d'exploitant afin de pouvoir exploiter les dispositifs sur le terrain. Elle sera davantage tournée vers les aspects techniques et sécuritaires liés à l'entretien de la chambre et aux expositions des individus. Puis d'autres grades seront proposés où les individus formés se verront inculquer de plus en plus de connaissances liées aux aspects psychophysologiques des expositions à la CCE. Les évolutions scientifiques seront également présentées régulièrement.

Synthèse :

La validation technologique du prototype de chambre Cryantal a permis de réfléchir à d'autres aspects du développement de la chambre de CCE tels que :

- une CCE intelligente ;
- le processus de marquage CE ;
- une CCE connectée et équipée d'accessoires technologiques, sécuritaires et de bien-être ;
- un design revu et adapté au milieu ciblé ;
- une formation complète de cryothérapeute.

DISCUSSION

La seconde partie de la thèse a été axée sur le développement de la nouvelle technologie de chambre de CCE Cryantal grâce aux besoins identifiés dans la première partie. Le processus de développement résulte du fruit de nombreux échanges avec le bureau d'étude. Cette phase a été relativement longue puisque le prototype est apparu avec deux années de retard. Ce laps de temps aura cependant permis d'avancer dans notre réflexion et aura servi à sortir un premier prototype relativement pertinent permettant de mieux développer le second.

En effet, nous avons su répondre à la demande du marché en enlevant le frein sécuritaire que représentait l'utilisation de l'azote et les freins économiques occasionnés par l'alimentation des technologies existantes. Dans ce contexte, la CCE va ainsi pouvoir être accessible pour un plus grand public et permettre l'accroissement du nombre d'exploitants. De plus, la déclinaison possible de cette chambre en CCE mobile grâce à sa petite taille et à sa facilité de branchement permettra son développement sur le terrain. Cette CCE Cryantal est la première chambre mobile dans le monde. Ceci est une avancée de taille car il a été démontré que les effets des cabines de CCP, jusqu'à présent les seules à être mobiles, ne sont pas toujours aussi importants que ceux démontrés avec des chambres de CCE (Hausswirth et al., 2013b). Cette mobilité pourra contribuer au développement de la CCE dans le milieu sportif mais également dans les traitements pathologiques. Il sera ainsi possible de mettre en place des CCE itinérantes pour venir répondre directement aux besoins des patients, comme ce qui est fait actuellement sur les épreuves sportives pour la récupération. Cette technologie pourra également permettre l'accroissement des connaissances scientifiques liées à la CCE car les chambres pourront être disposées directement à proximité des laboratoires de recherche. Tous ces aspects vont contribuer à moyen terme à démocratiser la CCE.

L'étude des effets de la nouvelle chambre de CCE sur la température cutanée a prouvé sa capacité de refroidissement. Ce résultat est important dans la validation de la nouvelle technologie mise en œuvre.

La mesure de la température d'exposition à l'intérieur du prototype a montré toute l'attention qu'il convient de porter aux températures d'expositions annoncées. Une méthodologie de mesure des températures réelles devrait être mise au point afin de mesurer de la même manière les températures d'exposition à l'intérieur de toutes les technologies existantes.

Le travail effectué avec le prototype depuis sa réception en décembre 2014 aura enfin permis de mettre en avant les évolutions à apporter au modèle de la chambre qui va succéder au

prototype et qui sera commercialisable sous peu de temps. Elle devra être plus complète en termes de ventilation, munie d'outils de mesure technologique à des fins sécuritaire et faire preuve d'un joli design. Le prototype aura enfin aidé à entrevoir des perspectives technologiques et des perspectives de travail.

CONCLUSION GENERALE

Le travail réalisé au cours de la thèse avait pour objectifs 1) d'identifier les besoins méthodologiques et technologiques de la CCE, 2) de développer un nouveau prototype de chambre de CCE à partir des besoins identifiés, 3) de valider le prototype en vue de son industrialisation et 4) de faire évoluer le prototype vers une version de chambre de CCE commercialisable. Il a été réalisé en deux parties complémentaires.

La première partie a été axée sur l'approfondissement des connaissances liées aux méthodologies et aux technologies de CCE et de CCP existantes. Deux études de terrain réalisées en situation de compétition sportive et une revue de littérature composent cette partie.

Les études réalisées sur le terrain ont montré que :

- les expositions de CCP réalisées lors des compétitions n'étaient pas trop contraignantes pour les athlètes. Cela suggère que la CCP n'est en rien nuisible à leurs performances ;
- les athlètes ressentaient un sommeil de meilleure qualité lors des nuits consécutives aux expositions à la CCP ;
- des différences interindividuelles existaient chez les femmes dans les sensations thermiques ressenties en fonction de l'indice de masse corporelle ;
- les conditions environnementales (température et hygrométrie) pouvaient influencer sur les sensations thermiques des athlètes.

La revue de littérature effectuée au cours de la première partie a permis d'établir un premier référentiel international des technologies et des méthodologies de CCE et de CCP existantes.

Elle rapporte les éléments d'information suivants :

- les effets induits par la CCE et la CCP sur la température cutanée des individus exposés en fonction de la technologie utilisée ;
- les protocoles d'exposition validés actuellement à réaliser en fonction des effets recherchés (soulagement des pathologies traumatiques, rhumatismales ou récupération sportive) chez plusieurs populations d'individus (patients atteints de diverses pathologies et sportifs de tous niveaux) ;
- le manque d'informations concernant les températures réelles d'expositions à l'intérieur des technologies existantes ;
- le besoin d'individualiser les protocoles de traitement en fonction des caractéristiques des individus (morphologie, sexe, âge, ...) et des besoins recherchés (soulagement des pathologies traumatiques, rhumatismales ou récupération sportive) ;

- les problèmes sécuritaires et économiques liés aux méthodes de fabrication du froid dans les technologies existantes.

La première partie de la thèse a ainsi posé le cadre de développement de la nouvelle technologie de chambre de CCE Cryantal. Les besoins technologiques et méthodologiques identifiés à travers les études de terrains et les études bibliographiques ont permis de définir un axe de développement technologique pertinent et objectif. Ce travail d'approfondissement des connaissances a été une partie indispensable dans l'évolution de la société Cryantal et de son objectif d'élaboration d'une nouvelle technologie de CCE.

La seconde partie de la thèse a été consacrée à l'élaboration du développement de la nouvelle technologie de chambre de CCE Cryantal. L'objectif a été de développer un prototype innovant et de le faire évoluer vers une version de chambre commercialisable.

A partir des besoins identifiés dans la première partie de la thèse, une nouvelle technologie de chambre de CCE basée sur la convection forcée a été imaginée, donnant naissance à un premier prototype. Les caractéristiques principales de cette nouvelle technologie sont :

- l'utilisation de la convection forcée par l'induction d'une ventilation à l'intérieur de la chambre principale ;
- l'affranchissement de l'utilisation de l'azote ;
- une consommation électrique faible (3000 W) ;
- la possibilité d'une déclinaison en version mobile ;
- le raccordement facile à une source d'énergie ;
- un contrôle de l'hygrométrie à l'intérieur de la chambre pour la rendre plus agréable et limiter la formation de givre.

Une étude de validation technologique du prototype a ensuite été réalisée. Elle a permis de montrer que :

- une exposition de 3 minutes à -40 °C dans le prototype Cryantal induit les mêmes effets sur la diminution de la température cutanée que des expositions de 3 minutes entre -60 °C et -160 °C dans des technologies de CCE et de CCP existantes ;
- la température d'exposition à l'intérieur du sas et de la chambre principale est relativement homogène entre le haut et le bas des chambres (respectivement 1,7 % et 1,8 %) ;

- les températures d'expositions mesurées à l'intérieur de la chambre principale vide et avec un individu à l'intérieur varient moins que dans une cabine de CCP (respectivement -19 % et -77 %) ;
- la continuité de la ventilation permet un refroidissement homogène durant toute la séance par rapport à un cryosauna qui pulvérise de l'azote à l'intérieur de la cabine par intermittence ;
- la ventilation unilatérale employée mérite d'être développée en ventilation bilatérale, afin de refroidir en même temps les deux côtés du corps.

La nouvelle technologie développée par Cryantal répond donc aux objectifs fixés dans le cahier des charges que nous avons établi. La convection forcée permet d'induire des effets similaires aux effets induits par les autres technologies sur la variation de la température cutanée des individus avec une température d'exposition moins froide. Les contraintes liées à la création du froid sont ainsi diminuées.

L'affranchissement de l'utilisation de l'azote est la contrainte majeure qui a été levée par Cryantal. Les technologies qui nécessitent l'utilisation de ce gaz risquent d'être prochainement interdites à l'exploitation en raison des problèmes de sécurité liés à l'azote. Un récent décès qui a eu lieu à l'intérieur d'une cabine de CCP aux Etats-Unis en est l'exemple. Les choix effectués par Cryantal dans le développement d'une technologie sans azote et peu énergivore sont donc garants de la prospérité de son activité de fabricant et de vendeur de chambre de CCE.

Il est également important de noter que la technologie sans azote permet de diminuer de manière drastique les coûts d'exploitation. Cela va rendre la CCE plus attractive. Dans ce sens, davantage de centres devraient voir le jour à moyen terme. Le coût des séances va aussi diminuer. Cela permettra l'accès de la CCE à un public plus large. L'affranchissement de l'azote qui représentait un enjeu sécuritaire et économique capital dans le projet Cryantal autorise aujourd'hui le développement de nouvelles cabines et méthodologies associées.

La faible consommation électrique de la chambre permet également de lever l'important frein économique lié aux coûts d'exploitation. De plus, le gain de place occasionné par la taille moins importante des moteurs rend la nouvelle chambre de CCE déclinable en version mobile et adaptable dans des cabinets ou centres de petites tailles.

La nouvelle technologie de chambre de CCE Cryantal peut donc prétendre contribuer à la démocratisation de la CCE en augmentant de manière importante l'accès à cette pratique.

La seconde partie de la thèse a enfin permis de faire évoluer le prototype vers une version de chambre de CCE commercialisable. Cette nouvelle version prend en compte une des limites importante relevée dans l'étude de validation technologique concernant la ventilation unilatérale. En effet, elle est dotée d'une intelligence capable de déterminer les protocoles de traitement en fonction des individus à traiter. De plus, elle est en cours de certification pour la conformité européenne en tant que dispositif médical de type IIb.

Ce travail de thèse aura permis de développer une nouvelle technologie innovante de chambre de CCE, de la conception à la commercialisation.

Fort de cette expérience, l'objectif de la société Cryantal est de continuer la recherche sur les effets de la CCE sur l'Homme afin d'optimiser les protocoles de traitement et les technologies de CCE. Dans ce but, des collaborations avec des spécialistes issus des milieux universitaires, sportifs et industriels sont actuellement en cours et d'autres seront développées dans le futur.

BIBLIOGRAPHIE

- Abaidia, A.E., Lamblin, J., Delecroix, B., Leduc, C., McCall, A., Nedelec, M., Dawson, B., Baquet, G., Dupont, G., 2016. Recovery From Exercise-Induced Muscle Damage: Cold Water Immersion Versus Whole Body Cryotherapy. *International journal of sports physiology and performance*, 1-23.
- Algaflly, A.A., George, K.P., 2007. The effect of cryotherapy on nerve conduction velocity, pain threshold and pain tolerance. *Br J Sports Med* 41, 365-369; discussion 369.
- Ascensao, A., Leite, M., Rebelo, A.N., Magalhaes, S., Magalhaes, J., 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.
- Banfi, C., Melegati, G., Barassi, A., Dogliotti, G., Melzi d'Eril, G., Dugue, B., Corsi, M., 2009a. Effects of whole-body cryotherapy on serum mediators of inflammation and serum muscle enzymes in athletes. *Journal of Thermal Biology* 34, 55-59.
- Banfi, G., Lombardi, G., Colombini, A., Melegati, G., 2010. Whole-body cryotherapy in athletes. *Sports Med* 40, 509-517.
- Banfi, G., Melegati, G., Barassi, A., d'Eril, G.M., 2009b. Effects of the whole-body cryotherapy on NTproBNP, hsCRP and troponin I in athletes. *Journal of science and medicine in sport / Sports Medicine Australia* 12, 609-610.
- Banfi, G., Melegati, G., Barassi, A., Eril, G.M., 2009c. Beneficial effects of the whole-body cryotherapy on sport haemolysis. *Journal of Human Sport and Exercise* 4.
- Bastos, F.N., Vanderlei, L.C., Nakamura, F.Y., Bertollo, M., Godoy, M.F., Hoshi, R.A., Junior, J.N., Pastre, C.M., 2012. Effects of cold water immersion and active recovery on post-exercise heart rate variability. *International journal of sports medicine* 33, 873-879.
- Bieuzen, F., Louis, J., Hausswirth, C., 2015. Cryothérapie corps entier et exercice. *Science & Sports* 30, 113-118.
- Bouzigon, R., Grappe, F., Ravier, G., Dugue, B., 2016. Whole- and partial-body cryostimulation/cryotherapy: Current technologies and practical applications. *Journal of Thermal Biology* 61, 67-81.

- Bouzigon, R., Ravier, G., Dugue, B., Grappe, F., 2014. The use of whole-body cryostimulation to improve the quality of sleep in athletes during high level standard competitions. *British journal of sports medicine* 48, 572.
- Bugaj, R., 1975. The cooling, analgesic, and rewarming effects of ice massage on localized skin. *Physical therapy* 55, 11-19.
- Charkoudian, N., 2003. Skin Blood Flow in Adult Human Thermoregulation: How It Works, When It Does Not, and Why. *Mayo Clinic Proceedings* 78, 603-612.
- Chesterton, L.S., Foster, N.E., Ross, L., 2002. Skin temperature response to cryotherapy. *Archives of physical medicine and rehabilitation* 83, 543-549.
- Costello, J.T., 2013. What do we know about recovery interventions used in the management of delayed-onset muscle soreness? *OA Sports Medicine* 1, 17.
- Costello, J.T., Culligan, K., Selfe, J., Donnelly, A.E., 2012. Muscle, Skin and Core Temperature after -110°C Cold Air and 8°C Water Treatment. *PloS one* 7, e48190.
- Dugue, B., Leppanen, E., 2000. Adaptation related to cytokines in man: effects of regular swimming in ice-cold water. *Clinical Physiology* 20, 114-121.
- Dugue, B., Smolander, J., Westerlund, T., Oksa, J., Nieminen, R., Moilanen, E., Mikkelsen, M., 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.
- Dybek, T., Szygula, R., klimek, A., Tubek, S., 2012. Impact of 10 sessions of whole body cryostimulation on aerobic and anaerobic capacity and on selected blood count parameters. *Biology of Sport* 23, 39-43.
- Engel, P., Fricke, R., Taghawinejad, M., Hildebrandt, G., 1989. Ganzkörperkaltebehandlung bei Patienten mit chronischer Polyarthrititis. *Phys Med Baln Med Klim* 18, 37-43.
- Ferreira-Junior, J.B., Bottaro, M., Vieira, A., Siqueira, A.F., Vieira, C.A., Durigan, J.L., Cadore, E.L., Coelho, L.G., Simoes, H.G., Bembem, M.G., 2014a. One session of partial-body cryotherapy (-110 degrees C) improves muscle damage recovery. *Scandinavian journal of medicine & science in sports*, 524-530.

Ferreira-Junior, J.B., Bottaro, M., Vieira, C.A., Soares, S.R., Vieira, A., Cleto, V.A., Cadore, E.L., Coelho, D.B., Simoes, H.G., Brown, L.E., 2014b. Effects of Partial-body Cryotherapy (-110 degrees C) on Muscle Recovery between High-intensity Exercise Bouts. *International journal of sports medicine* 35, 1155-1160.

Filaire, E., Sagnol, M., Ferrand, C., Maso, F., Lac, G., 2001. Psychophysiological stress in judo athletes during competitions. *The Journal of sports medicine and physical fitness* 41, 263-268.

Fonda, B., Sarabon, N., 2013. Effects of whole-body cryotherapy on recovery after hamstring damaging exercise: A crossover study. *Scandinavian journal of medicine & science in sports*, 270-278.

Fricke, R., 1989. Ganzkörperkältetherapie in einer Kältekammer mit Temperaturen um -110°C. *Zeitschrift für physikalische Medizin, Balneologie, medizinische Klimatologie* 18, 1-10.

Hauswirth, C., Louis, J., Aubry, A., Bonnet, G., Duffield, R., Le Meur, Y., 2013a. Evidence of Disturbed Sleep and Increased Illness in Overreached Endurance Athletes. *Medicine and science in sports and exercise*.

Hauswirth, C., Louis, J., Bieuzen, F., Pournot, H., Fournier, J., Filliard, J.R., Brisswalter, J., 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.

Hauswirth, C., Schaal, K., Le Meur, Y., Bieuzen, F., Filliard, J.R., Volondat, M., Louis, J., 2013b. Parasympathetic activity and blood catecholamine responses following a single partial-body cryostimulation and a whole-body cryostimulation. *PloS one* 8, e72658.

Herrera, E., Sandoval, M.C., Camargo, D.M., Salvini, T.F., 2010. Motor and sensory nerve conduction are affected differently by ice pack, ice massage, and cold water immersion. *Physical therapy* 90, 581-591.

Herrera, E., Sandoval, M.C., Camargo, D.M., Salvini, T.F., 2011. Effect of walking and resting after three cryotherapy modalities on the recovery of sensory and motor nerve conduction velocity in healthy subjects. *Rev Bras Fisioter* 15, 233-240.

Hirvonen, H.E., Mikkelsen, M.K., Kautiainen, H., Pohjolainen, T.H., Leirisalo-Repo, M., 2006. Effectiveness of different cryotherapies on pain and disease activity in active rheumatoid

arthritis. A randomised single blinded controlled trial. *Clinical and experimental rheumatology* 24, 295-301.

Huttunen, P., Rintamaki, H., Hirvonen, J., 2001. Effect of regular winter swimming on the activity of the sympathoadrenal system before and after a single cold water immersion. *International journal of circumpolar health* 60, 400-406.

Jastrzabek, R., Straburzynska-Lupa, A., Rutkowski, R., Romanowski, W., 2013. Effects of different local cryotherapies on systemic levels of TNF-alpha, IL-6, and clinical parameters in active rheumatoid arthritis. *Rheumatology international* 33, 2053-2060.

Klimek, A.T., Lubkowska, A., Szygula, Z., Chudecka, M., Fraczek, B., 2010. Influence of the ten sessions of the whole body cryostimulation on aerobic and anaerobic capacity. *International journal of occupational medicine and environmental health* 23, 181-189.

Klimek, A.T., Lubkowska, A., Szygula, Z., Fraczek, B., Chudecka, M., 2011. The influence of single whole body cryostimulation treatment on the dynamics and the level of maximal anaerobic power. *International journal of occupational medicine and environmental health* 24, 184-191.

Kunesch, E., Schmidt, R., Nordin, M., Wallin, U., Hagbarth, K.E., 1987. Peripheral neural correlates of cutaneous anaesthesia induced by skin cooling in man. *Acta physiologica Scandinavica* 129, 247-257.

LeBlanc, J., Blais, B., Barabe, B., Cote, J., 1976. Effects of temperature and wind on facial temperature, heart rate, and sensation. *J Appl Physiol* 40, 127-131.

Leppaluoto, J., Westerlund, T., Huttunen, P., Oksa, J., Smolander, J., Dugue, B., Mikkelsen, M., 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.

Lubkowska, A., Chudecka, M., Klimek, A., Szygula, Z., Fraczek, B., 2008. Acute effect of a single whole body cryostimulation on prooxidant- antioxidant balance in blood of healthy, young men. *Journal of Thermal Biology* 33, 464-467.

Lubkowska, A., Dołęgowska, B., Szyguła, Z., 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, A., Szyguła, Z., 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, A., Szyguła, Z., Chlubek, D., Banfi, G., 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.

Lubkowska, A., Szyguła, Z., Klimek, A.J., Torii, M., 2010. Do sessions of cryostimulation have influence on white blood cell count, level of IL6 and total oxidative and antioxidative status in healthy men? *European journal of applied physiology* 109, 67-72.

Lundgren, P., Henriksson, O., Kuklane, K., Holmer, I., Naredi, P., Bjornstig, U., 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, 287-291.

McMeeken, J., Lewis, M.M., Cocks, S., 1984. Effects of Cooling with Simulated Ice on Skin Temperature and Nerve Conduction Velocity. *Australian Journal of Physiotherapy* 30, 111-114.

Miller, E., Kotska, J., Włodarczyk, T., Dugue, B., 2016. Whole body cryostimulation provides benefits for fatigue and functional status in multiple sclerosis patients. *Acta neurologica Scandinavica*, In Press. DOI: 10.1111/ane.12557.

Miller, E., Markiewicz, L., Saluk, J., Majsterek, I., 2012. Effect of short-term cryostimulation on antioxidative status and its clinical applications in humans. *European journal of applied physiology* 112, 1645-1652.

Miller, E., Mrowicka, M., Malinowska, K., Kedziora, J., Majsterek, I., 2011a. [The effects of whole-body cryotherapy and melatonin supplementation on total antioxidative status and some

antioxidative enzymes in multiple sclerosis patients]. *Polski merkuriusz lekarski : organ Polskiego Towarzystwa Lekarskiego* 31, 150-153.

Miller, E., Mrowicka, M., Malinowska, K., Mrowicki, J., Saluk-Juszczak, J., Kedziora, J., 2011b. Effects of whole-body cryotherapy on a total antioxidative status and activities of antioxidative enzymes in blood of depressive multiple sclerosis patients. *The world journal of biological psychiatry : the official journal of the World Federation of Societies of Biological Psychiatry* 12, 223-227.

Nemet, D., Meckel, Y., Bar-Sela, S., Zaldivar, F., Cooper, D.M., Eliakim, A., 2009. Effect of local cold-pack application on systemic anabolic and inflammatory response to sprint-interval training: a prospective comparative trial. *European journal of applied physiology* 107, 411-417.

