



HAL
open science

Cryothérapie corps entier : utilisation en médecine humaine et perspectives d'applications chez le cheval

Anaëlle Le Lan

► **To cite this version:**

Anaëlle Le Lan. Cryothérapie corps entier : utilisation en médecine humaine et perspectives d'applications chez le cheval. Médecine vétérinaire et santé animale. 2022. dumas-03981268

HAL Id: dumas-03981268

<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-03981268v1>

Submitted on 9 Feb 2023

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.



RÉPUBLIQUE
FRANÇAISE

Liberté
Égalité
Fraternité



EnvA

École nationale vétérinaire d'Alfort

PORTEUR D'HISTOIRE
ACTEUR D'AVENIR

Année 2022

CRYOTHÉRAPIE CORPS ENTIER : UTILISATION EN MÉDECINE HUMAINE ET PERSPECTIVES D'APPLICATIONS CHEZ LE CHEVAL

THÈSE

pour obtenir le diplôme d'État de

DOCTEUR VÉTÉRINAIRE

présentée et soutenue publiquement devant

la Faculté de Médecine de Créteil (UPEC)

le 16 décembre 2022

par

Anaëlle, Lauriane LE LAN

sous la direction de

Fabrice AUDIGIÉ

JURY

Présidente du jury :	Mme Céline ROBERT	Professeur à l'EnvA
Directeur de thèse :	M. Fabrice AUDIGIÉ	Professeur à l'EnvA
Examinatrice :	Mme Céline MESPOULHÈS-RIVIÈRE	Ingénieur de recherche à l'EnvA
Membre invité :	Mme Claire MOIROUD	Praticien hospitalier

Liste des enseignants intervenant dans l'encadrement des thèses de Doctorat vétérinaire



Version du 8 février 2022

Liste des Professeurs et Maîtres de conférences titulaires de l'HDR

M	Adjou	Karim	Professeur	DPASP
M	Audigié	Fabrice	Professeur	DEPEC
M	Bellier	Sylvain	Professeur	DSBP
M	Blaga	Radu	Maître de conférences HDR	DPASP
M	Blot	Stephane	Professeur	DEPEC
M	Boulouis	Henri-Jean	Professeur émérite	DSBP
Mme	Chahory	Sabine	Professeur	DEPEC
M	Chateau	Henry	Professeur	DSBP
Mme	Chetboul	Valerie	Professeur	DEPEC
Mme	Crevier-Denoix	Nathalie	Professeur	DSBP
M	Degueurce	Christophe	Professeur	DSBP
M	Denoix	Jean-Marie	Professeur	DEPEC
M	Desquilbet	Loïc	Professeur	DSBP
Mme	Dufour	Barbara	Professeur émérite	DPASP
M	Eloit	Marc	Professeur	DSBP
M	Fayolle	Pascal	Professeur émérite	DEPEC
M	Fédérighi	Michel	Professeur	DPASP
M	Fontbonne	Alain	Professeur	DEPEC
Mme	Gilbert	Caroline	Professeur	DSBP
M	Grandjean	Dominique	Professeur	DEPEC
Mme	Grimard-Ballif	Bénédicte	Professeur	DPASP
Mme	Haddad-Hoang Xuan	Nadia	Professeur	DPASP
M	Jouvion	Gregory	Professeur	DSBP
M	Kohlhauer	Matthias	Maître de conférences HDR	DSBP
Mme	Le Poder	Sophie	Professeur	DSBP
M	Manassero	Mathieu	Professeur	DEPEC
Mme	Maurey-Guénec	Christelle	Maître de conférences HDR	DEPEC
M	Millemann	Yves	Professeur	DPASP
M	Perrot	Sébastien	Maître de conférences HDR	DSBP
Mme	Pilot-Storck	Fanny	Professeur	DSBP
M	Ponter	Andrew	Professeur	DPASP
Mme	Rivière	Julie	Maître de conférences HDR	DPASP
Mme	Robert	Céline	Professeur	DSBP
M	Tiret	Laurent	Professeur	DSBP
M	Tissier	Renaud	Professeur	DSBP
M	Verwaerde	Patrick	Professeur	DEPEC
Mme	Viateau	Véronique	Professeur	DEPEC