Nieman, D.C., 1994. Exercise, upper respiratory tract infection, and the immune system. *Medicine and science in sports and exercise* 26, 128-139.

Osczevski, R., Bluestein, M., 2005. The new wind chill equivalent temperature chart. *Bulletin of the American Meteorological Society* 86, 1453-1458.

Osczevski, R.J., 1995. The Basis of Wind Chill. *ARCTIC*; Vol 48, No 4 (1995): December: 313-405 DO - 10.14430/arctic1262.

Pournot, H., Bieuzen, F., Duffield, R., Lepretre, P.M., Cozzolino, C., Hausswirth, C., 2011a. Short term effects of various water immersions on recovery from exhaustive intermittent exercise. *European journal of applied physiology* 111, 1287-1295.

Pournot, H., Bieuzen, F., Louis, J., Mounier, R., Fillard, J.R., Barbiche, E., Hausswirth, C., 2011b. Time-course of changes in inflammatory response after whole-body cryotherapy multi exposures following severe exercise. *PloS one* 6, e22748.

Reilly, T., Edwards, B., 2007. Altered sleep-wake cycles and physical performance in athletes. *Physiology & behavior* 90, 274-284.

Rymaszewska, J., Ramsey, D., 2008. Whole body cryotherapy as a novel adjuvant therapy for depression and anxiety. *Archives of Psychiatry and Psychotherapy* 2, 49-57.

- Rymaszewska, J., Ramsey, D., Chludzinska-Kiejna, S., 2008. whole-body cryotherapy as adjunct treatment of depressive and anxiety disorders. *Archivum Immunologiae et Therapia Experimentalis* 56, 63-68.
- Saeki, Y., 2002. Effect of local application of cold or heat for relief of pricking pain. *Nursing & health sciences* 4, 97-105.
- Samuels, C., 2008. Sleep, recovery, and performance: the new frontier in high-performance athletics. *Neurologic clinics* 26, 169-180.
- Schaal, K., Le Meur, Y., Bieuzen, F., Petit, O., Hellard, P., Toussaint, J.F., Hausswirth, C., 2013. Effect of recovery mode on postexercise vagal reactivation in elite synchronized swimmers. *Applied physiology, nutrition, and metabolism* 38, 126-133.
- Schaal, K., Le Meur, Y., Louis, J., Filliard, J.R., Hellard, P., Casazza, G., Hausswirth, C., 2014. Whole-Body Cryostimulation Limits Overreaching in Elite Synchronized Swimmers. *Medicine and science in sports and exercise*, 1416-1425.
- Schlichting, H., 1968. *Boundary-layer theory*. McGraw-Hill.
- Siple, P.A., Passel, C.F., 1999. Excerpts from: measurements of dry atmospheric cooling in subfreezing temperatures. 1945. *Wilderness & environmental medicine* 10, 176-182.
- Smolander, J., Mikkelsen, M., Oksa, J., Westerlund, T., Leppaluoto, J., Huttunen, P., 2004. Thermal sensation and comfort in women exposed repeatedly to whole-body cryotherapy and winter swimming in ice-cold water. *Physiology & behavior* 82, 691-695.
- Smolander, J., Westerlund, T., Uusitalo, A., Dugue, B., Oksa, J., Mikkelsen, M., 2006. Lung function after acute and repeated exposures to extremely cold air (-110 degrees C) during whole-body cryotherapy. *Clinical physiology and functional imaging* 26, 232-234.
- Spiegel, R., 1982. *sleep and sleeplessness in advanced age (advances in sleep research, vol 5)*. Wiley Subscription Services, Inc., A Wiley Company.
- Szczepanska-Gieracha, J., Borsuk, P., Pawik, M., Rymaszewska, J., 2013. Mental state and quality of life after 10 sessions whole-body cryotherapy. *Psychology, health & medicine* 19, 40-46.

Vieira, A., Bottaro, M., Ferreira-Junior, J.B., Vieira, C., Cleto, V.A., Cadore, E.L., Simoes, H.G., Carmo, J.D., Brown, L.E., 2015. Does whole-body cryotherapy improve vertical jump recovery following a high-intensity exercise bout? *Open Access J Sports Med* 6, 49-54.

Westerlund, T., Oksa, J., Smolander, J., Mikkelsen, M., 2009. Neuromuscular adaptation after repeated WBC (-110°). *Journal of Thermal Biology* 34, 226-231.

Wozniak, A., Mila-Kierzenkowska, C., Szpinda, M., Chwalbinska-Moneta, J., Augustynska, B., Jurecka, A., 2013. Whole-body cryostimulation and oxidative stress in rowers: the preliminary results. *Archives of medical science : AMS* 9, 303-308.

Wozniak, A., Wozniak, B., Drewa, G., Mila-Kierzenkowska, C., 2007a. The effect of whole-body cryostimulation on the prooxidant-antioxidant balance in blood of elite kayakers after training. *European journal of applied physiology* 101, 533-537.

Wozniak, A., Wozniak, B., Drewa, G., Mila-Kierzenkowska, C., Rakowski, A., 2007b. The effect of whole-body cryostimulation on lysosomal enzyme activity in kayakers during training. *European journal of applied physiology* 100, 137-142.

Yamauchi, T., 1988. Whole-body cryotherapy is a method of extreme cold (-175°C) treatment initially used for rheumatoid arthritis. *Zeitschrift für physikalische Medizin, Balneologie, medizinische Klimatologie* 15, 311.

Zachariassen, K.E., 1991. Hypothermia and cellular physiology. *Arctic medical research* 50 Suppl 6, 13-17.

Zagobelny, Z., Halawa, B., Negrusz-Kawecka, M., Spring, A., Gregorowicz, H., Wawrowska, A., Rozwadowski, G., 1992. [Hormonal and hemodynamic changes caused by whole body cooling in patients with rheumatoid arthritis]. *Polskie Archiwum Medycyny Wewnetrznej* 87, 34-40.

ANNEXES

Les trois premières annexes de ce document font références à des travaux en cours d'élaboration indispensables au développement de la version finale de la chambre de CCE qui sera commercialisée. Les annexes 4 à 6 rapportent des communications orales présentées lors de deux séminaires nationaux et un séminaire international. L'annexe 7 représente un dossier de proposition de prestation envoyée aux équipes sportives professionnelles.

1. Dossier de demande de devis réalisé avec le service d'activités industrielles et commerciales de l'Université de Franche-Comté.

L'objectif de cette demande est de planifier une collaboration avec l'Université de Franche-Comté, et notamment l'UPFR Sports, pour mettre en place des études sur les effets de la CCE en fonction des caractéristiques morphologiques de plusieurs populations d'individus.



PROJET INNOVANT CRYANTAL DEVELOPPEMENT

1. Présentation de l'entreprise Cryantal Développement

Cryantal est une société française (SARL) créée en mai 2011 et basée à LOGNES (77) près de MARNE LA VALLEE. Elle est dirigée par **Samuel QUENIART**.

Cette entreprise innovante contribue à la conception, à la promotion et à l'exploitation de chambres cryogéniques « fixes ou mobiles ».

Ces chambres sont destinées au milieu médical, sportif et au centre de bien être. Elles seront pourvues du CE Médical.

Dans le cas des chambres mobiles, elles pourront être déplacées vers des centres sportifs, mais aussi sur des épreuves sportives à la disposition des équipes sportives professionnelles partenaires (exemple de l'équipe sportive professionnelle FDJ sur le Tour de France).

Les objectifs visés de la société CRYANTAL sont :

- de proposer des prestations de Cryothérapie Corps Entier (CCE) sécurisées et tracées dans des centres dédiés, propriétaires et/ou franchisés,
- d'optimiser et développer la récupération du sportif à partir de la CCE pour une diffusion la plus large possible de cette technologie dans le traitement de la douleur, dans la récupération sportive et dans le bien-être.
- De mettre en place des protocoles d'exposition adaptés en fonction de chaque besoin et des spécificités morphologiques et anthropométriques de chaque personne.

Ces projets s'appuient sur un réseau de compétences techniques, technologiques, scientifiques et industrielles.

C'est dans ce but que depuis octobre 2012, Romain BOUZIGON a intégré l'équipe CRYANTAL grâce à un dispositif doctorat-CIFRE.

2. La Cryothérapie corps entier

La CCE est un système de refroidissement corporel complet par exposition du sujet pendant quelques minutes (2 à 3 min) à un froid sec (-110 à -170°C). Cette technique fut mentionnée pour la première fois en 1979 lors du congrès européen de rhumatologie à Wiesbaden par le professeur Japonais Yamauchi et développée en Europe par les professeurs Fricke en Allemagne et Zagrobelny en Pologne.

Au départ, les traitements à base de CCE étaient plus particulièrement indiqués pour soigner les douleurs dues aux rhumatismes et à l'arthrite. Son utilisation s'est généralisée en Ukraine, Russie, Autriche, Finlande et en République Tchèque. La France s'est initiée à cette technique plus tard dans les années 2000. Lors de ces dix dernières années, l'application de la CCE s'est étendue à d'autres domaines comme la récupération sportive et le bien-être. L'hypothèse principale de la CCE est de stimuler les adaptations de lutte contre le froid qui provoquent des effets positifs sur l'organisme.

Projet confidentiel



3. Présentation du projet de développement technologique Cryantal Développement

Cryantal Développement a pour projet de développer une technologie de CCE intelligente.

Actuellement, les protocoles d'exposition à la CCE sont similaires pour quasiment tous les publics et pour tous les effets recherchés. Le but de cette innovation est d'optimiser les effets de la CCE en proposant des protocoles d'exposition adaptés aux différentes caractéristiques morphologiques des patients et en fonction de leur besoin (effet analgésique, bien-être, récupération, ...).

Nous voulons développer un boîtier intelligent qui permettrait, une fois les caractéristiques morphologiques et les besoins spécifiques des patients rentrés, de donner automatiquement le protocole de séance à réaliser (durée, température, nombre d'exposition, ...).

Ce travail s'inscrirait sur plusieurs années et les boîtiers seraient régulièrement mis à jour pour affiner les protocoles au fur et à mesure des évolutions de l'état de l'art et de nos études en interne via une plateforme internet.

Ce boîtier fera l'objet d'un brevet technologique. Les résultats des études que nous mettrons en place pour son développement devront donc être confidentiels afin de ne pas nuire à la validité de celui-ci.

4. Projet collaboration Cryantal Développement – Laboratoires universitaires

Pour répondre à ce projet, Cryantal Développement est désireuse de développer des collaborations universitaires.

Le département R&D de Cryantal Développement veut mettre en place deux sous départements. Un sous département recherche interne qui sera là pour développer le boîtier intelligent et les prochaines innovations Cryantal (études confidentielles) ; et un sous département recherche externe qui sera tournée vers les recherches sur les effets de la CCE et qui donnera suite à des publications dans des revues scientifiques internationales. C'est dans cette optique que la collaboration universitaire sera développée.

En outre ces projets à long terme permettraient d'accueillir des étudiants CIFRE issues de laboratoires universitaires. Ces mêmes laboratoires auront également un accès à la CCE pour mettre en place leurs propres études.

5. Travaux scientifiques à mettre en place pour répondre au projet

D'après la littérature scientifique, les variables à étudier pour déterminer les protocoles de CCE en fonction du besoin des patients seraient (liste non exhaustive) :

a) Soulagement de la douleur

- Température cutanée (imagerie thermique)
- Seuils d'apparition et de tolérance à la douleur (algomètre de pression)
- Sensations perceptives (échelles perceptives et questionnaires)
- Syndrome inflammatoire et activité du système immunitaire (prélèvements sanguins et urinaires)
- Sommeil (actimétrie, échelles perceptives et questionnaires)

Projet confidentiel



- Intensité du signal nerveux (EMG ?)

b) Bien-être / Dépression / Anxiété / Humeur

- Sensations perceptives (échelles perceptives et questionnaires)
- Concentrations hormonales, stress oxydatif (prélèvements sanguins et urinaires)
- Sommeil (actimétrie, échelles perceptives et questionnaires)
- Oxygénation tissulaire cérébrale ? (NIRS)

c) Récupération sportive

- Température cutanée, centrale, gastro-intestinale (imagerie thermique, gelules à ingérer, ...)
- Syndrome inflammatoire, lésions musculaires, stress oxydatif, concentrations hormonales (prélèvements sanguins et urinaires)
- Fréquence et variabilité de la fréquence cardiaque (ECG)
- Activité électromyographique musculaire (EMG)
- Oxygénation tissulaire (NIRS, échographie)
- Seuils d'apparition et de tolérance à la douleur (algomètre de pression)
- Sensations perceptives (échelles perceptives et questionnaires)
- Sommeil (actimétrie, échelles perceptives et questionnaires)
- Performances (force, puissance, explosivité, ...)

Les études à mettre en place pour ce projet sont nombreuses et devront être menées avec la plus grande rigueur scientifique possible.

6. Décomposition du projet

Le projet serait initialement composé de dix études. Ces études devront être répétées à trois reprises pour comparer les populations en fonction du genre, de la masse volumique/pourcentage de masse grasse, et de l'âge.

Les tableaux ci-dessous représentent les études prévues. Les protocoles seront approfondis par la suite.

a) Soulagement de la douleur

Etude 1	Effets de la CCE sur la température cutanée, les seuils d'apparitions et de tolérance à la douleur et les sensations perceptives
Matériel	Caméra thermique, algomètre de pression, échelles et questionnaires perceptifs

Etude 2	Effets de la CCE sur les syndromes inflammatoires et sur les réponses du système immunitaire
Matériel	Caméra thermique, prélèvements sanguins

Etude 3	Effets de la CCE sur la qualité du sommeil (public pathologique)
Matériel	Actimètres, échelles et questionnaires perceptifs

Projet confidentiel



b) Bien-être / Dépression / Anxiété / Humeur

Etude 4	Effets de la CCE sur les sensations perceptives, les concentrations hormonales en endorphine et catécholamines, le stress oxydatif et l'oxygénation tissulaire cérébrale
Matériel	Prélèvements sanguins, recueils urinaires, NIRS, échelles et questionnaires perceptifs

Etude 5	Effets de la CCE sur les syndromes de dépression et d'anxiété
Matériel	Prélèvements sanguins, recueils urinaires, échelles et questionnaires perceptifs

Etude 6	Effets de la CCE sur la qualité du sommeil (public sain)
Matériel	Actimètres, échelles et questionnaires perceptifs

c) Récupération sportive

Etude 7	Effets de la CCE sur la température cutanée, gastro-intestinale, la variabilité et la fréquence cardiaque et les sensations perceptives
Matériel	Caméra thermique, gélules d'enregistrement de la température gastro-intestinale, cardiofréquencemètre, échelles et questionnaires perceptifs

Etude 8	Effets de la CCE les seuils d'apparitions et de tolérance à la douleur, les syndromes inflammatoires, le système oxydatif et les concentrations hormonales en catécholamines
Matériel	Prélèvements sanguins, recueils urinaires

Etude 9	Effets de la CCE sur la performance, l'activité électromyographique musculaire et l'oxygénation tissulaire
Matériel	Tests performance, EMG, NIRS

Etude 10	Etude des effets de la CCE sur la qualité du sommeil (public sportif)
Matériel	Actimètres, échelles et questionnaires perceptifs

7. Implication du laboratoire

Chaque étude va être réalisée sur des publics différents suivant :

- Le sexe
- La masse volumique et le pourcentage de masse grasse
- L'âge

Il y aura donc 30 études à effectuer.

a) Nombre d'heures de travail par étude

Projet confidentiel



Temps de manipulations

Pour les manipulations, il faut compter 1 heure de travail par sujet passé. Il y aura environ 30 sujets par étude, ce qui représente 30 heures de travail par opérateur présent sur l'étude. Pour prendre large il faut compter 35 heures.

Temps de traitement de données

Nous avons estimé 30 heures de traitement de données par personne impliquée et par étude.

Temps de rédaction

La tâche rédaction concerne tout ce qui est rédaction, relecture et correction. 20h sont prévues pour cette tâche par personne impliquée et par étude.

Je me suis donc basé sur 85 heures de travail par étude et par personne impliquée pour l'ensemble des trois tâches.

Temps de travail par personne (h)								
MCF – HDR			MCF			Doctorant		
Manip	Données	Rédaction	Manip	Données	Rédaction	Manip	Données	Rédaction
x	x	x	x	x	x	x	x	x
x			x			x		

b) Coûts horaires

Les coûts horaires liés aux personnels universitaires sont :

- Frédéric GRAPPE : 50€/heure
- Gilles RAMER : 48€/heure
- Doctorant laboratoire : 18€/h

Coûts liés au temps de travail par personne (€)								
MCF – HDR			MCF			Doctorant		
Manip	Données	Rédaction	Manip	Données	Rédaction	Manip	Données	Rédaction
x	x	x	x	x	x	x	x	x
x			x			x		

8. Frais de déplacements et d'hébergements

Les frais de déplacement ont été calculés avec les tarifs SNCF, soit 100€ en moyenne par aller.

Pour les frais d'hébergements, le tarif prévu par l'Université par nuit est de 90€ sur Paris et ses environs.

Pour les repas, le tarif prévu par l'Université est de 15,25€ par repas.

Nous avons estimé 10 jours de travail par étude pour les manipulations. Les tarifs calculés pour les missions sont sur le document Excel joint.

Projet confidentiel

2. Liste et suivi des documents du système qualité.

Ce document représente une partie du travail effectué pour le dossier de CE Médicale. Elle liste l'ensemble des procédures à suivre pour les tâches administratives de la société.

Chapitre Norme NF EN ISO 13 485		Liste et suivi des documents du système qualité Rev00																		
FD 4.2-01-01		DOCUMENTS DE REFERENCE MQ ET QSP								DOCUMENTS REFERENCE FO										
REF DOC	DESIGNATION MQ ET QSP	Révision	Révisé	Modifié	Localisation	Points de distribution/diffusion			Proc essus	REF DOC	DESIGNATION FO	Révision	Révisé	Modifié	Localisation	Points de distribution/diffusion			Proc essus	
						Classeu	Informatique	Autres								Classeurs	Informatique	Autres		
MQ01-12-2013	Manuel Qualité	00			Service Qualité classeur Rouge	R1	Fichier CE MEDICAL	NA												
QSP 4.2-01	Gestion de la documentation et des enregistrements	00			Service Qualité classeur Rouge	R1	Fichier CE MEDICAL/QSP	NA		FD 4.2-01-01	Liste et suivi des docum	00			Service Qualité classeur Blanc	B1	Fichier CE MEDICAL	NA		
										FD 4.2-01-02	Revue du système qualité	00			Service Qualité classeur Blanc	B1	Fichier CE MEDICAL/FO	NA		
										FD 4.2-01-03	Enregistrement de la destruction des documents et	00			Service Qualité classeur Blanc	B1	Fichier CE MEDICAL/FO	NA		
										FD 4.2-01-04	Liste des enregistrement	00			Service Qualité classeur Blanc	B1	Fichier CE MEDICAL/FO	NA		
QSP 4.2-02	Gestion des modifications	00			Service Qualité classeur Rouge Service Qualité classeur Rouge	R1 R1	Fichier CE MEDICAL/QSP Fichier CE MEDICAL/QSP	NA NA		FD 4.2-02-01	Formulaire de demande d	00			Service Qualité classeur Blanc	B1	Fichier CE MEDICAL/FO	NA		
										FD 4.2-02-02	Listing des demandes de modification	00			Service Qualité classeur Blanc	B1	Fichier CE MEDICAL/FO	NA		
QSP 5.6-01	Management du Système Qualité de l'Entreprise	00			Service Qualité classeur Rouge	R1	Fichier CE MEDICAL/QSP	NA		FD 5.6-01-01	Politique Qualité	00			Service Qualité classeur Blanc	B1	Fichier CE MEDICAL/FO	NA		
										FD 5.6-01-02	Cartographie des proces	00			Service Qualité classeur Blanc	B1	Fichier CE MEDICAL/FO	NA		
										FD 5.6-01-03	Carte d'identité Processu	00			Service Qualité classeur Blanc	B1	Fichier CE MEDICAL/FO	NA		
										FD 5.6-01-04	Fiche de synthèse d'un pr	00			Service Qualité classeur Blanc	B1	Fichier CE MEDICAL/FO	NA		
										FD 5.6-01-05	Revue de Direction	00			Service Qualité classeur Blanc	B1	Fichier CE MEDICAL/FO	NA		
										FD 5.6-01-06	Organigramme	00			Service Qualité classeur Blanc	B1	Fichier CE MEDICAL/FO	NA		
QSP 6.2-01	Recrutement et Formation	00			Service Qualité classeur Rouge	R1	Fichier CE MEDICAL/QSP	NA		FD 6.2-01-01	Formation pour les nouv	00			Service Qualité classeur Blanc	B1	Fichier CE MEDICAL/FO	NA		
										FD 6.2-01-02	Matrice de formation	00			Service Qualité classeur Blanc	B1	Fichier CE MEDICAL/FO	NA		
										FD 6.2-01-03	Enregistrement de forma	00			Service Qualité classeur Blanc	B1	Fichier CE MEDICAL/FO	NA		
										FD 6.2-01-04	Description de fonction	00			Service Qualité classeur Blanc	B1	Fichier CE MEDICAL/FO	NA		
QSP-7.2-01	Revue de Contrat	00			Service Qualité classeur Rouge	R1	Fichier CE MEDICAL/QSP	NA		FD TCGV	Termes et Conditions Gé	00			Service Qualité classeur Blanc	B1	Fichier CE MEDICAL/FO	NA		
										FD DPPC	Document papier de prise	00			Service Qualité classeur Blanc	B1	Fichier CE MEDICAL/FO	NA		
QSP 7.3-01	Conception & Développement	00			Service Qualité classeur Rouge	R1	Fichier CE MEDICAL/QSP	NA		FD 7.3-01-01	Plan de développement	00			Service Qualité classeur Blanc	B1	Fichier CE MEDICAL/FO	NA		
										FD 7.3-01-02	Données d'entrée - Don	00			Service Qualité classeur Blanc	B1	Fichier CE MEDICAL/FO	NA		
										FD 7.3-01-03	Revue de Conception	00			Service Qualité classeur Blanc	B1	Fichier CE MEDICAL/FO	NA		
										FD 7.3-01-04	Revue de Conception	00			Service Qualité classeur Blanc	B1	Fichier CE MEDICAL/FO	NA		

QSP 7.3-02	Gestion des risques	00		Service Qualité classeur Rouge	R1	Fichier CE MEDICAL/QSP	NA	FO 7.3-02-01	Rapport de Gestion des Risques	00		Service Qualité classeur Blanc	B1	Fichier CE MEDICAL/FO	JG
QSP-7.4-01	Gestion des Achats	00		Service Qualité classeur Rouge	R1	Fichier CE MEDICAL/QSP	NA	FO 7.4-01-01	Fiche de Spécifications Produits	00		Service Qualité classeur Blanc	B1	Fichier CE MEDICAL/FO	NA
QSP 7.4.02	Sélection, évaluation et suivi des fournisseurs	00		Service Qualité classeur Rouge	R1	Fichier CE MEDICAL/QSP	NA	FO 7.4.02-01	Evaluation initiale fournisseur	00		Service Qualité classeur Blanc	B1	Fichier CE MEDICAL/FO	NA
								FO 7.4.02-02	Enquête qualité fournisseur	00		Service Qualité classeur Blanc	B1	Fichier CE MEDICAL/FO	NA
								FO 7.4.02-03	Evaluation continue du fournisseur	00		Service Qualité classeur Blanc	B1	Fichier CE MEDICAL/FO	NA
								FO 7.4.02-04	Liste des fournisseurs approuvés	00		Service Qualité classeur Blanc	B1	Fichier CE MEDICAL/FO	NA
								FO 7.4.02-05	Accord Qualité AMC Concept Industrie	00		Service Qualité classeur Blanc	B1	Fichier CE MEDICAL/FO	NA
								FO 7.4.02-06	Planning annuel des audits	00		Service Qualité classeur Blanc	B1	Fichier CE MEDICAL/FO	NA
								FO 7.4.02-07	Rapport d'audit fournisseur	00		Service Qualité classeur Blanc	B1	Fichier CE MEDICAL/FO	NA
QSP-7.5-01	Fabrication et Contrôles associés, Livraison et Montage	00		Service Qualité classeur Rouge	R1	Fichier CE MEDICAL/QSP	NA	FO 7.5.01-01	Formulaire de libération	00		Service Qualité classeur Blanc	B1	Fichier CE MEDICAL/FO	NA
QSP 8.2.01	Surveillance Post Marché	00		Service Qualité classeur Rouge	R1	Fichier CE MEDICAL/QSP	NA	FO 8.2.01-01	Fiche de revue post marché	00		Service Qualité classeur Blanc	B1	Fichier CE MEDICAL/FO	NA
QSP 8.2-02	Audit Interne	00		Service Qualité classeur Rouge	R1	Fichier CE MEDICAL/QSP	NA	FO 8.2.2.01-01	Planning annuel des audits internes	00		Service Qualité classeur Blanc	B1	Fichier CE MEDICAL/FO	NA
								FO 8.2.2.01-02	Grille d'audit processus	00		Service Qualité classeur Blanc	B1	Fichier CE MEDICAL/FO	NA
								FO 8.2.2.01-03	Rapport d'Audit Interne	00		Service Qualité classeur Blanc	B1	Fichier CE MEDICAL/FO	NA
QSP 8.3.01	Gestion des non-conformités	00		Service Qualité classeur Rouge	R1	Fichier CE MEDICAL/QSP	NA	FO 8.3.01-01	Liste de suivi des fiches de Non-conformité	00		Service Qualité classeur Blanc	B1	Fichier CE MEDICAL/FO	NA
								FO 8.3.01-02	Fiche de Non-conformité	00		Service Qualité classeur Blanc	B1	Fichier CE MEDICAL/FO	NA
QSP 8.3.02	Réclamations clients et autres demandes clients	00						FO 8.3.02-01	Fiche de réclamation client	00		Service Qualité classeur Blanc	B1	Fichier CE MEDICAL/FO	NA
								FO 8.3.02-02	Fiche de signalement d'un incident ou risque d'incident - Formulaire	00		Service Qualité classeur Blanc	B1	Fichier CE MEDICAL/FO	NA
								FO 8.3.02-03	Liste des réclamations clients	00		Service Qualité classeur Blanc	B1	Fichier CE MEDICAL/FO	NA
QSP 8.3.03	Misconformances, Rappels, Retraits, Fiches d'avertissement	00		Service Qualité classeur Rouge	R1	Fichier CE MEDICAL/QSP	NA	FO 8.3.03-01	MDVR Rapport fabricant	00		Service Qualité classeur Blanc	B1	Fichier CE MEDICAL/FO	NA
								FO 8.3.03-02	Formulaire FSCA (action corrective)	00		Service Qualité classeur Blanc	B1	Fichier CE MEDICAL/FO	NA
QSP 8.5-01	Action Corrective et Préventive	00		Service Qualité classeur Rouge	R1	Fichier CE MEDICAL/QSP	NA	FO 8.5.01-01	Liste de suivi des CAPA	00		Service Qualité classeur Blanc	B1	Fichier CE MEDICAL/FO	NA
								FO 8.5.01-02	Enregistrement des Actions correctives et préventives	00		Service Qualité classeur Blanc	B1	Fichier CE MEDICAL/FO	NA

3. Version en cours d'élaboration du rapport d'évaluation clinique nécessaire à la demande de marquage CE de la chambre.



EVALUATION OF CLINICAL DATA

- The Whole-Body Cryostimulation Chamber -

OBJECTIVE AND PURPOSE

The conformity assessment with the MDD 93/42/CEE and its amended version 2007/47/CE require that a Medical Device (MD) manufacturer demonstrate that the efficacy and safety of his product in normal condition of utilization were fulfilled. In order to demonstrate it, it is necessary to have some clinical data. The annex X of the MDD allows to providing an assessment of data published or not in the clinical experience of this MD or of a similar MD with an equivalence needed to be demonstrated.

This document includes the clinical report of the MD produced by the Cryantal Company: the Whole-Body Cryostimulation Chamber (WBCC) produced by the Cryantal Company. It should further be used by Notified Bodies as part of their Design Dossier review or Type Test certification and any subsequent significant change notifications. It is also aimed at assisting Member States' authorities when verifying that the device meets the essential requirements laid down in Annex X of the MDD during post market surveillance.

The guidance MEDDEV 2.7.1 "Clinical Evaluation: A guide for manufacturers and notified bodies" was used to draft this report. It describes the main requirements for the clinical evaluation of WBCC based on current state-of-the-art and on experience drawn from the most recent reviews of clinical studies. Furthermore, it was performed according to the internal procedure applicable in Cryantal QSP 9.2 Elaboration of a clinical evaluation report. The Cryantal MD is not yet on the market so it was not possible to refer to a post-market monitoring of this chamber in this report but only to be interested in similar MD. An internal procedure was established: QSP 9.1 Post-market surveillance. However, a post-market monitoring according to this procedure will be ensured when the MD will be on the market and last throughout all the MD life. Thus the necessity of future monitoring post market clinical studies will be determined.

The editor of this present report, Romain Bouzigon, was a Ph D. student of the sport Faculty of the University of Besançon (Franche-Comté). He investigates the effects of cold (especially whole-body cryotherapy/cryostimulation (WBC)) on physical recovery after exhausting physical exercise. He received a CIFRE grant from the French Government and his studies are supported by Cryantal SA. He is supervised by Frederic Grappe and Benoit Dugue. Frederic Grappe, PhD, is involved in studying physiological and biomechanical factors that could enhance physical performance in high level cyclists. Benoit Dugue, PhD, has for a long time been investigating physiological adaptations due to strong stimuli and among them adaptations related to cold exposure. The medical referent was the Doctor Jean Denis Rouillon, PhD, MD, (sports medicine) emerita professor, has been investigating physiological adaptations related to health and performance. These three supervisors had proofread this report.



EVALUATION OF THE CLINICAL DATA

The three distinct stages in performing the clinical evaluation were:

- Identification of pertinent standards and clinical data;
- Appraisal of each individual data set, in terms of its relevance, applicability, quality and clinical significance; and
- Analysis of the individual data sets, whereby conclusions are reached about the performance, safety and presentational aspects (labelling, patient information and instructions for use) of the device.

GENERAL INFORMATIONS

The medical device was a Whole Body Cryostimulation/Cryotherapy Chamber. It is produced by the Cryantal Company which is based in Lognes (France). According to the rule 9 of the annex IX of the Directive 93/42/CEE, the Cryantal WBCC was an active therapeutic MD of IIb Class.

The first WBCC appeared in Japan in 1981 when Yamauchi successfully used a WBCC to treat rheumatism. The WBC consists of extreme cold exposure lasting 1 to 4 min in a room with an air temperature of -110°C or less. This technique is used to treat pain and inflammation for subjects with muscle and joint pain (e.g., different types of patients, elderly subjects, and athletes) to prevent injuries, to allow the subjects to recover faster after injuries or surgery, and to improve recovery after exercise. It has been already demonstrated that WBC stimulated physiological reactions of an organism which result in analgesic, anti-swelling, antalgic immune and circulatory system reactions and then could improve recovery after muscle injury from muscular trauma.

DESCRIPTION OF THE DEVICE AND ITS USE CLAIMED

Like other WBC devices used in the studies presented in this report, the Cryantal WBCC is a closed chamber which can attain cryogenic temperature. This MD is composed of two locales: A technical locale which contains the cold mechanism and a greater locale which includes two chambers of exposures. The first room at $-??^{\circ}\text{C}$ is an adaptation vestibule and the second room is the cryogenic chamber which may fall to $-??^{\circ}\text{C}$. A Software allows the control of the temperature. It is placed on the side of the WBCC on a tactile screen. Two doors closed the two exposure chambers but it is possible to open from inside easily if the patient wants to go out. The second chamber is equipped with a camera to have contact with the patient all the time. The temperature drop is done with pulsed cold air. No nitrogen is used in this device compared to some other chambers. This is a positive point in this technology because nitrogen can be hazardous for a patient if they breathe this gas.



The inside of the chamber is lined with a material that does not absorb moisture. The walls do not have any sharp protruding metal parts to avoid contact with the patient, or to cause very unpleasant feelings.

This MD is reusable. It works with electricity to maintain cold temperature. No substances are in contact with the patient and it's a non-invasive method. Any part of the body is in contact with the MD. The only effect of the MD is to cool the patients by creating cold.

Just before entry into the cryochamber, the participants thoroughly dried their bodies to eliminate the sensation of cold. During the procedure, the subjects will be dressed only in shorts, socks, gloves and a hat covering the auricles against frostbite. They will also wear clogs. In order to protect the upper airways, noses and mouths will be secured with a surgical mask. Exposures last between 1 to 3-min in function of the necessity but patients can go out when they want.

THERAPEUTIC INDICATIONS AND/OR DIAGNOSTIC PERFORMANCE

The Cryantal MD was created to answer at two goals:

- In medical domain, it will be used to treat some pathology like rheumatoid arthritis, ankylosing spondylitis and multiple sclerosis,
- In sport domain, it will be used to enhance recovery after exercise in athletes.

Patients who are eligible for treatment in a cryogenic chamber must undergo medical examination prior to treatment. An interview will be carried out with each patient in order to detect any contraindications to cryostimulation, including questions relating to cold tolerance of the body. In all of the candidates for cryostimulation, blood pressure and heart rate will be measured. In practice, WBC is not permitted for patients with cardiac disease or unstable blood pressure. Bathing before cryostimulation is not recommended, and prior to entering the cryogenic chamber the patient should be wiped completely with a towel to remove sweat – drops of sweat left on the skin could turn into ice crystals, which causes a painful and unpleasant sensation of cold. Additionally, all the patients are informed of the necessity of slow and shallow breathing while in the cryochamber.

Indication and contraindication for WBC

In the domain of sport, Professional athletes and healthy patients use WBC for athletic recovery associated with a desirable effect for defensive and protective mechanisms in the human body.

In the case of ill patients, WBC is used in the following diseases:

- Inflammatory musculoskeletal disease: rheumatoid arthritis, ankylosing spondylitis,
- Neurological disorders : multiple sclerosis,
- Depression syndromes.



The treatments in cryochamber are usually well tolerated by patients and complications related with the treatment are very rare. However, one must not neglect states in which the effect of low temperatures can be adverse for the patient. In qualifying patients for cryochamber treatment, one should pay attention to the following:

- Patient's age,
- The existing diseases,
- Nutrition,
- Performance of vascular vessels,
- Duration of cold and its intensity,
- Intaken drugs,
- Consumption of alcoholic beverages,
- Individual characteristics of response to cold.

All these factors determine the suitability of using cryogenic treatment or can disqualify patients. Additionally, qualification to cryostimulation should be based on the results of basic spirometric and cardiological tests. The following contraindications are known for the application of cryogenic treatment:

Absolute contraindications to cryostimulation

- Cold intolerance,
- Cryoglobulinaemia,
- Cryofibrinogenemia,
- Raynaud disease,
- Cold urticaria,
- Open wounds and ulcers,
- Gangrenous lesions,
- Thromboembolic changes and inflammation in the venous system,
- Agammaglobulinemia,
- Central nervous system disease,
- Sympathetic neuropathy,
- Hypothyroidism,
- Local blood flow disturbances,
- Significant anaemia,
- Claustrophobia,
- Mental disorders, which may prevent adequate co-operation with the patient in the chamber,
- Emaciation and hypothermia,
- Cancer,
- Prinzmetal syndrome,
- Unstable coronary artery disease,
- Valve disorders: aortic valve stenosis and mitral valve stenosis,
- Diseases of the myocardium or the mitral apparatus,
- Arrhythmia at a rate higher than 100 strokes per minute,
- Severe forms of exertional angina pectoris and spontaneous angina,



- Venous blood leaks in the lungs,
- Acute respiratory diseases of various origins,
- Effects of drugs, especially antipsychotics and alcohol.

CONTEXT OF THE EVALUATION AND SELECTION OF THE TYPES OF CLINICAL DATA

The WBC is an existing technology and there are several types of technology.

Types of cryogenic chambers

There are many types of chambers available in the market, and the choice depends on the design of the chamber, one room or two, the number of persons undergoing treatment at the same time, type of coolant. The choice of chamber is often also related to economic considerations.

Cryochamber with cool retention effect

This chamber is cooled with a mixture of liquid nitrogen and liquid oxygen in the proportions of atmospheric air. The air is pumped from the external tank and sprayed by specially prepared nozzles. This design is based on the phenomenon of cold retention in a basin, which reduces the importance of thermal insulation and elimination of the vestibule, reducing the cost of materials. Three to four people may stay in this cryochamber at the same time, although there is restricted access to wheelchair users. This type of a cryochamber may be without a vestibule, or with one or two vestibules.

Cryobarrel (cryosauna) or partial WBCC

This is a cabin for one person. The patient is immersed in the cold vapors up to the arms, breathing air from the room with the head is located outside the reach of extremely low temperatures. It has a swinging door which opens under the pressure of the body, and contact with the patient is very good. Liquid nitrogen or liquid air is used to generate the coolant. The cryosauna has many advantages: low cost of use, good contact with the patient, easy assembly. It is contentious whether omission of the head is an effective treatment (with the head having a significant number of cold receptors), but it allows the use of cryostimulation by a person suffering from claustrophobia.

Cryochamber with a compressor cooling system

This chamber with a compressor system uses air as a coolant. The chamber consists of two vestibules with a temperature of -10°C and -60°C , and the chamber proper with a temperature of about -100°C . It can be mounted either indoors or outdoors (the chamber is isolated from the ground). Suitable temperatures in the inside are provided by three compressors, and the cooling system uses only non-combustible and non-toxic gases. This type of chamber has all the elements necessary for the safe performance of cryostimulation - additional emergency



exit, visual and audio contact with the operator. All parameters are monitored by a computer. The chamber can be used in group therapy.

Two-stage cryogenic chamber

. This type of chamber consists of one or two vestibules where the temperature is approximately -60°C , and a main chamber in which the temperature is maintained within the range -110°C to -160°C (depending on the coolant). In order to maintain such a sufficiently low temperature, liquid nitrogen is pumped directly into heat exchangers which consist of 3 systems: cooling, air preparation and control. Maintaining the temperature is possible by heat exchangers installed in the vestibule and the chamber proper. Compressor filters and dryer constitute the system of breathing air preparation. By this arrangement it is possible to introduce purified dry air, reducing the feeling of cold, and ensuring transparency in the chamber. The control system consists of a power supply and control cabinet, controller and computer, providing the desired data parameters. Extra security is provided by a glazed door, opening under the pressure of the body and an alarm button.

The Cryantal WBCC belongs to this kind of technology; moreover it guarantees sure and low cost operation. Indeed it's an electrical and not energy-consuming technology. Thus no nitrogen is used and it's very important for patient safety. Furthermore, the low cost allows everyone to have the access at this technology. In a technical point of view, the Cryantal WBCC generates a homogeneous and well-controlled temperature in the cryogenic room. In some other cryogenic chambers, the cold is not homogeneous and there are several degrees of differences between the feet and the shoulders.

The MD was manufactured by subcontractor. The quality report was signed and the Cryantal quality procedures were respected. Cryantal has established a formation for the future WBCC operators who will have a user MD manual. The MD is not in "active use" for the patient so risks are limited. Only trained professionals will use the WBCC.

Prior to the start of each exposure, each patient will be examined by a physician to test for any contraindications against cryostimulation. Before each treatment, systolic and diastolic blood pressure was measured in order to check for the most common contraindication of high blood pressure.

UNDESIRABLE EFFECTS / BENEFICAL EFFECTS

According to the clinical studies, there are few undesirable effects during or after the exposures. In rheumatoid arthritis group, two patients found the therapy very uncomfortable but they did not mention any adverse effects, one patient dropped out because of malaise and one stopped because he had headache (12). These are the only ill observed in a single study. For the others studies, no complications, side effects or illnesses occurred during the study period.

The ratio between the beneficial effects and the risks is acceptable.



SUMMARY OF CLINICAL DATA AND EVALUATION

This section summarizes clinical data used to support the conclusions of this report.

The methodological researches of the scientific literature performed with scientific databases have revealed the existence of qualitative clinical data related to the safety and to the efficiency of the protocols of treatment of the Cryantal WBCC.

The first selection criterion of the bibliography was the examination of the title and/or of the abstract and the link with the product.

According to the studies of the state of the art, in medical domain, the WBC enables an analgesic, anti-inflammatory and antioxidative on painful pathologies like rheumatoid arthritis, ankylosing spondylitis or multiple sclerosis. As this treatment can decrease depressive and anxiety disorders (12, 17, 22, 25).

In sport domain, the WBC enhances the physical recovery with decreasing the occurrence of the inflammatory syndrome, the oxidative stress, the damage in muscular cells and fibers after exercise and a decreased in the exertion stress (15, 16, 21, 27, 28). The WBC has an effect on the ANS which contributes to improve the recovery by accelerate the metabolic wastes elimination, by the more rapid return of the basal heart rate and by the increase of the well-being and pleasure sensations (9).

Whether it is in medical or sport domain, the WBC improves the quality of life in patients or athletes.

The bibliographical researches were performed since November, 2013 by Romain Bouzigon. He is PhD Student in the sport faculty of the University of Besançon. He works on the physiological and psychological effects of the whole-body cryostimulation on the sport recovery.

Type de données cliniques	Description	Conclusions
Literature	<ul style="list-style-type: none"> - Springer Link, - PubMed, - Journal of Human Sport and Exercise, - The Lancet - American Journal of Physiology – Heart and Circulatory Physiology, - Plos one, - ScienceDirect, - Google Scholar, - Researchgate, - Polish Journal of Environmental Studies. 	
Surveillance post market, expérience, vigilance		



Clinical studies	Banfi G. et Al. 2009 Hausswirth C. et Al. 2011 Hausswirth C. et Al. 2013 Hirvonen HE. et Al. 2006 Lubkowska A. et Al. 2011 Miller E. et Al. 2010 Pournot H. et Al. 2011 Rymaszewska J. et Al. 2008 Stanek A. et Al. 2010 Wozniak A. et Al. 2013 Wozniak A. et Al. 2007	Cf appendix A
Compliance standards, essential requirements.	IEC 60 601-1-1/2 ISO 14 971 ISO 15 223 EN 1041	

DATA ANALYSIS

Several types of WBC MD exist on the market. Among them, there are open tanks and whole-body chambers. Thus these MD have not the same performances and doesn't present the same level of risk for the patients.

WBC MD like cryosauna which use nitrogen gas present important risks for the patients. If they breathe the gas they can rapidly have a malaise. This case is already arrived with a Polish cryosauna. Another problem with the gas projection is the homogeneous distribution of the temperature. For example, in a French Cryosauna in which the nitrogen projection comes from below, patients were already burned by the cold on the legs level. Indeed the temperature was too cold on the bottom and not enough cold at the top with the opening tank. The third problems with the nitrogen WBC MD is the adjustment of the temperature. The cooling by nitrogen projection is not enough sensitive to allow a good control of the temperature. Moreover, the nitrogen gas is expensive and the price of exposure is increased. In the case of a fixed cryosauna, the safety standards are really exigent to can install a nitrogen vat. So the nitrogen WBC MD remains difficult to exploit due to the important risks for the patients, the difficulty to be adjusted, the high cost of exposure and the safety standards needed for the installation.