Liste des Maîtres de conférences et Ingénieurs de recherche DMV

M	Arné	Pascal	Maître de conférences	DPASP
Mme	Barassin	Isabelle	Maître de conférences	DPASP
Mme	Benchekroun	Ghita	Maître de conférences	DEPEC
Mme	Bertoni	Lelia	Maître de conférences	DEPEC
M	Bolnot	Francois	Maître de conférences	DPASP
Mme	Canonne-Guibert	Morgane	Maître de conférences	DEPEC
Mme	Chevallier	Lucie	Maître de conférences	DSBP
Mme	Cochet Faivre	Noëlle	Maître de conférences	DEPEC
Mme	Constant	Fabienne	Maître de conférences	DPASP
Mme	Cordonnier-Lefort	Nathalie	Maître de conférences	DSBP
Mme	Crepeaux	Guillemette	Maître de conférences	DSBP
Mme	De Paula Reis	Alline	Maître de conférences	DPASP
Mme	Decambroun	Adeline	Maître de conférences	DEPEC
M	Delsart	Maxime	Maître de conférences associé	DPASP
M	Desbois	Christophe	Maître de conférences	DEPEC
M	Deshuillers	Pierre	Maître de conférences	DSBP
M	Gauthier	Michel	Maître de conférences associé	DPASP
Mme	Guélin-Poirier	Valentine	Maître de conférences	DPASP
Mme	Jacquet	Sandrine	Ingénieur de recherche (DMV)	DEPEC
Mme	Lagrée	Anne-Claire	Maître de conférences	DSBP
Mme	Le Roux	Delphine	Maître de conférences	DSBP
Mme	Legrand	Chantal	Maître de conférences associé	DSBP
Mme	Marignac	Genevieve	Maître de conférences	DSBP
M	Maufré	Vincent	Maître de conférences	DPASP
Mme	Mtimet	Narjès	Maître de conférences	DPASP
Mme	Mespouilhès-Rivière	Céline	Ingénieur de recherche (DMV)	DEPEC
M	Mortier	Jérémy	Maître de conférences associé	DEPEC
M	Nudemann	Nicolas	Maître de conférences	DEPEC
M	Pignon	Charly	Ingénieur de recherche (DMV)	DEPEC
M	Polack	Bruno	Maître de conférences	DSBP
Mme	Ravary-Plumioën	Bérandgère	Maître de conférences	DPASP
M	Reyes-Gomez	Edouard	Maître de conférences	DSBP
Mme	Risco-Castillo	Véronica	Maître de conférences	DSBP
Mme	Rose	Hélène	Maître de conférences associé	DSBP

Remerciements

Au Président du Jury de cette thèse, Mme Céline ROBERT, Professeure à l'EnvA

Qui nous fait l'honneur de présider le jury de cette thèse. Hommages respectueux.

A M Fabrice AUDIGIÉ, Professeur à l'EnvA,

Pour m'avoir confié ce projet et m'avoir consacré aimablement son temps. Sincères remerciements.

A Mme Céline MESPOULHÈS-RIVIÈRE, Ingénieure de recherche et praticienne hospitalière à l'EnvA,

Pour avoir accepté de faire partie des examinateurs de cette thèse. Merci.

A Mme Claire MOIROUD, Praticienne hospitalière à l'EnvA,

Pour m'avoir confié ce projet et m'avoir consacré aimablement son temps. Sincères remerciements.

A ma mère, je t'aime.