The WBC MD which use ambient air cooled are more safety for patient, however the cost of an exposure remains expensive. Indeed these actual technologies use lots of electricity. Moreover this kind of MD (with three contiguous chambers) takes up space and can't be developed in mobile version.

The particularity of the Cryantal WBCC is that it does not consume lots of energy and is safer for the patients. Moreover the temperature of exposure can be precisely adjusted and it can be adapted in a mobile version with its smallest size than other WBCC. The Cryantal WBCC allows a democratization of this method due to the lower cost of the exposures.



UNDESIRABLE EFFECTS

According to the clinical studies, there are few undesirable effects during or after the exposures. Two patients found the therapy very uncomfortable but they did not mention any adverse effects, one patient dropped out because of malaise and one stopped because he had headache.

CONTRAINDICTION

Intolerance of cold, cryoglobulinemia, Raynaud's disease, hypothyroidism (increasing risk of hypothermia), acute diseases of respiratory tract, neoplastic disease (due to adaptative intensification of local blood supply), instable angina pectoris, severe valvular heart defects (in the insufficiency of circulation stage), cardiac failure, severe arrhythmias, purulent-gangrenous skin lesions, vegetative neuropathies (due to predisposition to hyperhidrosis), local blood flow disturbances, cachexia and hypothermia, as well as claustrophobia and mental diseases (due to inability to comply with safety rules in a cryogenic chamber).

CONCLUSION

According to the results of the evaluation of the available clinical data, we can conclude that the WBCC is able to work in accordance with the manufacturer claims and doesn't present patient risks which was not identified or took into account. If the instruction is respected, with all of these contraindications, and the WBCC is used in accordance with the instructions learned during the Cryantal formation, the Cryantal WBCC can't compromise patients' health and safety.

The product instruction is in harmony with the available literature of this kind of product because the dangers or other relevant clinical informations were identified appropriately.

The Cryantal WBCC complies with the essential requirements and we can conclude that the clinical literature and the experience of similar products demonstrate that the clinical profits surpass the associated risks with its used. It was concluded that the requirements in clinical data according to the appendix X of the MDD was fulfil.

APPENDIX A: CLINICAL INVESTIGATION

1. Introduction

The WBCC device was already used in two different domains. It was used 1) in medicine to relieve some pathology; and 2) in sport to improved recovery.

Pathologies already treated with the use of a WBCC:

- Rheumatoid arthritis,
- Ankylosing spondylitis,



- Multiple sclerosis,
- Depression and anxiety disorders.

2. Medical domain

2.1. Effects of the WBC on physiological pathologies

2.1.1. Effects of the WBC on rheumatoid arthritis

Rheumatoid arthritis (RA) is a systemic, autoimmune, inflammatory disease, leading to joint destruction, physical activity limitation, disability, and premature death. Other complications of the disease are a worsening of social functioning, emotional health, and the quality of life. Additional relevant factors connected with treatment are the costs of health care of RA patients and the costs of complications due to RA treatment (14). The need for a comprehensive approach to the evaluation of disease progression resulted in an increased interest in an objective assessment of disease progression and patient's subjective well-being. WBC has beneficial effects in RA - it increases active muscle power and lowers passive muscle power. Pain and increased oedema of joints is reduced, resulting in increased range of motion in the inflamed joints. A single cryostimulation of a specific part of the body takes about 3 minutes and has both analgesic and anti-inflammatory effects. Therefore cryostimulation should be immediately followed by physical exercise. Hirvonen, *et al.* (12) compared three cryotherapy modalities for treating patients with RA. Sixty patients (51 females and 9 males, mean age 53 years) with active seropositive RA were recruited in a randomized controlled single-blinded study to receive local cryotherapy (application of local cold air at -30°C and the use of cold packs locally), WBC at -60°C and WBC at -110°C . They were eligible for the study if they fulfilled the following inclusion criteria: 5 or more swollen and 5 or more tender joints, erythrocyte sedimentation rate (ESR) 20 mm/h or greater at inclusion and/or C-reactive protein (CRP) concentration in serum greater than 20 mg/l, and a duration of morning stiffness of 30 minutes or more. The patients had 2-3 cryotherapy sessions daily for one week plus conventional physiotherapy. There had no control group in this study. The study protocol was approved by the ethical committee of Päijät-Häme Hospital. Disease activity was calculated by the Disease Activity Score (DAS). It's an assessment used by clinicians to measure RA disease activity, to determine whether the signs of symptoms have reduced or stopped, and if one treatment needs to be adjusted (8). Pain was measured by visual scale (VAS, 0-100mm). These two variables were measured at baseline and at the end of the study. They measured a significant decreased in the DAS after the three treatments in patients: -0.39 for the local cryotherapy, -0.54 for the WBC -60°C and -0.65 for the WBC -110°C but not significant difference between the groups. For the pain, the decrease was statistically significantly greater ($p < 0.01$) in the group of WBC at -110°C (-24) than in the WBC at -60°C (-3) or in the local cryotherapy group (-11). They concluded that the three modalities relieve pain and further that the WBC at -110°C seems to be more effective than the two other cryotherapy modalities. The pain intensity was reduced clearly during the whole period of seven days.



However, the limit of this study is the lack of the time of exposure in the protocol. We don't know it.

2.1.2. Effects of the WBC on ankylosing spondylitis

Ankylosing spondylitis (AS) is a chronic inflammatory disease of the sacroiliac joints and the spine (5). The etiology of AS is unknown. It is still not clear which precise mechanisms determine the interactions between host factors (HLA-B27 and other genes, cytokines, T lymphocytes) and microbial factors leading to the manifestation and chronicity of AS (13). Antigen HLA-B27 is found in only 6% of the general population, but it occurs in approximately 93% of individuals suffering from AS. AS is almost three times more common in men than in women. It typically affects young people, with onset usually between 15 and 30 year of life. Chronic spinal inflammation can develop a complete fusion of the vertebrae, a process called ankylosis. Ankylosis causes total loss of mobility of the spine. AS is also a systemic rheumatic disease. It can also produce an inflammatory process in peripheral joints of limbs, as well as in several organs such as eyes, heart, lungs and kidneys. The main symptoms of the disease are pain and stiffness in the low back, upper buttock area, neck, and the remaining regions of the spine. The onset of pain and stiffness is usually gradual and these symptoms progressively worsen over months. AS pharmacotherapy is not sufficient to improve the clinical state of patients with AS, physiotherapy seems to be one of the cornerstones of successful long-term management of AS. It is applied for three major reasons: to maintain or restore spinal mobility, to maintain or improve posture and to improve chest expansion. Actually, the WBC seems to be the most efficient method for the alleviation pain in many diseases of the motional system.

Stanek, *et al.* (25) demonstrated that the WBC has a positive effects in patients with AS. The study involved 32 male persons: 16 patients with ankylosing spondylitis (experimental group, mean age 47 ± 4.7 years) and 16 healthy volunteers (control group, mean age 43 ± 3.9 years) with no significant difference in mean age between them. The research protocol has been reviewed and approved by the Bioethical Committee of the Medical University of Silesia in Katowice (permission N° NN-013-144/1/02) and all analyzed subjects gave their informed, written consent for inclusion in the trial. All patients of both groups were exposed for 10 consecutive days to a cycle of whole-body cryotherapy procedures lasting 30s in the antechamber (-60°C) and 2 minutes in the proper chamber, with subsequent 60-minute routine kinesitherapy. Blood samples acquisitions were performed on the first and last day of a cycle of whole-body cryotherapy with subsequent kinesitherapy in subjects from both groups, the following markers of inflammatory process were estimated: serum C-reactive protein (CRP), mucoprotein (the complex of $\alpha 1$ acute phase proteins, consisting mainly of $\alpha 1$ -acid glycoprotein, 3-5S $\alpha 1$ -glycoprotein, haptoglobin, and several others, which is soluble in perchloric perchloric acid solution and precipitable by phosphotungstic acid) and soluble intercellular adhesion molecule-1 (sICAM-1) levels, plasma fibrinogen concentration as well as erythrocyte sedimentation rate (ESR). The authors observed that in patients suffering from ankylosing spondylitis, the initial values of C-reactive protein, mucoprotein, fibrinogen and s-ICAM-1 concentrations, as well as erythrocyte sedimentation rate value, were significantly higher ($p < 0.001$) as compared to the control group of healthy volunteers. After a cycle of



WBC procedures in patients with ankylosing spondylitis, a statistically significant decrease in C-reactive protein concentration (6.37 ± 8.09 and 2.17 ± 4.31 mg/dl – before and after therapy, respectively, $p=0.002$), mucoprotein concentration (1.43 ± 0.24 g/l and 1.02 ± 0.25 g/l – before and after therapy, respectively, $p<0.001$), fibrinogen concentration (3.55 ± 0.66 g/l and 2.98 ± 0.72 – before and after therapy respectively, $p<0.001$), sICAM concentration (331 ± 103 g/l and 262 ± 76.9 – before and after therapy, respectively, $p<0.001$), as well as in erythrocyte sedimentation rate (19.19 ± 14.72 and 12.06 ± 11.06 mm/h – before and after therapy, respectively, $p=0.001$) were obtained. In the control group of healthy volunteers, the WBC significantly decreased mucoprotein concentrations (1.06 ± 0.007 and 0.92 ± 0.14 g/l – before and after therapy, respectively, $p=0.002$), fibrinogen concentration (1.97 ± 0.58 and 1.71 ± 0.45 g/l – before and after therapy, respectively, $p=0.02$) and erythrocyte sedimentation rate (1.5 ± 0.63 and 1.13 ± 0.5 mm/h – before and after therapy, respectively, $p=0.028$).

So this study showed that the Cryogenic temperatures used for whole-body cryotherapy as a component of complex treatment decreases levels of inflammatory markers both in patients with ankylosing spondylitis and healthy volunteers. Moreover, patients involved in the present study confirmed a more favorable subjective estimation of clinical effects of whole-body cryotherapy with subsequent kinesitherapy compared with separate kinesitherapy in all persons exposed to this method of physiotherapy. In patients with AS, a clinical improvement was related mostly to subsidence or considerable reduction of pain intensity and to a decrease in recurrence rate of pain syndrome, as well as to the reduction of neurotonia, relaxation and subsidence of sleep disorders. The authors explained these effects by the reduction of the inflammatory activity. So the WBC is also a beneficial method for pain alleviation in patients with AS.

2.1.3. Effects of WBC on multiple sclerosis

Multiple sclerosis (MS) is a chronic and inflammatory demyelization disease of central nervous system (CNS) with axonal degeneration and astrogliosis. Depression is frequently observed in persons with MS (24). Depressive symptoms are associated with reduced quality of their life. Accumulating data indicate that oxidative stress (OS) plays a major role in the pathogenesis of multiple sclerosis. Reactive oxygen and nitrogen species (ROS/RNS), leading to OS, generated in excess primarily by macrophages, have been implicated as mediators of demyelization and axonal damage in MS. ROS cause damage to main cellular structures and components such as lipids, proteins and nucleic acids (e.g., RNA, DNA) and might be responsible for the neuronal dysfunction, and result in cell death by necrosis or apoptosis contributing to the pathogenesis of this disorder.

Miller, *et al.* (17) demonstrated that the WBC have a positive effect on MS patients. They wanted to determine the effects of WBC on oxidative stress by the level of total antioxidative status (TAS) in plasma and the activity of antioxidative enzymes: superoxide dismutase (SOD) and catalase (CAT) in the erythrocytes from MS patients. Moreover, they measured the combined effects of WBC and melatonin on TAS and activity of antioxidative enzymes. Sixteen MS patients and sixteen healthy controls participated in this study. The MS samples consisted of 11 females and 5 males aged 43.2 ± 11.2 ; the average disability status scale EDSS



(expanded disability status scale) score reached 4.5 ± 1.83 and average disease duration was 9.0 ± 6.45 years. Healthy control (n=16) subjects were age matched to MS patients and selected according to sex, lifestyles and diet. The protocol and all the procedures were carried out in accordance with the Helsinki Declaration with the approval of the Medical University of Lodz, Poland. The study was performed in the Medical University, Department of Biochemistry and Neurorehabilitation, Division III General Hospital in Lodz, Poland.

The MS patients were treated with 3 cycles of 10 exposures separated by 3 months in a cryogenic chamber. The last cycle was accompanied by a 14-day-long supplementation of melatonin (10 mg daily). Healthy subjects as a control group had 1 cycle of WBC.

The study lasted from March to November, 2009. Observations were made in 3 groups: MS I—16 patients after the first cycle of WBC (non-melatonin), MS II—16 patients immersed by 3 cycles of WBCT—including the last cycle with 14 days of melatonin supplementation and 16 healthy subjects immersed by 1 cycle of WBC. All three groups were examined at 2 stages: at the beginning and at the end of the treatment. In both MS groups blood samples were taken 1h before the first 10 days' cycle of the therapy and 1h after the last immersion.

This study has shown that the WBC distinctly changes the level of TAS in MS patients. Activities of SOD and CAT in erythrocytes of MS patients after treatment with WBC were not changed. But Melatonin supplementation increased SOD and CAT activity compared with the "non-melatonin" group ($p < 0.05$ and < 0.0001 , respectively). Melatonin caused statistically significant increase of SOD activity in erythrocytes of MS patients ($p < 0.05$), contrary to "non-melatonin" MS patients, where SOD activity showed no changes. They also observed that the level of TAS in both MS groups (with and without melatonin) after WBC was considerably higher than before WBC $p < 0.0001$ and < 0.0005 , respectively.

This preliminary study showed that WBC treatment of MS patients resulted in the increase of TAS but had no effects on activity of antioxidative enzymes: SOD and CAT. Supplementation of melatonin and the treatment along with WBCT significantly increased the activity of SOD and CAT in erythrocytes of MS patients.

The WBC has an effect on physiological pathologies, especially on rheumatoid arthritis, ankylosing spondylitis and multiple sclerosis. The mutual beneficial effect between these three pathologies was the analgesia induced by the cryogenic temperature. Moreover, it has been demonstrated the positive antioxidative effect of WBC on MS and the positive anti-inflammatory effect on AS.

WBC can't completely treat these pathologies, but can relieve the daily pain of the patients. Thus it can improve their relaxation, their mood states and their sleep quality. This may allow patients to recover a normal life and to avoid the social eviction.

So the WBC could improve their quality of life.

The limit of this study was the temperature of exposure. Indeed the temperature wasn't the same during the study. In these conditions it's difficult to determine the optimal temperature for relieve this pathology.

2.2. Effects of the WBC in psychological disorders



2.2.1. Effects of WBC on depressive and anxiety disorders

Rymaszewska, *et al.* (22) studied the effects of the WBC in patients with depressive and anxiety disorders. They used Hamilton's scales of depression and anxiety to measure the severity of these syndromes and the evolution during the study. These scales have been used many times in clinical study. The Hamilton's anxiety rating scale (HARS) was one of the first rating scales developed to measure the severity of anxiety symptoms. The depression rating scale (HDRS-17) provides questions related to symptoms such as the patient's mood, guilt feelings, and thoughts of suicide, disturbed sleep, anxiety levels, and weight loss. The anxiety rating scale includes symptoms regarding moods of anxiety, tension, and fear, insomnia, cognitive changes, depression, and somatic symptoms of a general type and of the cardiovascular, respiratory, gastrointestinal, genitourinary, and autonomic systems.

The study involved persons from 18–65 years of age with depressive and anxiety disorders treated at an outpatient psychiatric clinic, after they had provided written informed consent. The subjects in both the control group ($n=34$; 31 females, 3 males; aged 40.88 ± 11.90) and the study group ($n=26$; 22 females, 4 males; aged 47.04 ± 13.05) received standard psychopharmacotherapy as prescribed by their psychiatrists. This treatment was not modified during the evaluation period. The subjects in the study group were additionally treated using a cycle of 15 visits to a cryogenic chamber carried out daily from Monday to Friday. The sessions in the chamber lasted 2–3 min. The temperature used in the chamber during the first visit was -110°C . This temperature was systematically lowered over successive visits to permit the organism to adapt to the low temperatures. The temperature used during the final visit was -160°C .

Observations were made at six different stages: at the start of treatment, after 7, 14, and 21 days, as well as 3 and 6 months after the cycle of visits.

They demonstrated a significant decrease in the HDRS-17 ($Z=-3.368$, $p<0.001$) and HARS ($Z=-3.730$, $p<0.001$) in the first week in study group as opposed to the control group. In the second week of treatment there was again a significant decrease in depressive ($Z=-4.160$, $p<0.001$) and anxiety ($Z=-4.379$, $p<0.001$) symptoms within the study group. Considering the effects of treatment over the first two weeks, these decreases were significantly greater in the study group ($Z=-6.218$, $p<0.001$ and $Z=-4.817$, $p<0.001$, respectively). In the third week of treatment a significant decrease in anxiety symptoms was observed in the control group ($Z=-2.307$, $p<0.03$). However, no such change was observed in the severity of depressive symptoms ($Z=-0.081$, $p>0.9$). In the study group a significant reduction was noted in both cases ($Z=-2.995$, $p<0.004$ and $Z=-3.297$, $p<0.002$, respectively). Again, these reductions were significantly greater in the study group (depression: $Z=-4.295$, $p<0.001$, anxiety: $Z=-1.958$, $p=0.05$). Over the first three weeks of treatment a significant decrease was noted in the severity of anxiety (control group: $Z=-3.156$, $p<0.003$, study group: $Z=-4.436$, $p<0.001$) and depression (control group: $Z=-2.146$, $p<0.033$, study group: $Z=-4.461$, $p<0.001$). Comparing the results from both groups, over the first three weeks of treatment the reduction of symptoms was significantly greater in the study group (depression: $Z=-6.306$, $p<0.001$, anxiety: $Z=-5.521$, $p<0.001$). A decrease of 50% from the baseline scores of depressive symptoms was noted in 34.6% ($n=9$) of the study group and only in 2.9% ($n=1$) of the control group ($p<0.01$, Fisher's test). Such a reduction in anxiety symptoms was noted in 46.2%



(n=12) of patients from the study group and none from the control group ($p < 0.001$, Fisher's test).

They demonstrated greater decreases in the two scales scores in study group (depressive and anxiety patients) than in control group after the WBC treatment. These results suggested that cryotherapy may play a positive role in the process of treating patients with affective and anxiety disorders. The positive effect was already observable after one week of treatment and improvements continued to be significant over the whole three-week cycle of cryotherapy. The rapid initial improvement achieved using cryotherapy means that such adjunctive treatment may be of value. The authors explained these results by the effects of WBC on the hypothalamic-pituitary-adrenal axis and on the endogenous opioid system. Indeed the brain's opioid peptide systems are known to play an important role in motivation, emotion, attachment behavior, response to stress and pain, and the control of food intake.

According to this study, Cryogenic temperatures are responsible for activation of thermoregulative mechanisms aimed at maintaining constant body temperature, especially the temperature of vital organs such as brain, heart, kidneys mainly by sacrificing less important parts of the body such as extremities. There are two ways of maintaining constant temperature whilst being exposed to extremely low environmental temperature. On the one hand, heat is being preserved in the body and on the other it is being actively generated. The above-mentioned mechanisms are coordinated by two highly specialized parts of the posterior hypothalamus which has links to other specific centers in the mesencephalon such as the center responsible for muscle tonus, the center controlling hypothalamus-pituitary-peripheral endocrine glands (thyroid and suprarenal) axis, the autonomic system center, and the vasomotor center. Low environmental temperature stimulates skin thermosensitive receptors, nociceptors and thermosensitive mechanoreceptors. Conveyance of these stimuli into Central Nervous System (CNS) triggers, among others, specific neurohumoral chain reactions with servomechanisms known as the hypothalamus-pituitary-peripheral glands axis. This results in excretion of corticotropin-releasing hormone (CRH) and thyrotropin-releasing hormone (TRH) in the hypothalamus.

So it could be suggested that the WBC acts through stress chain reactions which results in temporal improvement of mental condition and in that respect it resembles other stressors used in treatment of depression such as sleep deprivation. Depression and anxiety disorders result of disturbances of biological cycles. These disturbances are commonly attributed to dysfunctions of regulative mechanisms of hypothalamus and reticular formation. The cryotherapy influences, in all likelihood, the hypothalamus triggering thermoregulation reactions, so the conclusion could be formed that cryotherapy plays an important role in regulating disrupted functions of both hypothalamus and reticular formation, thus improving all biological cycle in general.

In the same way that in the study of Miller, *et al.*, the limit is the temperature of exposure. The patients were exposed at -110°C in the beginning and arrived progressively at -160°C in the last exposure. It should be interesting to assess the most adapted temperature for this population.



The WBC is a beneficial treatment for some psychological pathologies like depressive and anxiety disorders. One more time we demonstrated that it could improve the quality of life in patients.

In medical domain, the WBC has already been proven. Indeed it has been demonstrated its analgesic, anti-inflammatory and antioxidative effects on painful pathologies like rheumatoid arthritis, ankylosing spondylitis or multiple sclerosis. As this treatment can decrease depressive and anxiety disorders.

All of these effects can improve the quality of life of patients who live with pain day after day and who enter in a phenomenon of social eviction. Moreover, these patients have important medication treatment and the maybe the WBC could induce a decrease of medicament intake.

The decrease of depressive symptoms, pain, and medicament intake allow them to enhance their mood states and maybe to give them a new life.

3. Sport domain

3.1. *Physiological effects of the physical activity*

Athletes who participate in competitions are often exposed to important physical training load composed of repeated high intensity exercises. Moreover, these training loads are completed by competitions and most of the time the recovery is insufficient. These successions of important loads and insufficient recovery cause fatigue and muscle damage and lead to inflammatory syndrome characterized by swelling, muscular pains and a prolonged loss of strength (11). Moreover, these damages will cause the alteration of the activity of the immunological system (18, 20) . The physical activity increases the oxidative stress too (26) and repeated exercise can bring anemia in athletes (3).

Techniques used in physical training have developed tremendously in recent years and enable athletes to approach their physiological limits. It therefore appears difficult to directly increase the training load further. In addition to training, the recovery phase is considered a key phase of the training process because it optimizes the athlete's development. With a faster and more complete recovery, the training load can be increased and performance further improved (4).

Among the new recovery methods, whole-body cryostimulation (WBC) seems to be an attractive option and has already been accepted by many athletes and professional teams.

The present report describes some published articles which deal with the beneficial effects of the WBCC device for the physical recovery.

3.2. *Effects of the WBC in physical recovery*

3.2.1. Effects of the WBC on inflammatory response

Poumot, *et al.* (21) studied the effect of two different recovery modalities, WBC and passive recovery (PAS), after exercise in the proposed markers for muscle damage, systemic



inflammation (CRP, IL-6, IL-1 β , IL-1 α , IL-10, TNF- α). They hypothesized that WBC compared to PAS, accelerate the recovery in reducing exercise-induced muscle damage (EIMD) by decreasing the acute phase of inflammation in response to a single bout of exercise. Eleven well-trained runners (31.8 \pm 1.96) participated in the study all with similar training levels and statures. The selected runners regularly engaged in long distance running events (e.g. marathon, trails) and presented no contraindications to cryotherapy, such as claustrophobia and cold hypersensitivity. All subjects were volunteers and were informed about the study protocol, the risks of tests and investigations, and their rights according to the Declaration of Helsinki. All subjects accepted to participate and completed the written informed consent and a health history questionnaire. The study was approved by the local Ethics Committee (Ile-de-France XI, France; Ref. 200978) before its initiation.

All participants used both recovery modalities. Between trials, a minimum of three weeks of low intensity training was ensured. Once a month, subjects completed a simulated trail run on a treadmill followed by one of the two recovery modalities presented in a random order (WBC or PAS). WBC sessions were administered in a specially built, temperature-controlled unit which consisted of three rooms (-10, -60 and -110°C). The temperature of all rooms remained constant throughout the experiment. During each WBC session, subjects traversed the warmer rooms and remained in the therapy room for 3 min.

Before (Pre), after the simulation (Post), after the first recovery session (Post 1 h), and before the following recovery sessions (Post 24 h, Post 48 h, Post 72 h, Post 96 h), blood samples, were collected to analysed several markers of inflammation and muscle damage (IL-1 α , IL-1 β , IL-6, IL-10, TNF- α , CRP).

The trail run lasted 48 min and was divided in 5 blocks. The first block included 6 min on the flat (0% gradient), followed by 3 min uphill (+10% gradient) and 3 min downhill (-15% gradient). Velocity was continuously adjusted as a function of gradient in order to obtain a variety of intensities and elicit a similar metabolic demand to trail races in the field. Therefore, velocity at the 0% gradient was between VT1 and VT2 (mean V_{flat}: 15.5 \pm 0.9 km.h⁻¹), while velocity at a +10% gradient corresponded to <80% (mean V_{uphill}: 11.1 \pm 0.9 km.h⁻¹) of the maximal aerobic velocity at the 10% gradient, and velocity at -15% corresponded to velocity at VT1 (mean V_{downhill}: 14.2 \pm 0.7 km.h⁻¹). Blocks 2–5 consisted of 3 min at 0°, followed by 3 min uphill and 3 min downhill at the gradients and velocities previously described.

The results of the study revealed significant differences between recovery modalities at Post 1 h ($p < 0.05$). At Post 1 h, Δ IL-1 β and Δ IL-1 α showed significant higher and lower values in the PAS condition compared to the WBC, respectively. There was also a significant ($p < 0.05$) difference in Δ IL-1 α with lower values for the WBC condition compared to the PAS condition at Post 24 h. On raw data, the Friedman test revealed a significant difference between time measurements for both groups for each of these cytokines ($P < 0.05$). Posthoc analyses revealed that the decrease of IL-1 α occurs earlier after cryotherapy treatment than after the PAS modality (WBC: Post 24 h vs. PAS: Post 72 h). Post-hoc analysis on IL-1 β revealed that plasma concentrations at Post 1 h were significantly higher.

Analyses of Delta CRP (Δ CRP) from Post measurement showed significant ($p < 0.05$) difference between recovery modalities at Post 1 h, 24 h, 48 h, 72 h and 96 h from exercise



with significant higher values in the PAS condition compared to the WBC. A significant time effect was recorded for both groups. CRP increased ($p < 0.05$) and peaked 24 h post-exercise in both groups (WBC = +123% vs. PAS = +515%). In the PAS group, 48 h after exposure the increased CRP level persists (at 72 h, $P = 0.052$ with Bonferroni's correction) while the levels of WBC group return to the initial state.

The major finding was that a single exposure to WBC significantly alleviated inflammation after a strenuous exercise run. i) Delta IL-1 β was significantly suppressed 1 h after exercise following WBC, compared to the PAS condition ii) Delta IL-1 α increased 1 h and 24 h after exercise following WBC compared to PAS iii) CRP increase was strongly limited in the WBC group compared to the PAS group at 24 h and until 48 h after exercise.

To conclude, the authors said that a unique session of WBC (3 min at -110°C) performed immediately after exercise enhanced muscular recovery by restricting the inflammatory process. These findings suggest that multiple interactions between cytokines are likely involved in the physiological response to exertional fatigue and cold may serve to limit the severity of the host inflammatory response. According to the authors' hypothesis, multiple WBC exposures can enhance recovery, by decreasing the acute phase inflammatory response after a running trail exercise, thus contributing to its beneficial role in organ protection after muscle damage.

There are few limits in this study. Firstly it's difficult to demonstrate significant results with this poor number of subject. And secondly we don't know the time of exposure.

Lubkowska, *et al.* (15) studied the effect of prolonged WBC treatment with different amounts of sessions on chosen pro- and anti-inflammatory cytokines levels in healthy men. The research involved 45 healthy men (aged 22 ± 0.8). Each participant gave his written consent before participation in the research, and the Bioethical Committee of the Regional Medical Society issued their formal consent, according to the Declaration of Helsinki. The participants were randomized into three groups with the same numerical amount. Three different procedures of WBC were used for the appropriate group of men during the study. The first group (A, $n=15$) underwent whole body cryostimulation (WBC) once a day for 5 consecutive days. The second group (B, $n=15$) was subjected to 10 daily cryostimulation sessions for 2 weeks (10 sessions), excluding Saturdays and Sundays. The third (C, $n=15$) group was subjected to 20 daily WBC for 4 consecutive weeks, with interruptions for Saturdays and Sundays. The WBC lasted 3-minute long at -130°C . Entry to the cryochamber was preceded by a 30-second adaptation period in the vestibule at a temperature of -60°C , after which the subjects went directly to the chamber proper (-130°C). Blood was collected for analysis before the stimulations, after completion of the whole series, and 2 weeks after completion of the series, for the examination of any long-term effect.

The results obtained in subsequent samples were referred to the initial level for the group, treated as the control. After five daily treatments using WBC in group A, a statistically significant increase was observed in IL-6 levels ($\Delta=0.12$ pg/ml) and IL-10 ($\Delta=0.35$ pg/ml, $p < 0.05$) compared to the initial values. In this group, 2 weeks after exposure the increased IL-10 levels continued while the levels of IL-6 returned to the initial state. Similarly, after applying the series of 10 treatments in groups B and C, the levels of these cytokines



increased; most IL-6 ($\Delta=0.15$ pg/ml, $p<0.01$), slightly less significant was the increase in IL-10 ($\Delta=0.1$ pg/ml, $p<0.05$). Two weeks after the series of 10 treatments in group B these values returned to the initial state, in both cases. It was different in group C which continued for 20 WBC. After completion of the series, the levels of the aforementioned interleukins were still elevated compared to the initial values (Δ IL-6=0.16 pg/ml, $p<0.01$; Δ IL-10=0.08 pg/ml, $p<0.05$). Two weeks after completion of the series of 20 WBC, cytokine levels in serum returned to the initial values.

The opposite direction of changes was observed for IL-1 α . As early as after the series of five treatments in group A, the level of this cytokine significantly decreased ($\Delta=0.09$ pg/ml, $p<0.05$). In group B, after 10 treatments, this decrease was $\Delta=0.17$ pg/ml ($p<0.05$) and in group C it was $\Delta=0.25$ pg/ml ($p<0.05$). In group C which continued treatment, a further reduction in the level of IL-1 α was observed: $\Delta=0.32$ pg/ml ($p<0.05$), after a series of 20 treatments. Two weeks after the series of both 5 and 10 treatments, the levels returned to the initial values, but remained decreased in group C 2 weeks after the series of 20 treatments.

This study confirms the influence of whole-body cryostimulation on the level of circulating pro- and anti-inflammatory cytokines. Changes in the cytokine level caused by cryogenic temperatures seem to stimulate immune mechanisms in the body. It is worth noting that the changes depend on the duration of the stimulation series. Although the most common procedure is limited to 10 WBC, the results suggest the use of 20 stimulations in order to induce adaptation changes. The authors also suggest, in taking into account changes in the lipid profile and the cytokine level in the examined individuals, that it was interesting to consider this form of physiotherapy as a potential prevention method of diseases with chronic, subclinical inflammation, including the metabolic syndrome and obesity.

The limit of this study was the lack of a control group.

According to these two studies, the WBC induces a rapid decrease of the skin temperature, promptly stimulating cutaneous receptors and their sensory afferents to excite sympathetic adrenergic fibres, in turn causing the constriction of local arterioles and venules. This vasoconstriction causes a decrease in blood flow to the periphery and in the injured and inflamed tissues, reduces local metabolic processes. Thereby the inflammatory responses and the formation of oedema are attenuated around the tissue injury. Moreover, the WBC induces a decrease of the pro-inflammatory cytokines (IL-1 β , IL-2, IL-8) and an increase in anti-inflammatory cytokines (IL-1 α , IL-6). So the WBC enhances the recovery by decreasing the appearance of inflammatory syndrome.

3.2.2 Effects of the WBC on the activity of the Autonomic Nervous System (ANS)

The heart rate variability (HRV) and blood concentration in catecholamine are habitually used to measure the activity of the ANS in response to various stimuli such as cold or physical exercise. The Sympathetic Nervous System (SNS) and Parasympathetic Nervous System (SNP) activities of the ANS are stimulated with cholinergic and adrenergic neurotransmitters: The acetylcholine for the SP and the catecholamines (dopamine, epinephrine and norepinephrine) for the SA (1, 6, 23).



Hausswirth, *et al.* (10) have measured the effects of the WBC and Partial-Body Cryostimulation (PBC) on the activity of the ANS with the HRV and the blood concentration in catecholamines. Forty healthy men participated in this study. There were all recreational athletes between 20 and 55 years old. These experiments were conducted according to the Declaration of Helsinki (1964: revised in 2001) and the protocol was approved by the local Ethics Committee (Ile-de-France, Paris, France) before its initiation.

Hence, 2 groups of 15 subjects performed one WBC or PBC session for 3-min. 10 more subjects composed a control group, without any exposure to cold. Physiological and subjective measurements were performed immediately before and during the 20-min after the exposure.

They demonstrated 1) a decreased of the heart rate after WBC (-15.2%) and after PBC (-10.9%); 2) an increased in the resting vagal-related heart rate variability indices: the root-mean square difference of successive normal R-R intervals, RMSSD and high frequency band, HF, after WBC (+54.4%; +632%, respectively) and after PBC (+54.4%; +138%, respectively); and 3) a significant increase of the blood concentration in norepinephrine after WBC (+76.2%) and after PBC (+57.4%).

This result showed on the one hand that the SNS have an important activity with the cold stimuli. This increased in SNS activity is linked to the peripheral vasoconstriction mechanisms induces by the norepinephrine in response to the excitation of the sensorial receptors of cold. It's a protective mechanism to move the blood from the peripheral territories to the internal territories to prevent an excessive decreased of the central temperature and protect the organs. According to the study, the blood concentration in dopamine increased too and was linked to the increased of well-being and pleasure sensations. And in the other hand, this study demonstrated that the HRV index of the SNP was also increased. This is due to the stimulation of two types of receptors: 1) the baroreceptors placed in the aortic cross which is sensitive at the variation of the arterial blood pressure caused by the blood flow redistribution, it's the baroreflex arc activation, and 2) by sensorial receptors placed on the face and stimulated by the cold stimuli, it's thought to be principally mediated by trigeminal brain stem pathways. The SNP had a cardio-decelerator role.

Thus the WBC induces an increase of the SNS activity in a first time and of the SNP activity in a second time. This more important activation of the ANS contributes to improve the recovery by accelerate the metabolic wastes elimination, by the more rapid return of the basal heart rate and by the increase of the well-being and pleasure sensations. For all of the variables, the WBC was more efficient than the PBC and the control group. So a WBCC guarantees greater results than a partial-body cryochamber like Cryosana models.

3.2.3. Effects of the WBC on the immunological system

Lubkowska, *et al.* (16) have examined the effect of WBC on the white blood cell count, interleukin-6 and total oxidative (TOS) and antioxidative status (TAS) in healthy men with increased physical activity.

The study involved 15 healthy men, aged 21 ± 0.7 years, with normal body-weight, who had never been subjected to any form of cryotherapy. Each participant gave his written assent before participation in the study, and the Bioethical Committee of the Regional Medical



Society in Cracow issued their formal consent, according to the Helsinki Declaration. Participants were exposed to a 10-day-long series of cryostimulation (once a day), at extremely low temperature in a cryogenic chamber. Each cryostimulation session lasted 3 min (temperature -130°C). Entry to the cryochamber was preceded by a 30-s adaptation period in the vestibule at a temperature of -60°C .

Blood was taken after overnight fasting in the morning before the treatment (sample A), 30 min after the first cryostimulation (sample B) and in the next morning (sample C). Additionally, other samples were made in the morning (sample D), 30 min after cryostimulation (sample E) and the next morning (sample F) after the last (tenth) session. In all samples (A, B, C, D, E and F) IL-6, total oxidative status (TOS) and TAS was measured. White blood cell (WBC) count was examined in samples taken before and after ten series of cryostimulation.

They found that in all participants, the initial values of all leukocytes were within clinical and laboratory norms. The series of cryostimulation resulted in a statistically significant increase in the total number of leukocytes from 4.36 ± 1.31 to $5.26 \pm 0.7 \cdot 10^3/\mu\text{L}$ ($p < 0.05$), however, not exceeding clinical and laboratory norms. Additionally, the increase concerned the number of lymphocytes ($p < 0.05$) and monocytes ($p < 0.05$), and to a lesser extent, neutrophils and eosinophiles ($p < 0.05$). The initial, resting levels of IL6 in serum were low in the participants before cryostimulation ($1.21 \pm 0.6 \text{ pg/mL}$). After the first session, 30 min after leaving the cryogenic chamber, they observed a statistically significant increase in cytokine ($1.5 \pm 0.5 \text{ pg/mL}$, $p < 0.05$), which was maintained until the next day morning ($1.45 \pm 0.4 \text{ pg/mL}$, $p < 0.05$). The following sessions maintained the increased levels of cytokine in comparison to the initial levels, and the highest level was observed in response to the last session on the tenth day ($1.98 \pm 0.7 \text{ pg/mL}$). In relation to the reference values for the plasma according to the manufacturer of the applied tests (health-related reference interval), they found that the level of the TOS in the plasma, at rest (A), was very low ($136.8 \mu\text{mol/L}$). A first single cryostimulation session resulted in a slight decrease in TOS level, down to $127.5 \mu\text{mol/L}$. During the ten day of the experiment, after the last session the lowest level of TOS was observed ($115.3 \mu\text{mol/L}$), the differences was statistically significant compare to initial day.

On the day following the last cryostimulation, the TOS level rose slightly, to $130.7 \mu\text{mol/L}$ (F) and was still lower from the initial values, though the difference was not statistically significant. Similarly low was the initial level (A) of the plasma total antioxidative status (TAS = ImAnOx): $190 \mu\text{mol/L}$. The TAS level had a significantly decreased level 30 min after leaving the cryochamber (B), to $174 \mu\text{mol/L}$. The following day (C), an increase in TAS level up to $192 \mu\text{mol/L}$ was observed, and was statistically significant in relation to the B measurement the day before. During the last day, the level of TAS before treatment (D) was $176.2 \mu\text{mol/L}$, decreased significantly at 30 min after stimulation (E) and remained at a similar level on the next day morning after the last of the sessions (F).

So they demonstrated an increase in leucocytes, monocytes and lymphocytes after ten repeated exposures of WBC in healthy subjects and concluded that repeated expositions to extremely low temperatures use in cryostimulation have mobilization effect on immunological system. According to this study, Changes in the number of leukocytes, maintained elevated level of IL-6 and changes in the total oxidative and antioxidative status,



confirm the significance of cryostimulation as a form of physiotherapy in treating sport-related traumas, inflammations and tissue impairments. Increased IL-6 concentrations associated with cryostimulation are a good argument for using cryotherapy in increasing the body's immunity.

Risks of upper respiratory infections were elevated in athletes who performed important training loads because of the decrease in immune defenses and/or the increase of some stress hormones (19). The WBC would permit to decrease these risks with by limiting the post exercise immunological alteration.

3.2.4. Effects of the WBC on Delayed Onset Muscle Soreness (DOMS) and on the pro-oxidant anti-oxidant balance

High intensity exercise can create muscular pain which can be immediate and last several days: the DOMS. This phenomenon is linked to cellular damage consecutive to the inflammatory response and to the excitation/contraction association. These damages are due to the achievement of unusual or high intensive exercises. The DOMS causes a decrease in muscular performance and the time for total recovery can last two weeks (7). Moreover, physical exercise, or training, causes microtraumatism of muscular fibers in skeletal muscles, probably due to the lipid peroxidation caused by free radicals. These damages of cellules and sarcoplasmic membranes are accompanied by the accumulation of intracellular calcium and caused myofibril disruption. These structural changes are going to be followed by the release of some intracellular enzymes, particularly the lysosomale hydrolases like acid phosphatase (AcP), arylsulphatase (ASA) and cathepsin D (CTS D) (2).

In a preliminary study, Wozniak, *et al.* (27) studied The effect of whole-body cryostimulation (WBC) on the biomarkers of oxidative stress, lysosomal enzymes, creatine kinase and cortisol.

Six elite rowers (aged 26.7 ± 3.6) participated in this study after approval by the Bioethical Committee at the Ludwik Rydygier Medical University (Bydgoszcz) and the subjects provided written informed consent. The rowers were subjected to a 6-day training cycle with training sessions twice a day. Each training session was preceded by WBC (two cryochamber treatments daily during six days). Before the training cycle with WBC, a control training session without WBC was conducted. Blood was obtained from an antecubital vein before training and after the third and sixth day of training without WBC and training with WBC. Each day, the first session of cryostimulation was performed in the morning, before the start of exercise, while the second one was performed at a specified time during the day, before the next training session. During a single WBC treatment the subjects spent 3 min at a temperature between -125°C and -150°C .

Superoxide dismutase (SOD) activity in erythrocyte haemolysates was evaluated. Glutathione peroxidase (GPx) activity was measured in erythrocytes. The catalase (CAT) activity was determined, like the conjugated dienes (CD) and the concentration of thiobarbituric acid



reactive substances (TBARS) in erythrocytes and in plasma. Activity of lysosomal enzymes was assayed.

The findings showed that when training with WBC and without WBC was compared, the activity of SOD was found to be 44% lower ($p < 0.01$) and GPx 42% lower ($p < 0.05$) after the third day of training with WBC. The concentration of CD in the rowers' plasma after the third day of training with WBC was 35% lower than after the third day of training without WBC ($p < 0.05$). After the third day of training with WBC the level of CD in erythrocytes was twice as low ($p < 0.01$), and after the sixth day 34% lower ($p < 0.05$) than after training without WBC, while the concentration of TBARS in erythrocytes after the sixth day was more than 50% lower ($p < 0.001$) than after training without WBC. The activity of AcP in the rowers' blood serum was more than 50% lower after the third day of training with WBC than after the third day of the training cycle without WBC ($p < 0.05$).

After training without WBC, the activity of GPx in the erythrocytes of the rowers increased almost twofold ($p < 0.01$) and SOD by 74% ($p < 0.01$) after the first 3 days of training without WBC as compared with the activity before training started. After the sixth day of training without WBC the activity of both enzymes had not changed and was still higher than before training. The activity of GPx increased by 65% ($p < 0.01$) after the sixth day of training with WBC as compared with the activity before training started. The concentration of CD in erythrocytes increased by 93% ($p < 0.01$) after the first three days of training without WBC and TBARS by 56% after 6 days ($p < 0.01$). The CD content in erythrocytes after 6 days, on the other hand, decreased slightly, but it was still 75% higher than the pre-training value ($p < 0.01$). WBC led to a 41% decrease in the level of TBARS in erythrocytes in the rowers' blood after the first 3 days of training exercises ($p < 0.05$).

The CK activity in the serum increased more than twofold after the first three days of training without WBC ($p < 0.05$). After the sixth day of training the activity of CK increased slightly and was 2.5 times higher than before training started ($p < 0.001$). No statistically significant changes in CK activity were found after the training with WBC. The concentration of cortisol in the serum after the first 3 days of training without WBC increased by 25% ($p < 0.01$) and after the sixth day of training with WBC was 13% higher than before training ($p < 0.05$).

So when both types of training are compared, a lower activity of SOD and GPx in the erythrocytes of the rowers was found after the third day with a simultaneous lower concentration of lipid peroxidation products when training was preceded by two WBC sessions per day. This suggests that the action of extremely low temperatures facilitates the maintenance of the prooxidant-antioxidant balance.

In the present study they also revealed lower concentration of both investigated lipid peroxidation products, TBARS and CD, in erythrocytes after the training with whole-body cryostimulation as compared to the training cycle without WBC, while in blood plasma only the CD level was lower when the exercise was preceded by exposure to extremely low temperatures. Erythrocytes transport oxygen to tissues and exercise-induced oxidative stress increases erythrocyte damage for example by erythrocytes' membrane lipid peroxidation. Decreased levels of lipid peroxidation products may testify to the fact that WBC diminishes the erythrocyte oxidative damage.

When the training was preceded by WBC no statistically significant changes in the activity of CK were found. The obtained results indicate that WBC reduces the extent of injury to the



muscle fibers. For the authors, the beneficial effect of stimulation using extremely low temperatures on the maintenance of prooxidant-antioxidant balance may be responsible for the stabilizing effect of WBC on membranes of both muscle cells and lysosomes.

When training was associated with WBC an increase in the concentration of cortisol was noted only after the sixth day. Intensity and duration of training contribute significantly to changes in cortisol concentration in circulating blood. The delayed reaction of the organism to exercise after training with WBC confirms that the action of extremely low temperatures alleviates stress.

The authors concluded that when rowers' training sessions were preceded by WBC, the risk of oxidative stress induced by exercise was reduced. Extremely low temperatures alleviate physical stress and reduce the extent of injury to muscle fibers. The results obtained in this paper indicate that whole-body cryostimulation is an effective and safe method for limiting exercise-induced damage and practical introduction of WBC to sport medicine may widely enrich the treatment applied so far, especially focused on biological regeneration demonstrated that the WBC reduced the expansion of the damages in muscular fibers. For them the beneficial effect of stimulation using extremely low temperatures on the maintenance of pro oxidant-antioxidant balance that has been demonstrated in this paper may be responsible for the stabilizing effect of WBC on membranes of both muscle cells and lysosomes.

In another study, Wozniak, *et al.* (28) measured the effect of WBC in the activity of certain lysosomale hydrolases: AcP, ASA and cathepsin D during physical training in kayakers.

This study was performed in 21 men of the Olympic kayak Team of Poland (aged 24.6±4.3) and ten untrained men (aged 26.9±4.1). The kayakers were subjected to a ten-day training cycle, in which training sessions were preceded by whole-body cryostimulation three times a day, for 3 min, at -120 to -140°C. Before the training, a control training session without cryostimulation was conducted. The untrained men had one treatment of the cryochamber at a temperature of -120°C for 3 min. Each entry to the cryochamber was preceded by a 10–20 s adaptation in the vestibule at a temperature of -60°C.

Venous blood was obtained from an antecubital vein before training and after the sixth and tenth day of training without cryostimulation and training combined with three times a day whole-body cryostimulation. Blood samples were obtained from the untrained men three days before cryostimulation and 20 min after cryostimulation.

The experimental procedures complied with the Helsinki declaration of 1975 and were accepted by the Bioethical Committee at the Ludwik Rydygier Medical University in Bydgoszcz (KB/132/2002). Each subject signed an informed consent before the study.

Single whole-body cryostimulation treatment in untrained men did not change the activity of AcP, CTS D and ASA. However, there was a tendency for the ASA and CTS D activity to decrease 20 min after the cryo-chamber was observed.

No statistically significant change in the activity of AcP and ASA took place in the blood serum of the kayakers after 10 days of training without cryostimulation. After the sixth day of training without cryostimulation, the activity of CTS D increased more than twofold ($p < 0.001$).



After the sixth day of training preceded by cryostimulation, the activity of ASA decreased by about 45% ($p < 0.001$). The activity of AcP also decreased and was 34% lower after the tenth day ($p < 0.05$). Cryostimulation treatments induced an almost twofold ($p < 0.001$) increase in the activity of CTS D after 6 days of training. After the tenth day, the activity of CTS D decreased slightly, remaining higher than before training.

After the sixth day of training with cryostimulation, the activity of ASA was 46% lower ($p < 0.001$), while that of AcP was 32% lower ($p < 0.05$) than after the sixth day of training without cryostimulation. A 47% lower ($p < 0.001$) activity of ASA was also demonstrated after the tenth day of training with cryostimulation. Comparing the training with and without cryostimulation did not reveal a statistically significant difference in the activity of AcP after the tenth day. The activity of this enzyme was, however, slightly lower when the training was preceded by the action of extremely low temperatures. No statistically significant differences were shown when comparing the activity of CTS D after training with and without cryostimulation, after the sixth day. The activity was, nevertheless, slightly lower when the training was preceded by whole-body cryostimulation.

After a single cryostimulation treatment, the activity of CK of the untrained men decreased by 30% ($p < 0.05$).

The activity of CK increased almost threefold ($p < 0.001$) after the sixth day of training without cryostimulation. After the tenth day of training, the activity of this enzyme decreased, but remained, nevertheless, higher than before training ($p < 0.001$).

Cryostimulation caused a twofold increase in the activity of CK after the 6 days of training ($p < 0.05$). The activity of CK after the sixth day of training with cryostimulation was 34% lower than after the sixth day of training without cryostimulation ($p < 0.05$). After the tenth day of training, no statistically significant differences were shown in the activity of CK. The activity of this enzyme was, nevertheless, slightly lower when the training was preceded by cryostimulation.

After a single treatment of the untrained men in the cryochamber, cortisol did not change. The concentration of cortisol increased by 23% after the first 6 days of training without stimulation in the cryochamber ($p < 0.05$) and remained at that level after the tenth day. Cryostimulation during the day did not result in significant changes in the concentration of cortisol after 6 days of training. There was a tendency for cortisol to increase after the sixth day of training with cryostimulation and to decrease slightly after the tenth day.

After training, with and without cryostimulation, no significant differences were found in cortisol, but it was, nevertheless, lower during training preceded by cryostimulation.

So they found in this study an increased in CTS D and a tendency of increase for the AcP and the ASA, a normal reaction after an increase of physical activity. However, they observed a tendency for the concentration in AcP, ASA, CTS D to be less elevated after training preceded by a WBC exposure. So the WBC could increase the membrane stability of the lysosome. According to Zagrobelny, *et al.* (29), it's due to the increase in adrenocorticotrophic hormone (ACTH) which stabilizes lysosomal membranes in response to cold stimuli.

Moreover, they observed a less important increase in cortisol after training preceded by a WBC exposure than without exposure. The cortisol is an indicator of physical stress.



They found the same thing for the creatine kinase, which is an indicator in muscular degradation.

According to these studies, the WBC enhances recovery because it induces a decreased of the damage in muscular cells and fibers after exercise and a decreased in the exertion stress. Thus DOMS and muscular pain may be reduced with this method and the time for recovery can be faster.

In sport domain, the WBC is known to enhance the physical recovery. According to these studies, it has been demonstrated a decreased in the apparition of the inflammatory syndrome, the oxidative stress, the damage in muscular cells and fibers after exercise and a decreased in the exertion stress. The WBC has an effect on the ANS which contributes to improve the recovery by accelerate the metabolic wastes elimination, by the more rapid return of the basal heart rate and by the increase of the well-being and pleasure sensations.

4. Posology

4.1. Number of exposures

According to the study, the posology varied in function of the researched effects and the population studies. The WBC has acute and chronic effects.

In the medical domain, there were daily exposures. There had at least 7 days of exposure with one to three exposures per day. There were sometimes followed kinesitherapy sessions because of the analgesic effect which allows a greater movement mobility of the patients.

In the sport recovery domain, the can be placed before the activity if you want to reduced DOMS and muscular pain by an antioxidant effect and a decreased in the exertion stress. If you want to have a faster recovery, you can place the WBC after the physical exercise to decrease the inflammatory syndrome. One exposure can be sufficient to have an effect on inflammatory syndrome, 5, 10 or 20 exposures are also used for decreased the inflammatory syndrome, the oxidative stress and increased the immunological status.

Thus, Cryantal will suggest various protocol of duration depending on the target population. For pathological population, the protocol will be 10 exposures with at least one exposure per day. For sports population the protocol will be one, five, ten or thirty exposures in terms of the effects researched by the sports team. These exposures can be placed before or after the exercises, or both.

4.2. Temperature and duration of exposures

In all of the study, WBCT was used. The temperature varied to -110 to -160°C. The durations varied between 2 to 3 minutes of exposure.



APPENDIX B: METHODS AND SELECTION CRITERIA

1. Date of search

Period covered by the research: 10 years.

The researches were effectuated from November 2013 to January 2014.

The person in charge of research is a PhD study of the Sport Faculty of the University of Franche-Comté (France). His name is Romain Bouzigon. He received a CIFRE grant from the French Government and he is employed by Cryantal SA. He is supervised by Benoit Dugue and Frederic Grappe. Benoit Dugue (PhD, University of Poitiers, Sport Faculty, France) has for a long time been investigating physiological adaptations due to strong stimuli and among them adaptations related to cold exposure. Frederic Grappe (PhD, University of Franche-Comté, Sport Faculty, France) is involved in studying physiological and biomechanical factors that could enhance physical performance in high level cyclists. The medical referent was the Doctor Jean Denis Rouillon, PhD, MD, (sports medicine) emerita professor, has been investigating physiological adaptations related to health and performance.

2. Literature sources used to identify data

The computerized literature search began in November 2013 in the database Google Scholar which includes most of the scientific articles databases (Pubmed, Sciencedirect, Google Scholar, MEDLINE, EMBASE), review databases (Cochrane Collaboration) using a combination of 11 key words or phrases (whole-body cryostimulation, whole-body cryotherapy, rheumatoid arthritis, sport recovery, multiple sclerosis, depressive). This was complimented with citation tracking of key primary and review articles. All searches were carried out independently, using predetermined inclusion criteria and extraction forms.

Inclusion Criteria:

- Addresses performance, risks, and/or safety of the product or comparable product,
- Product used in way similar to indications for use of the product,

Exclusion Criteria:

- Paper describes technical or non-clinical study results only, including animal or cadaver studies,
- Study contains unsubstantiated opinions,
- Study contains insufficient information to undertake a scientific analysis,
- Full text of paper is available only in a language for which an English translation is not readily available.

Results of the researches on Google Scholar:

- Whole-body cryostimulation: 99 results: 11 articles kept:

Wozniak 2007, Hausswirth 2011, Pournot 2011, Lubkowska 2011, Hausswirth 2013, Stanek 2010, Wozniak 2013,

- Whole-body cryotherapy sport recovery: 92 results: 1 article kept: Banfi 2009,



- Whole-body cryotherapy rheumatoid arthritis: 388 results: 1 article kept: Hirvonen 2006, Stanek 2010,
- Whole-body cryotherapy multiple sclerosis: 57 results: 1 article kept: Miller 2010,
- Whole-body cryotherapy depressive: 548 results: 1 article kept: Rymaszewska 2008.

3. Source of the adverse effects

The Cryantal MD is not yet on the market, so we used other similar MD.

APPENDIX C: RESEARCH PROTOCOL OF THE LITERATURE

Google Scholar:

- scholar.google.fr,
- November 2013 - January 2014,
- 2004-2014,
- Selection criteria to choose articles:

The searches were based on the WBCC device. So the main criterion to choose the studies was the use of a WBCC which can reach temperature of -110°C or less. We targeted a large sample group composed of different types of patients, elderly subjects, and athletes. The pathologic population comprised patients who suffered from rheumatoid or arthritis diseases or who presented anxiety and depression syndrome. These studies must be objective, with statistical analyses and a sufficiently important population. The main aim of these studies must be the effects of the WBC on the parameter studied,

- Key words:
 - 1) Whole-Body Cryostimulation,
 - 2) Whole-Body Cryotherapy,
 - 3) Whole-body cryotherapy rheumatoid arthritis,
 - 4) Whole-body cryotherapy multiple sclerosis,
 - 5) Whole-body cryotherapy depressive,
 - 6) Whole-body cryotherapy sport recovery.

- Results per key words:

- 1) 99 results,
- 2) 92 results,
- 3) 388 results,
- 4) 57 results,
- 5) 548 results,
- 6) 92 results.



APPENDIX D: REFERENCES

1. Al Haddad H, Laursen PB, Ahmaidi S, and Buchheit M. Influence of cold water face immersion on post-exercise parasympathetic reactivation. *European journal of applied physiology* 108: 599-606, 2010.
2. Armstrong RB. Initial events in exercise-induced muscular injury. *Medicine and science in sports and exercise* 22: 429-435, 1990.
3. Banfi G, Melegati G, Barassi A, and Eril GM. Beneficial effects of the whole-body cryotherapy on sport haemolysis. *Journal of Human Sport and Exercise* 4, 2009.
4. Barnett A. Using recovery modalities between training sessions in elite athletes: does it help? *Sports Med* 36: 781-796, 2006.
5. Braun J and Sieper J. Ankylosing spondylitis. *Lancet* 369: 1379-1390, 2007.
6. Buchheit M, Papelier Y, Laursen PB, and Ahmaidi S. Noninvasive assessment of cardiac parasympathetic function: postexercise heart rate recovery or heart rate variability? *American journal of physiology Heart and circulatory physiology* 293: H8-10, 2007.
7. Cheung K, Hume P, and Maxwell L. Delayed onset muscle soreness : treatment strategies and performance factors. *Sports Med* 33: 145-164, 2003.
8. Franssen J and van Riel PL. The Disease Activity Score and the EULAR response criteria. *Clinical and experimental rheumatology* 23: S93-99, 2005.
9. Hausswirth C, Louis J, Bieuzen F, Pournot H, Fournier J, Filliard JR, and Brisswalter J. 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, 2011.
10. Hausswirth C, Schaal K, Le Meur Y, Bieuzen F, Filliard JR, Volondat M, and Louis J. Parasympathetic activity and blood catecholamine responses following a single partial-body cryostimulation and a whole-body cryostimulation. *PloS one* 8: e72658, 2013.
11. Hirose L, Nosaka K, Newton M, Laveder A, Kano M, Peake J, and Suzuki K. Changes in inflammatory mediators following eccentric exercise of the elbow flexors. *Exercise immunology review* 10: 75-90, 2004.
12. Hirvonen HE, Mikkelsson MK, Kautiainen H, Pohjolainen TH, and Leirisalo-Repo M. Effectiveness of different cryotherapies on pain and disease activity in active rheumatoid arthritis. A randomised single blinded controlled trial. *Clinical and experimental rheumatology* 24: 295-301, 2006.
13. Khan MA, Mathieu A, Sorrentino R, and Akkoc N. The pathogenetic role of HLA-B27 and its subtypes. *Autoimmunity reviews* 6: 183-189, 2007.
14. Lee DM and Weinblatt ME. Rheumatoid arthritis. *Lancet* 358: 903-911, 2001.
15. Lubkowska A, Szygula Z, Chlubek D, and Banfi G. 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, 2011.
16. Lubkowska A, Szygula Z, Klimek AJ, and Torii M. Do sessions of cryostimulation have influence on white blood cell count, level of IL6 and total oxidative and antioxidative status in healthy men? *European journal of applied physiology* 109: 67-72, 2010.
17. Miller E, Mrowicka M, Malinowska K, Mrowicki J, Saluk-Juszczak J, and Kędziora J. The effects of whole-body cryotherapy on oxidative stress in multiple sclerosis patients. *Journal of Thermal Biology* 35: 406-410, 2010.
18. Nielsen HG. Exercise and Immunity. 2013.



19. Nieman DC. Exercise, upper respiratory tract infection, and the immune system. *Medicine and science in sports and exercise* 26: 128-139, 1994.
20. Pedersen BK and Toft AD. Effects of exercise on lymphocytes and cytokines. *Br J Sports Med* 34: 246-251, 2000.
21. Pournot H, Bieuzen F, Louis J, Mounier R, Fillard JR, Barbiche E, and Hausswirth C. Time-course of changes in inflammatory response after whole-body cryotherapy multi exposures following severe exercise. *PLoS one* 6: e22748, 2011.
22. Rymaszewska J, Ramsey D, and Chladzinska-Kiejna S. whole-body cryotherapy as adjunct treatment of depressive and anxiety disorders. *Arch Immunol Ther Exp* 56: 63-68, 2008.
23. Schaal K, Le Meur Y, Bieuzen F, Petit O, Hellard P, Toussaint JF, and Hausswirth C. Effect of recovery mode on postexercise vagal reactivation in elite synchronized swimmers. *Applied physiology, nutrition, and metabolism = Physiologie appliquee, nutrition et metabolisme* 38: 126-133, 2013.
24. Sospedra M and Martin R. Immunology of multiple sclerosis. *Annual review of immunology* 23: 683-747, 2005.
25. Stanek A, Cieslar G, Strzelczyk J, Kasperczyk S, Sieron-Stoltny K, Wiczowski A, Birkner E, and Sieron A. Influence of cryogenic temperatures on inflammatory markers in patients with ankylosing spondylitis. *Polish Journal of Environmental Studies* 19: 167-175, 2010.
26. Urso ML and Clarkson PM. Oxidative stress, exercise, and antioxidant supplementation. *Toxicology* 189: 41-54, 2003.
27. Wozniak A, Mila-Kierzenkowska C, Szpinda M, Chwalbinska-Moneta J, Augustynska B, and Jurecka A. Whole-body cryostimulation and oxidative stress in rowers: the preliminary results. *Archives of medical science : AMS* 9: 303-308, 2013.
28. Wozniak A, Wozniak B, Drewa G, Mila-Kierzenkowska C, and Rakowski A. The effect of whole-body cryostimulation on lysosomal enzyme activity in kayakers during training. *European journal of applied physiology* 100: 137-142, 2007.
29. Zagrobelny Z, Halawa B, Negrusz-Kawecka M, Spring A, Gregorowicz H, Wawrowska A, and Rozwadowski G. [Hormonal and hemodynamic changes caused by whole body cooling in patients with rheumatoid arthritis]. *Polskie Archiwum Medycyny Wewnętrznej* 87: 34-40, 1992.

APPENDIX E: EVALUATION OF THE CLINICAL LITERATURE

Suitability Criteria	Description	Grading System
Appropriate device	Were the data generated from the device in question?	D1 Actual device D2 Comparable device (if D2 will be in the Equivalence Table)



		D3	Other device or unknown
Appropriate device application	Was the device used for the same intended use (e.g., methods of deployment, application, etc.)?	A1 A2 A3	Same use Minor deviation Major deviation
Appropriate patient group	Were the data generated from a patient group that is representative of the intended treatment population (e.g., age, sex, etc.) and clinical condition (i.e., disease, including state and severity)?	P1 P2 P3	Applicable Limited Different population
Acceptable report/data collation	Do the reports or collations of data contain sufficient information to be able to undertake a rational and objective assessment?	R1 R2 R3	High quality Minor deficiencies Insufficient information

Ref. No.	Author(s)	D: Appropriate device	A: Device application	P: Patient population	R: Report/data collation
1	Banfi G. et Al. 2009	D2	A1, A2	P1, P2	R1
2	Hauswirth C. et Al. 2011	D2	A1, A2	P1, P2	R1
3	Hauswirth C. et Al. 2013	D2	A1, A2	P1, P2	R1
4	Hirvonen HE. et Al. 2006	D2	A1	P1	R1
5	Lubkowska A. et Al. 2011	D2	A1	P1, P2	R1
6	Miller E. et Al. 2010	D2	A1	P1	R1
7	Pournot H. et Al. 2011	D2	A1, A2	P1, P2	R1
8	Rymaszewska J. et Al. 2008	D2	A1	P1	R1
9	Stanek A. et Al. 2010	D2	A1	P1	R1
10	Wozniak A. et Al. 2013	D2	A1, A2	P1, P2	R1
11	Wozniak A. et Al. 2007	D2	A1, A2	P1, P2	R1

Suitability Criteria	Description	Grading
Data source type	Was the design of the study appropriate?	Yes No
Outcome measures	Do the outcome measures reported reflect the	Yes



	intended performance of the device?	No
Appropriate follow up	Is the duration of follow-up long enough to assess whether duration of treatment effects and identify complications?	Yes No
Statistical significance	Has a statistical analysis of the data been provided and is it appropriate?	Yes No
Clinical significance	Was the magnitude of the treatment effect observed clinically significant?	Yes No

Ref. No.	Author(s)	Data source type?	Outcome measures?	Appropriate follow-up?	Statistically significant?	Clinically significant?
1	Banfi G. et Al. 2009	Yes	Yes	Yes	Yes	
2	Hausswirth C. et Al. 2011	Yes	Yes	Yes	Yes	
3	Hausswirth C. et Al. 2013	Yes	Yes	Yes	Yes	
4	Hirvonen HE. et Al. 2006	Yes	Yes	Yes	Yes	
5	Lubkowska A. et Al. 2011	Yes	Yes	Yes	Yes	
6	Miller E. et Al. 2010	Yes	Yes	Yes	Yes	
7	Pournot H. et Al. 2011	Yes	Yes	Yes	Yes	
8	Rymaszewska J. et Al. 2008	Yes	Yes	Yes	Yes	
9	Stanek A. et Al. 2010	Yes	Yes	Yes	Yes	
10	Wozniak A. et Al. 2013	Yes	Yes	Yes	Yes	
11	Wozniak A. et Al. 2007	Yes	Yes	Yes	Yes	

APPENDIX F: POST-MARKET FOLLOW UP

Not applicable for Cryantal.

APPENDIX G: CLINICAL STUDIES

Not applicable for Cryantal.

APPENDIX H: TABLE OF EQUIVALENCE OF SIMILAR MD

Not applicable for Cryantal.

4. Communication orale Séminaire « Jeunes chercheurs » C3S. L'image dans la recherche. Besançon, 27 mars 2013.

CHAPITRE X

De l'immersion en eau froide à la cryothérapie : Histoire de la représentation du froid

Romain BOUZIGON¹

L'image est caractérisée comme une représentation visuelle ou mentale d'un être vivant, d'un objet ou même d'un concept. Ce document a pour sujets l'étude de la représentation du froid à travers l'histoire et les sociétés, ainsi que son évolution à l'intérieur de certains champs d'utilisation et d'application.

Des méthodes d'Hippocrate au V^e siècle avant J.C., jusqu'à la création des nouvelles technologies de cryostimulation « corps entier », l'utilisation et la représentation du froid dans nos sociétés n'ont jamais cessé d'évoluer. Ces transformations vont être différentes en fonction des zones géographiques. Ainsi, dans les pays du sud de l'Occident, les thérapies par le froid, bien qu'utilisées depuis longtemps de façon empirique, n'ont pas la même importance que les thérapies utilisant le confort de la chaleur. *A contrario*, les pays nordiques mettront davantage l'accent sur la culture médicale utilisant le froid. Il est temps d'établir un rapport succinct des différentes périodes, technologies et utilisation du froid au cours du temps.

∴

I. HISTOIRE DE L'UTILISATION DU FROID : DE L'ANTIQUITÉ À NOS JOURS

Les premières utilisations connues du froid dans un but thérapeutique datent de 2500 ans avant J.C. dans le peuple Egyptien. Ensuite, ce sont les philosophes grecs du V^e siècle avant J.C. qui vont user de cette technique. Hippocrate va définir la théorie des quatre éléments. Pour lui, quatre éléments composent chaque partie de la matière et des corps composés. Les éléments primaires vont donc être le feu, l'air, l'eau et la terre auxquels sont associés quatre qualités primaires, le chaud, le froid, le sec et l'humide. De cette théorie va découler un principe fondamental de la médecine qui va se mettre en place à partir des notions de couples et d'opposés. En fonction des pathologies, Hippocrate va employer deux procédés contradictoires, soit il tentera de soigner le mal par son contraire comme par exemple le froid par le chaud ou le chaud par le froid (notion d'opposés), soit il utilisera des phénomènes similaires (notion de couples). Les aphorismes d'Hippocrate citent l'utilisation de l'eau froide des torrents et l'usage de la neige pour traiter les tuméfactions (Sournia, 1997).

Par la suite, le froid va également apparaître dans la médecine musulmane au IX^e siècle. Cette médecine va se distinguer en deux étapes : La prévention par l'hygiène et la nourriture saine, puis le traitement des maladies comme l'a attesté le docteur Al-Râzî (865-932) : « *Tant*

¹ Doctorant en sciences du sport, université de Franche-Comté, C3S (EA 4660), Axe 3 – Département Sport Santé.

que tu peux soigner à l'aide d'aliments, ne soigne pas avec des médicaments.» L'utilisation du froid dans la médecine musulmane va donc être concentrée dans le refroidissement et la conservation des aliments et des boissons, la température de ces aliments étant alors considérée comme source de traitement.

En Europe occidentale, l'utilisation du froid va être freinée par l'apparition d'un nouveau mode de conservation qui est le salage. Les techniques de conservation des aliments sont très anciennes, le néolithique (4000 ans avant J.C.) a vu les habitants du cercle polaire conserver et stocker ses denrées alimentaires dans des fosses de glace. Les civilisations Mésopotamienne, Egyptienne ou encore Musulmane utilisaient également le froid pour conserver leurs aliments. Mais en Europe occidentale, la découverte du salage a ralenti le développement des méthodes de froid dans la conservation des aliments. De ce fait, l'utilisation du froid dans les méthodes thérapeutiques a également été freinée. La seule trace de traitement par le froid recensée en Europe médiévale fut le soulagement d'une maladie dermatologique appelée hordéole (maladie du grain ou orgelet) avec l'application à même la peau d'une lame de couteau refroidie.

À partir du siècle des Lumières, l'Europe occidentale va rattraper son retard. En effet, nombre de nouvelles technologies de production de froid vont voir le jour : machine pneumatique du docteur William Cullen en 1748, machine frigorifique à compression d'éther d'Olivier Evans en 1805, à air de John Gorrie en 1844, ou encore à absorption de Ferdinand Carré en 1859, etc. Le français Charles Tellier (1828-1913) va contribuer à une avancée des techniques de froid. Il va installer trois machines à compression d'éther méthylique sur un vieux voilier transformé en bateau à vapeur (et renommé pour l'occasion « *Le Frigorifique* »), pour maintenir une température artificielle proche de 0° C. C'est ainsi que le 20 septembre 1876, le *Frigorifique* va partir de Rouen pour rejoindre Buenos Aires en 105 jours avec dans ses cales 30 tonnes de viande en bon état. Ce voyage marqua un tournant dans le monde de la conservation alimentaire.

Le nouvel élan de popularité du froid dans la médecine va succéder à la Campagne de Russie sous Napoléon en 1812. Le chirurgien de la Grande Armée, le docteur Dominique Larrey (1766-1842) va observer, lors de l'épisode de la retraite de Russie, les effets anesthésiques du froid sur les soldats blessés. Il va rapporter cette méthode en France pour l'adapter au monde de la chirurgie. Le XIX^e siècle a également vu naître la poche de glace qui va pouvoir être utilisée quotidiennement dans le soulagement des « petits » maux, ainsi que la cryoconservation pour le maintien en vie de tissus et d'organes.

De nos jours, et depuis quelques années, dans les pays nordiques, l'utilisation du froid va emprunter un versant plus traditionnel. En effet, une grande partie de la population pratique la natation hivernale, ou natation en eau froide. Il s'agit de parcourir certaines distances (la plupart du temps 25 mètres) dans une eau très froide. Il existe même des championnats internationaux de natation hivernale. Cette pratique est courante chez les jeunes comme chez les personnes âgées qui déclarent que l'eau froide soulage les maux dus aux rhumatismes, les douleurs articulaires et favorisent un état de bien-être.

II. LES TECHNIQUES MODERNES D'UTILISATION DU FROID

La culture du froid va lentement évoluer sous l'influence de certaines équipes scientifiques allemandes, françaises, polonaises et finlandaises dans les années 1970 avec de nombreux dispositifs de traitement par basses températures.

Il existe par exemple en médecine deux méthodes de traitement par le froid utilisées chez des patients ayant subi un arrêt cardiaque : le refroidissement intranasal et le refroidissement intraveineux. Le but est de créer une hypothermie thérapeutique pour faire diminuer la température centrale du patient entre 32° et 34° C et induire un effet neuroprotecteur. La méthode intraveineuse consiste à injecter une solution saline glacée (4°C). La méthode intranasale est la vaporisation d'un liquide de refroidissement à évaporation rapide dans la cavité nasale à l'aide d'un cathéter non invasif. Cette méthode a été définie comme plus efficace et plus rapide que la première.

Dans le milieu sportif, plusieurs techniques ont été mises en place pour tenter d'améliorer les performances lors d'efforts réalisés sous des contraintes thermiques importantes (exemple des JO de Pékin en 2008) ou d'accélérer la récupération post-exercice.

A. Refroidissement localisé par accumulateurs thermiques ou poches de glace

La méthode de refroidissement par accumulateurs thermiques (packs de gel préalablement placés dans un congélateur et qui gardent le froid pendant un certain temps) consiste à munir les athlètes de gilets ou « *ice shirt* » munis de ces accumulateurs, avant, pendant ou après un exercice. Ainsi Uckert *et al.*, en 2007, ont trouvé une amélioration des performances pour un exercice de course à pied dans un environnement chaud (30-32° C/50 % d'humidité) chez des sujets qui portaient un gilet rafraîchissant (0-5° C) 20 minutes avant le départ du test. Gonzales *et al.*, (2012) ont également rapporté une amélioration des performances sur un test Wingate sur ergocycle chez des cyclistes entraînés qui portaient un *ice shirt*.

Des techniques comme le massage avec glace, l'application de poches de glace et l'immersion d'un membre en eau froide ont été comparées pour leurs effets analgésiques. Ainsi, l'immersion en eau froide s'est révélée comme étant la méthode la plus efficace pour diminuer la Vitesse de Conduction Nerveuse (VCN) sur le triceps sural (Herrera *et al.*, 2011). Le refroidissement des mains et avant-bras a fait également l'objet de plusieurs études, notamment chez les sapeurs-pompiers. Ainsi a-t-il été démontré que cette méthode permettait la diminution des contraintes de stress physiologique liées aux conditions thermiques externes lors d'un exercice de lutte contre l'incendie (Barr *et al.*, 2009). La diminution du stress thermique a aussi été observée pour le refroidissement de la tête et de la nuque lors d'un effort de course à pied de 45 minutes à une température environnementale de 21° C (Gordon *et al.*, 1990). Il existe encore des méthodes de refroidissement des jambes avec des jambières rafraîchissantes (De Pauw *et al.*, 2011), de refroidissement des paumes de mains avec des dispositifs d'échange thermiques rapides (Amorim *et al.*, 2010).

Toutes ces méthodes sont utilisées pour améliorer la récupération ou soulager des douleurs sur un membre ciblé. Elles ont contribué au développement des nouvelles techniques de refroidissement qui vont cette fois impliquer une exposition relativement importante, voire

totale du corps, telles que les immersions en eau froide ou encore la Cryostimulation Corps Entier (CCE).

C. Refroidissement par ingestion de glace

Ross et al. (Ross *et al.*, 2011) ont testé les effets de l'ingestion de glace avant un exercice de simulation de course cycliste chez onze cyclistes bien entraînés. Ils voulaient observer des éventuels effets bénéfiques pour un exercice en environnement chaud (32°C-35°C) et humide (50%-60%). Ils ont trouvé une augmentation de la puissance moyenne développée de 3% (environ 8W) et amélioration du temps d'exercice de 1 minute et 6 secondes par rapport au groupe témoin. Cette technique de pre-cooling serait donc bénéfique pour la performance en environnement chaud et humide.

B. Refroidissement par immersion en eau froide

Les méthodes d'immersion se sont développées de manière importante. Il existe des immersions en eau froide, des immersions en eau tempérée, des immersions contrastées. Elles peuvent être utilisées sur une partie du corps ou sur le corps en entier (tête en dehors de l'eau), et être pratiquées assis et debout. Pour l'immersion en eau froide (eau entre 4° et 16° C), les athlètes se glissent dans des bacs à la fin des compétitions ou des entraînements pour tenter d'accélérer leur récupération. Cette méthode va garantir un pouvoir analgésique avec la baisse de la vitesse de conduction nerveuse (Cochrane, 2004) et une vasoconstriction périphérique qui va entraîner une augmentation du volume sanguin central et induire une diminution de la fréquence cardiaque (Mourot *et al.*, 2008).

Cette technique est donc intéressante lorsqu'un athlète doit récupérer rapidement après un entraînement la veille d'une compétition, ou même entre deux épreuves lors d'un tournoi. Au niveau de ses effets physiologiques, elle ressemble sur beaucoup de points à une autre technique qui est actuellement sur le devant de la scène en termes de récupération par le froid : la CCE.

C. Refroidissement par Cryostimulation Corps Entier

La CCE est une méthode de refroidissement corporel qui consiste à exposer entièrement des sujets en sous-vêtements équipés de bonnet, gants, chaussettes, chaussures et masques de protection buccales dans des chambres hypothermiques pendant une durée très courte (2 à 4 minutes) à un froid sec (-110° à -160° C). Cette technique a vu le jour au Japon en 1979 avec la première chambre hypothermique mise en place par Takachi Yamauchi. Depuis, plusieurs types de chambre hypothermique ont vu le jour. Il existe les chambres « corps entier » dans lesquelles l'athlète rentre complètement dans une chambre fermée munie de trois sas : un à -10° C, un à -60° C et un à -110° C. Ces chambres fonctionnent avec un système de compresseur à air qui aspire l'air, le refroidit et le propulse dans la chambre. Il existe également des technologies appelées *Cryosana* qui utilisent de l'azote pour créer du froid. Ces cabines ressemblent à une cabine de douche, à ceci près, que la tête des sujets reste en dehors de la cabine. L'azote liquide, contenu dans des cuves rattachées à la cabine va, en passant à l'état gazeux, créer du froid qui va être pulsé à l'intérieur de la cabine.

Yamauchi avait à la base imaginé cette technologie pour étudier les effets du froid dans le traitement de la polyarthrite chronique évolutive (Yamauchi *et al.*, 1979). La CCE a ensuite été reprise dans divers contextes tels que les troubles de l'humeur et la dépression, les troubles du sommeil et le bien-être, la récupération sportive et les adaptations au froid. Elle a ainsi fait l'objet de nombreuses études, notamment dans le traitement de dépressions, fibromyalgies, douleurs articulaires, troubles mentaux et traumatologiques, etc.

Selon ces études, cette technique est à la base d'améliorations de la santé mentale chez des sujets atteints de troubles de l'anxiété ou de dépressions (Rymaszewska *et al.*, 2008 ; Rymaszewska *et al.*, 2003), et favoriserait l'augmentation de la sensation de bien-être et la diminution des troubles du sommeil (Hauswirth *et al.*, 2011) car elle contribuerait à la diminution de la perturbation des rythmes biologiques, tel que le cycle veille/sommeil. De plus, la CCE permet la diminution du stress oxydant, que ce soit chez des sujets atteints de sclérose en plaques (Miller *et al.* 2012 ; Miller *et al.* 2011), chez des sujets sains sportifs (Wozniak *et al.*, 2007) ou chez des sujets sains (Lubkwoska *et al.*, 2012).

Au niveau traumatologique, la CCE est source de soulagement des douleurs articulaires chroniques chez des patients atteints de pathologies telles que les spondylarthrites ankylosantes, grâce à ses effets analgésiques (Rymaszewska *et al.*, 2003 ; Stanek *et al.*, 2005) et va permettre de faciliter l'application de la physiothérapie et de l'ergothérapie (Metzger *et al.*, 2000). La température cutanée des sujets doit en revanche descendre en dessous de 13°C pour pouvoir prétendre à un effet analgésique (Bleakley *et al.*, 2010). Les effets anti-inflammatoires induit par la CCE (Banfi *et al.*, 2009 ; Lubkwoska *et al.*, 2011) contribuent également à l'accélération du rétablissement des dommages musculaires après un exercice physique (Hauswirth *et al.*, 2011). La CCE est efficace dans la réduction du processus inflammatoire, ce qui est expliqué par une vasoconstriction au niveau musculaire, par la diminution des cytokines pro-inflammatoires et l'augmentation des cytokines anti-inflammatoires (Pournot *et al.*, 2011).

La CCE marque donc un tournant dans les méthodes de traitement par le froid. Ces effets physiologiques sont proches de ceux retrouvés avec l'immersion en eau froide mais une session de CCE de 3 minutes reste cependant plus confortable qu'une immersion en eau froide de 20 minutes. La CCE est malgré tout une technologie assez onéreuse et encombrante par rapport à un bac à eau froide. Sa diffusion est pour cela encore assez difficile.

∴

De la température des aliments à leur conservation, des méthodes de soulagement des douleurs chroniques à la récupération sportive précompétitive, en passant par la natation hivernale traditionnelle pour le bien-être, le froid est présent de manière importante dans notre société et a évolué en même temps que l'Homme. Sa représentation ne se limite plus aujourd'hui au fléau hivernal qui peut rendre malade ou emporter les plus faibles ou le plus démunis. Il est désormais également vu comme pouvant être un atout. Il reste encore du chemin à parcourir pour que cette représentation puisse rentrer dans les mœurs, mais nous avons déjà bien avancé. Qui aurait pu dire à un sportif il y a tout juste 5 ans : « *Il faut que tu t'exposes au froid après ton effort pour récupérer plus rapidement ?* », la psychose de la théorie du coup de froid après entraînement

étant répandue de manière démesurée. Il existe de plus un écart dans cette représentation entre les sociétés, notamment en fonction de leur position géographique. A l'instar de certains philosophes Grecs qui considéraient le chaud comme la vie, et le froid comme la mort, nos sociétés ouest-occidentales ont une représentation du froid plutôt négative. Méconnu du grand public, celui-ci est encore considéré comme une source de mal, à l'origine des maladies et pouvant même provoquer la mort. Alors que nos voisins, plus coutumiers de l'utilisation thérapeutique du froid, le voient plutôt comme une source de bien-être, de vie. Les différences de représentation du froid entre les sociétés ont des origines historiques et géographiques, mais celles-ci semblent s'amenuiser avec le nouvel engouement de la recherche pour ces techniques thérapeutiques.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

AMORIM Fabiano, YAMADA Paulette, ROBERGS Robert et al. (2010), "Palm cooling does not reduce heat strain during exercise in a hot, dry environment", *Applied Physiology, Nutrition, and Metabolism*, n° 35, août, pp. 480-489.

BANFI Guisepppe, MELEGATI Gianluca, BARASSI Alessandra et al. (2009), "Effects of whole-body cryotherapy on serum mediators of inflammation and serum muscle enzymes in athletes", *Journal of Thermal Biology*, n° 34, octobre, pp. 55-59.

BARR David, GREGSON Warren, SUTTON Laura et al. (2009), "A practical cooling strategy for reducing the physiological strain associated with firefighting activity in the heat", *Ergonomics*, n° 52, avril, pp. 413-420.

BLEAKLEY Chris et HOPKINS Ty (2010), "Is it possible to achieve optimal levels of tissue cooling in cryotherapy ?", *Physical Therapy Reviews*, n° 15, août, pp. 344-350.

COCHRANE Darryl (2004), "Alternating hot and cold water immersion for athlete recovery: a review", *Physical Therapy in Sport*, n° 5, mai, pp. 26-32.

DE PAUW Kevin, DE GEUS Bas, ROELANDS Bart et al. (2011), "Effect of five different recovery methods on repeated cycle performance", *Medicine & Science in Sports & Exercise*, n° 43, mai, pp. 890-897.

GONZALES Benoit, HAGIN Vincent, GUILLOT Ronan et al. (2012), "Perceived and physiological effects of body cooling on mild-endurance and anaerobic performance under extreme heat and relative humidity", *IVème Congrès Annuel de la Société Suisse des Sciences du Sport*, Macolin, Suisse, 1^{er} et 2 mars.

GORDON Neil, BOGDANFFY Georges et WILKINSON Jody (1990), "Effect of a practical neck cooling device on core temperature during exercise", *Medicine & Science in Sports & Exercise*, n° 22, avril, pp. 245-249.

HAUSSWIRTH Christophe, LOUIS Julien, BIEUZEN François et al. (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*, n° 6, décembre, e27749.

HERRERA Esperanza, SANDOVAL Maria Cristina, CAMARGO Diana et al. (2011), “Effect of walking and resting after three cryotherapy modalities on the recovery of sensory and motor nerve conduction velocity in healthy subjects”, *Revista Brasileira de Fisioterapia*, n° 15, mai-juin, pp. 233-240.

KALES Stefanos, SOTERIADES Elpidoforos, CHRISTOUDIAS Stavros et al. (2003), “Firefighters and on-duty deaths from coronary heart disease: a case control study”, *Environnemental Health*, n° 2, novembre, pp. 2-14.

LUBKOWSKA Anna, DOŁĘGOWSKA Barbara, SZYGULA Zbigniew (2012), “Whole-Body Cryostimulation - Potential Beneficial Treatment for Improving Antioxidant Capacity in Healthy Men - Significance of the Number of Sessions”, *PloS one*, n° 7, octobre, e46352.

LUBKOWSKA Anna, SZYGULA Zbigniew, CHLUBEK Dariusz et al. (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*, n° 71, septembre, pp. 419-425.

METZGER Daniel, ZWINGMANN Christian, PROTZ Walter et al. (2000), “Whole-body cryotherapy in rehabilitation of patients with rheumatoid diseases--pilot study”, *Die Rehabilitation*, n° 9, avril, pp. 93-100.

MILLER Elzbieta, MARKIEWICZ Lukasz, SALUK Joanna et al. Ireneusz (2012), “Effect of short-term cryostimulation on antioxidative status and its clinical applications in humans” *European journal of applied physiology*, n° 112, mai, p. 1645-1652.

MILLER Elzbieta, MROWICKA Malgorzata, MALINOWSKA Katarzyna, MROWICKI Jerzy, SALUK-JUSZCZAK Joanna, KEDZIORA Jozef (2011), “Effects of whole-body cryotherapy on a total antioxidative status and activities of antioxidative enzymes in blood of depressive multiple sclerosis patients”. *The world journal of biological psychiatry : the official journal of the World Federation of Societies of Biological Psychiatry*, n° 12, avril, p. 223-227.

MOUROT Laurent, BOUHADDI Malika, GANDELIN Emmanuel et al. (2008), “Cardiovascular autonomic control during short-term thermoneutral and cool head-out immersion”, *Aviation, Space, and Environmental Medicine*, n° 79, janvier, pp. 14-20.

POURNOT Hervé, BIEUZEN François, LOUIS Julien et al. (2011), “Time-course of changes in inflammatory response after whole-body cryotherapy multi exposures following severe exercise”, *PloS one*, n° 6, août, e22748.

ROSS Megan, GARVICAN Laura, JEACOCKE Nikki et al. (2011) “Novel precooling strategy enhances time trial cycling in the heat”, *Med Sci Sports Exerc*, n°43, janvier, p. 123-133.

RYMASZEWSKA Joanna, RAMSEY David et CHLADZINSKA-KIEJNA Sylwia (2008) "Whole-body cryotherapy as adjunct treatment of depressive and anxiety disorders", *Archivum Immunologiae et Therapia Experimentalis*, n° 5, février, pp. 63-68.

RYMASZEWSKA Joanna, TULCZYNSKI Adam, ZAGROBELNY Zdzislaw et al. (2003) "Influence of whole body cryotherapy on depressive symptoms – preliminary report", *Acta Neuropsychiatrica*, n° 15, juin, p. 122-128.

SOURNIA Jean-Charles (1997), *Histoire de la médecine*. Paris, La Découverte.

STANEK Agata, SIERON Aleksander, CIESLAR Grzegorz et al. (2005), "The impact of whole-body cryotherapy on parameters of spinal mobility in patients with ankylosing spondylitis", *Ortopedia, traumatologia, rehabilitacja*, n° 7, juillet, pp. 549-554.

UCKERT Sandra et JOCH Winfried (2007), "Effects of warm-up and precooling on endurance performance in the heat", *British Journal of Sports Medicine*, n° 41, juin, pp. 380-384.

WOZNIAK Alina, WOZNIAK Bartosz, DREWA Gerard, et al. (2007), "The effect of whole-body cryostimulation on the prooxidant-antioxidant balance in blood of elite kayakers after training", *European journal of applied physiology*, n° 101, novembre, p. 533-537.

YAMAUCHI Takachi (1979) "The cryogenic therapy, the exercising therapy and the 24 hours rehabilitation", *IX Europäischer Kongress für Rheumatologie*, Wiesbaden, Allemagne, 8 septembre, Abstract n° 1054.

5. Communication orale Colloque « 3^{ème} journée Gilles COMETTI / La préparation physique : Du laboratoire au terrain », Dijon, 12 et 13 avril 2013.

Cryostimulation Corps Entier et confort thermique : étude préliminaire

R. Bouzigon, G. Ravier, F. Grappe

Équipe d'Accueil 4660 Culture Sport Santé Société (C3S) – Axe Sport-Santé ; UPFR des Sports de Besançon
romain.bouzigon@gmail.com

Introduction

La Cryostimulation Corps Entier (CCE) est une méthode de refroidissement corporel par exposition du sujet à un froid sec (-110 à -170°C) par périodes de 2 à 4 min. Initialement développée pour soulager les douleurs dues aux rhumatismes et à l'arthrite, elle est utilisée comme procédé de récupération sportive. Rares sont les données relevées sur le terrain. Cette étude préliminaire, réalisée avec une équipe cycliste professionnelle sur le tour d'Espagne (Vuelta) 2012, avait pour objectif d'analyser le confort thermique des cyclistes lors de l'exposition au froid.

Méthode

Cinq cyclistes ont été suivis durant les trois semaines de course (S1, S2 et S3). Une échelle d'évaluation du confort thermique graduée de 0 à 10 (0 = excellent ; 10 = insupportable) était présentée à chaque cycliste toutes les 30 sec au cours de leurs sessions de CCE de 3 min. L'évolution des valeurs moyennes collectées toutes les 30 sec a été rapportée pendant les 3 min de l'exposition et comparée entre les 3 semaines de compétition. Un test ANOVA à mesures répétées (temps x conditions) a été utilisé pour analyser l'évolution du confort dans la cabine et entre les semaines et le test de Friedman pour analyser des contrastes.

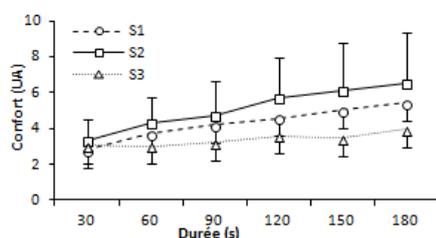


Figure 1 : Evolution du confort thermique en fonction du temps et sur les trois semaines de course (0 = excellent ; 10 = insupportable).

Résultats

Le confort thermique devient de moins en moins supportable durant les 3 min de l'exposition pour les 3 semaines ($p < 0,0001$) (Figure 1). Cette évolution a tendance à évoluer différemment pour chaque semaine ($p = 0,09$). Il n'y a pas de différence significative pour une même durée entre les semaines.

Discussion et conclusion

Le résultat principal de l'étude montre que durant les 3 min d'exposition en CCE, l'inconfort augmente progressivement mais sans devenir insupportable (max 6,6 sur 10). En revanche, il existe des différences interindividuelles importantes qui montrent que les effets du froid ne sont pas identiques entre les sujets. On observe également des tendances d'habituation au froid différentes entre les semaines qui méritent d'être étudiées sur un plus grand nombre de sujets. Cela pourrait être dû 1) à la différence d'hygrométrie entre les régions parcourues (S1, Rioja : sèche ; S2, Galicie : humide), 2) au non contrôle de l'hygrométrie dans l'unité mobile de CCE et 3) aux différentes caractéristiques physiologiques des athlètes. La méthode de CCE utilisée s'avère non traumatisante pour les sportifs mais demande des ajustements méthodologiques nécessaires pour l'optimiser.

Références

- Stanek A, Sieron A, Cieslar G, Matyszkiewicz B, Rozmus-Kuczia I. The impact of whole-body cryotherapy on parameters of spinal mobility in patients with ankylosing spondylitis. *Ortopedia, traumatologia, rehabilitacja* 7: 549-554, 2005.
- Pournot H, Bieuzen F, Louis J, Mounier R, Fillard JR, Barbiche E, et al. Time-course of changes in inflammatory response after whole-body cryotherapy multi exposures following severe exercise. *PLoS one*. 2011;6(7):e22748.

6. Communication orale 15^{ème} Congrès de l'ACAPS, Grenoble, 31 octobre 2013.

Domaine de recherche : (cocher une case ou deux parmi les 5 suivantes)

- Sciences sociales, histoire et management
 Physiologie
 Neurosciences comportementales/ contrôle moteur
 Biomécanique

Sciences humaines, sciences cognitives et sciences de l'intervention

Type de communication demandée : Oral

Participation au prix Jeune Chercheur : Non

Cryostimulation Corps Complet et tolérance au froid : marge de sécurité et différences interindividuelles

Bouzigon Romain¹, Ravier Gilles¹, Dugué Benoit² & Grappe Frédéric¹

*¹Laboratoire C3S, UPFR Sports, Université de Franche-Comté ; ²Laboratoire MOVE, Université de Poitiers
romain.bouzigon@gmail.com*

Mots clés: Cryostimulation ; Récupération ; Confort thermique ; Haut niveau ; Compétition

INTRODUCTION

La Cryostimulation Corps Complet (CCC) est une méthode de refroidissement corporel par exposition du sujet à un froid sec (-110° à -160°C) par périodes de 2 à 4 min. Initialement développée pour soulager les douleurs dues aux rhumatismes et à l'arthrite (Stanek et al., 2005), elle est utilisée comme procédé de récupération sportive (Hausswirth et al., 2011). La CCC est de plus en plus répandue dans le milieu de la compétition, cependant aucune mesure de terrain n'a encore été effectuée pour étudier les contraintes thermiques des expositions sur les athlètes. Cette étude de fait état des données de plusieurs études de perception du confort thermique (CT) relevées lors de sessions de CCC chez vingt-trois sportifs de haut niveau issues de deux activités différentes (cyclisme, skicross) lors de compétitions internationales.

METHODES

Quatorze hommes cyclistes professionnels, neuf skieurs (ses) de l'Equipe de France de skicross (7 hommes et 2 femmes) ont utilisé la CCC lors de compétitions internationales, durant le Tour d'Espagne 2012 pour les cyclistes et la Coupe du Monde 2012/2013 pour les skieurs.

Une échelle d'évaluation du CT graduée de 0 à 10 (0 = excellent ; 10 = insupportable) était présentée à chaque athlètes toutes les 30 sec au cours de chaque session de CCC de 3 min réalisée à l'intérieur d'une cabine. L'ensemble des données relevées ont été regroupées. Le nombre d'exposition par athlète était différent. Les températures à l'intérieur de la cabine s'échelonnaient entre -110° et -150°C. Un test a été utilisé pour analyser l'évolution du CT en fonction des 3 min de la durée d'exposition. La variabilité interindividuelle a été analysée à partir du coefficient de variation (CV) calculé toutes les 30 sec.

RESULTATS

Le CT se dégrade avec la durée d'exposition ($p < 0,0001$) (Figure 1). La valeur moyenne la plus élevée (5,2) équivaut à une sensation de CT « moyen » à l'intérieur de la cabine. Les CV élevés durant l'exposition reflètent l'importante variabilité du ressenti de CT entre les athlètes. On note toutefois une diminution de la variabilité interindividuelle en fonction de la durée d'exposition (Tableau 1).

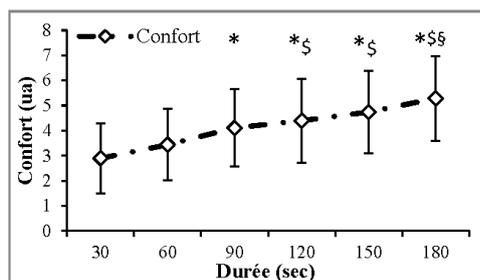


Figure 1 : Evolution du CT en fonction du temps chez les 23 athlètes de haut niveau. « * » différence significative ($p < 0,05$) avec CT 30 sec, « § » $p < 0,05$ avec 60 sec et « §§ » $p < 0,05$ avec 90 sec.

Tableau 1. CV des valeurs de CT en fonction de la durée d'exposition

Durée (sec)	30	60	90	120	150	180
CV (%)	48	41	37	38	35	32

DISCUSSION

Le résultat principal de l'étude montre que durant les 3 min d'exposition en CCC, l'inconfort thermique augmente progressivement mais sans devenir insupportable (max 5,2 sur 10). Cela suggère que la contrainte thermique induite par l'exposition au froid cryogénique est largement supportable pour l'ensemble des athlètes testés. Il semble que la limite maximale de tolérance au froid ne soit pas atteinte, laissant apparaître une certaine marge de sécurité. Il existe en revanche des différences interindividuelles importantes qui montrent que les effets du froid ne sont pas ressentis de manières identiques entre tous les sujets. Cela pourrait être dû 1) aux conditions environnementales différentes (température extérieure et hygrométrie), 2) aux caractéristiques physiologiques différentes des athlètes, 3) à l'habitué au froid des athlètes ayant réalisés plusieurs expositions (Smolander et al., 2004). Avec la durée d'exposition, il apparaît que les différences interindividuelles de CT s'amenuisent.

CONCLUSION

L'utilisation de la CCC comme technique de récupération durant une période compétitive n'est pas vécue comme traumatisante par les athlètes de haut niveau. Elle demande cependant des ajustements méthodologiques nécessaires en fonction des conditions environnementales et des sujets. Le développement des nouvelles technologies de cryocabine doit s'appuyer sur des études de terrain comme celle-ci pour garantir une efficacité et une sécurité plus importante. De plus les réponses de CT très différentes entre les sujets tendent à montrer que des protocoles de durées différentes ou de températures différentes sont à mettre en place.

BIBLIOGRAPHIE

- Stanek, A., Sieron, A., Cieslar, G., Matyszkiewicz, B., Rozmus-Kuczia, I. (2005). The impact of whole-body cryotherapy on parameters of spinal mobility in patients with ankylosing spondylitis. *Ortopedia, traumatologia, rehabilitacja*, 7, 549-554.
- Hausswirth, C., Louis, J., Bieuzen, F., Pourmot, H., Fournier, J., Filliard JR., and Brisswalter, J. (2010). 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.
- Smolander, J., Mikkelsen, M., Oksa, J., Westerlund, T., Leppäluoto, J., Huttunen, P. (2004). Thermal sensation and comfort in women exposed repeatedly to whole-body cryotherapy and winter swimming in ice-cold water. *Physiology & Behavior*, 82, 691-695.

7. Dossier de proposition de prestation envoyés aux équipes sportives.

CRYANTAL*
LE SOIN PROFESSIONNEL PAR LE FROID

2013

La science au service de la performance

UNIVERSITÉ DE FRANCHE-COMTE
U-SPORTS

POITIERS
FACULTÉ des SCIENCES du
SPORT

CS Culture Sport Santé Société
Département Sport - Santé

Société Cryantal

Cryantal : La science au service de la performance

SOMMAIRE

SOMMAIRE	1
I. LA TECHNOLOGIE CRYANTAL	2
II. LE SUIVI DE PRESTATION CRYANTAL.....	2
1. Description du suivi de la prestation	2
2. Protocole proposé par Cryantal.....	3
3. Méthodologie de la mesure des variables physiologiques	3
4. Méthodologie de la mesure des variables perceptives	4
III. LES ETUDES DE TERRAIN.....	6
1. Partenariat professionnels en cours ou déjà réalisés	7
IV. LES ETUDES DE LABORATOIRE.....	8
1. Mise en place d'une thèse	8
2. Objectif de la thèse	8
3. Objectifs post thèse	8

Cryantal : La science au service de la performance

I. LA TECHNOLOGIE CRYANTAL

Cryantal développe aujourd'hui une solution pionnière en France dans le domaine de la Cryostimulation Corps Entier : la **Cryochambre brevetée Cryantal**. Cryantal est désormais la seule société à posséder une unité mobile de Cryostimulation Corps Complet (l'athlète rentre désormais en entier), sans contact direct avec l'azote. Elle garantit ainsi une meilleure **efficacité** et une plus grande **sécurité**.



*Cryochambre brevetée
Cryantal*



*Nouveau mobile home
Cryantal*

II. LE SUIVI DE PRESTATION CRYANTAL

1. Description du suivi de la prestation

Dans le but d'optimiser ses prestations de Cryostimulation Corps Complet (CCC) pour la récupération sportive, la société Cryantal vous propose une analyse détaillée de certaines données mesurées lors de l'exposition au froid.

Lors de l'exposition, deux types de variables peuvent être mesurées en routine : 1) physiologiques, avec la variabilité de la fréquence cardiaque (qui donne une information sur la nature de la récupération liée au tonus cardiaque), la pression artérielle et les températures tympanique et cutanée et 2) perceptives, avec les différentes sensations au froid restituées par l'athlète.

Toutes les données sont ensuite analysées par un doctorant (Romain Bouzigon) travaillant pour Cryantal qui accompagne le suivi. Cryantal s'engage à présenter les analyses sous forme de rapport interne (confidentiel) dans un délai de 7 jours.

Cryantal : La science au service de la performance

les méthodologies d'exposition en fonction 1) des exigences de chaque activité sportive et 2) des besoins des athlètes, qu'ils soient pour la récupération ou pour le soulagement d'une blessure.

Les partenariats mis en place dans différentes activités sportives permettent le recueil de données spécifiques à chacune d'elle mais également de données communes qui pourront contribuer à l'évolution des prestations dans toutes les activités sportives.

1. Partenariats professionnels en cours ou déjà réalisés

Cryantal est partenaire de plusieurs équipes sportives professionnelles :

➤ **Equipe cycliste professionnelle**

Deux équipes cyclistes professionnelles ont utilisé l'unité mobile de CCC Cryantal sur le Tour de France et la Vuelta 2012.

➤ **Equipe de football professionnelle**

Cryantal a suivi une équipe de football professionnelle lors d'un stage de préparation physique.

➤ **Equipes de France de basketball masculine et féminine**

Cryantal est partenaire médical officiel de la Fédération Française de Basketball.

➤ **Equipes de France de Skicross masculine et féminine**

Cryantal a suivi des équipes de France de Skicross masculine et féminine sur toutes les étapes de la Coupe du Monde qui se déroulait en France pour l'hiver 2012-2013. Chaque prestation avec l'équipe de France était accompagnée d'un compte rendu.

➤ **Equipe de France de Judo sénior féminine**

Cryantal a accompagné l'équipe de France féminine de Judo au cours de leur préparation pour les jeux Olympiques de Londres en 2012.

➤ **Equipe de France de karaté**

Cryantal a accompagné l'équipe de France masculine de karaté sur les Championnats du Monde de 2012 à Paris Bercy. L'équipe de France a d'ailleurs remporté le plus grand nombre de médailles lors de championnat avec 13 médailles dont 7 en or, 2 en argent et 4 en bronze.

Cryantal a également accompagné plusieurs médaillés olympiques aux J.O. de Londres 2012 !

Cryantal : La science au service de la performance

Mesure du pourcentage de masse grasse

Le pourcentage de masse grasse est mesuré avec une pince d'Harpenden à partir de la mesure des différents plis cutanés.

4. Méthodologie de la mesure des variables perceptives

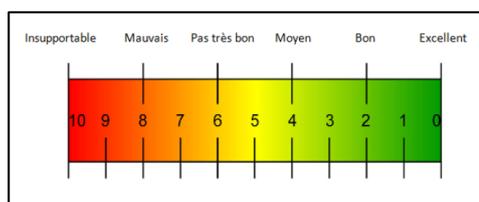
Evaluation de la qualité du sommeil

L'échelle de qualité du sommeil permet d'observer les effets de la CCC sur la qualité du sommeil de l'athlète. Il évalue la perception de la qualité de son sommeil de la nuit précédente sur une échelle allant de 1 à 5 (0 n'étant pas pris en compte).

Qualité du sommeil : Avez-vous bien dormi ?	
5	Oui, de façon parfaite (d'un sommeil paisible, sans réveil nocturne)
4	Oui, bien
3	Moyennement bien
2	Non, mal
1	Non, très mal (sommeil agité, réveils fréquents)
0	Ne sait pas

Evaluation du confort thermique

L'échelle de confort, proposée aux athlètes toutes les 30 sec lors de l'exposition, apporte des informations sur leur résistance au froid en fonction de la durée de l'exposition. Elle garantit une plus grande sécurité en faisant sortir l'athlète de la cabine si l'inconfort devient trop élevé. Les athlètes quantifient donc au cours de l'exposition la perception de leur confort thermique sur une échelle allant de 0 à 10 (0 = excellent ; 10 = insupportable).



Cryantal : La science au service de la performance

Evaluation de perception de la difficulté de l'effort

Cette échelle permet à l'athlète d'évaluer la difficulté physique de l'épreuve qu'il vient d'effectuer sur une échelle allant de 0 à 10 (0 = effort nul ; 10 = effort maximal).

10	Maximal
9	
8	
7	Très fort
6	
5	Fort
4	
3	Soutenue
2,5	
2	Moyen
1,5	
1	Faible
0,5	Extrêmement faible
0,3	
0	Nulle

Evaluation de la croyance en l'efficacité de la CCC

Placée en début et en fin de prestation, cette échelle permet d'observer l'évolution de la croyance de l'athlète dans la CCC. Il évalue de - 5 (aucune efficacité) à + 5 (très grande efficacité) la CCC.

Niveau de croyance de l'efficacité du dispositif testé											
-5	-4	-3	-2	-1	0	+1	+2	+3	+4	+5	
Aucune efficacité				Aucun avis				Très grande efficacité			

*Cryantal : La science au service de la performance****Evaluation de l'estimation de la performance***

L'entraîneur estime la performance de ses athlètes sur l'épreuve qu'ils viennent d'effectuer sur une échelle allant de 0 à 10 (0 = abandon de l'athlète ; 10 = très bonne performance de l'athlète).

0	Abandon
1	
2	
3	
4	
5	Performance moyenne
6	
7	
8	
9	
10	Très bonne performance

Evaluation de la récupération

L'athlète évalue avant l'exposition son degré de récupération perçu après l'épreuve du jour par rapport à l'épreuve de la veille.

0	Pas du tout récupéré
1	
2	
3	
4	
5	Récupéré à 50 %
6	
7	
8	
9	
10	Récupéré à 100 %

Ces relevés seront réalisés à votre demande. Les échelles ne sont pas contraignantes et ne perturbent pas les athlètes. Elles sont pour la plupart proposées pendant l'exposition.

III. LES ETUDES DE TERRAIN

Les études de terrain sont des études menées dans des équipes sportives professionnelles au cours d'entraînements ou de compétitions. Ces études, non contraignantes pour les athlètes, permettent d'enregistrer et de cumuler des données afin de connaître d'avantage les mécanismes physiologiques et psychologiques impliqués et de pouvoir affiner au maximum

Cryantal : La science au service de la performance

IV. LES ETUDES DE LABORATOIRE

1. Mise en place d'une thèse

La thèse menée par Romain Bouzigon (cf. I.1.) a comme sujet :

La Cryostimulation Corps Entier comme aide à la récupération après exercice(s) physique(s) épuisant(s). Etude des impacts biologiques, physiologiques et psychologiques et applications dans le contexte de la performance sportive.

2. Objectif de la thèse

Le projet s'articule autour de l'étude des réponses adaptatives de l'organisme exposé à la CCC chez des sportifs de haut niveau dans différentes disciplines sportives. Nous souhaitons analyser la qualité de la récupération après une exposition à la CCC à partir des réponses de certaines variables biologiques, physiologiques et psychologiques.

La recherche se positionnera à travers deux dimensions bien identifiées.

- La première, très « terrain » permettra d'étudier les effets de la CCC en réalisant le suivi d'un grand nombre d'athlètes à l'entraînement et en compétition à partir des différentes unités mobiles CCC qui seront mises à la disposition des équipes lors de grands événements sportifs (voir III.).
- La seconde autorisera le suivi des sportifs en laboratoire à partir de la mise en place de protocoles standardisés qui permettront d'approfondir l'étude des effets de la CCC sur la récupération du potentiel physique et psychologique du sportif.

Ces travaux s'effectueront selon un planning bien défini.

Les objectifs du projet sont :

- 1) de déterminer les mécanismes physiologiques de base suite à l'exposition de la CCC à partir de l'étude des réponses des variables physiologiques, biologiques et psychologiques,
- 2) de définir et d'améliorer la méthodologie mise en place actuellement par Cryantal pour autoriser l'exposition rationnelle des sportifs à la CCC (nombre de séances, durée de l'exposition, niveaux de température, nombre de répétitions, etc.),
- 3) de déterminer et fixer les limites qui encadrent l'exposition à la CCC en fixant des critères d'inclusion et d'exclusion chez les sportifs,
- 4) d'avoir la possibilité de décliner la méthodologie mise en place chez les sportifs au plus grand nombre en fixant des limites d'utilisation.

3. Objectifs post thèse

Les enjeux sont multiples puisqu'ils vont toucher directement les athlètes de haut niveau et indirectement les sportifs de niveaux inférieurs. Cryantal souhaite ensuite pouvoir proposer à l'ensemble des sportifs une nouvelle technique de récupération offrant une méthodologie

Cryantal : La science au service de la performance

rationnelle centrée sur la prise en compte individuelle du sujet et la qualité des mesures réalisées durant l'exposition au froid.

Les recherches qui seront conduites dans ce projet doivent permettre d'ouvrir le champ d'exploration de la CCC dans différentes disciplines sportives et autoriser d'éventuels transferts dans le domaine médical.