Table des matières

Liste des figures.....	3
Liste des tableaux	5
Liste des abréviations.....	6
Introduction	7
Première partie : Principe et aspects pratiques	9
1. Principe et histoire.....	9
2. Matériel et déroulement d'une séance.....	9
A. Matériel et fonctionnement.....	9
B. Déroulement d'une séance	12
3. Coûts et contraintes	12
4. Aspects réglementaires.....	15
Deuxième partie : Effets physiologiques de la cryothérapie corps entier	17
1. Réponse thermique.....	17
A. Variation de la température de la peau.....	17
B. Variation de la température musculaire	21
C. Variation de la température interne.....	21
2. Effets de la cryothérapie corps entier sur l'appareil cardio-pulmonaire	23
A. Réponse cardio-vasculaire à la cryothérapie corps entier.....	23
B. Réponse de l'appareil respiratoire à la cryothérapie corps entier	25
3. Effets de la cryothérapie corps entier sur les paramètres sanguins	26
A. Hématologie	26
a. Population érythrocytaire	26
b. Leucocytes	28
c. Plaquettes	32
B. Paramètres biochimiques.....	32
a. Paramètres musculaires	32
b. Paramètres rénaux.....	35
c. Marqueurs de lyse osseuse	35
d. Marqueurs cardiaques	36
e. Profil lipidique.....	37
C. Paramètres hormonaux.....	37
D. Marqueurs de l'inflammation	39
E. Equilibre oxydo-réducteur	40
F. Métabolisme.....	41
a. Métabolisme énergétique.....	41
b. Capacités aérobie et anaérobie	42
4. Effets de la cryothérapie corps entier sur le système nerveux	43
A. Effets de la cryothérapie corps entier sur le système nerveux autonome	43
B. Cryothérapie corps entier et analgésie	43
C. Effets de la cryothérapie corps entier sur la proprioception.....	44
Troisième partie : Utilisation de la cryothérapie corps entier chez l'homme.....	47
1. Utilisations thérapeutiques	47
A. Maladies rhumatismales inflammatoires.....	47
a. Polyarthrite rhumatoïde.....	47
b. Spondylarthrite ankylosante.....	48
B. Fibromyalgie.....	49
C. Sclérose en plaques.....	49
D. Douleurs lombaires	50
E. Troubles mentaux	50
2. Utilisations en médecine du sport.....	50

A. <i>Impact de la cryothérapie corps entier sur la récupération</i>	51
B. <i>Utilisation de la cryothérapie corps entier pour la préparation des échéances sportives</i>	54
3. Protocoles recommandés.....	55
4. Complications et contre-indications.....	56
Quatrième partie : La cryothérapie corps entier chez le cheval	59
1. Réponse thermique.....	59
2. Propositions de protocoles.....	61
3. Applications espérées.....	62
Cinquième partie : Discussion	63
1. Limites.....	63
2. Comparaison entre la cryothérapie corps entier et d'autres méthodes de cryothérapie.....	65
Conclusion	67
Liste des références bibliographiques	69
Annexe 1 : Récapitulatif des résultats des études sur l'effet de la cryothérapie corps entier sur la population érythrocytaire, version complète	79
Annexe 2 : Récapitulatif des résultats des études sur l'effet de la CCE sur la population leucocytaire, version complète	84

Liste des figures

Figure 1 : Cabine individuelle fonctionnant à l'azote liquide Criotec (d'après Adam, 2014).....	10
Figure 2 : Cryochambre 3 pièces (d'après Ben Khedher Balbolia <i>et al.</i> , 2019)	11
Figure 3 : Cryocabine destinée aux chevaux (A). Position de la tête dans la cryocabine (B) (d'après Bogard <i>et al.</i> , 2020).....	11
Figure 4 : Cryocabine destiné aux chevaux, exemple de caisson de cryothérapie (crédit : Life BSE, 2022).....	12
Figure 5 : Exemple de thermogramme du haut du corps d'un homme en face dorsale : a) avant cryothérapie et b) 5 minutes après 3min de CCE à -120°C (d'après Dębiec-Bąk <i>et al.</i> , 2013).....	18
Figure 6 : Température moyenne de la peau avant (5min), pendant (2min) et après (30min) CCE (2 min, -110°C) (d'après Westerlund <i>et al.</i> , 2003).....	19
Figure 7 : Profils de température de la peau pour différentes régions du corps et différents temps d'exposition à la CCP (90s, 120s, 150s, 180s) (entre -130 et -170°C, cryocabine) (d'après Fonda <i>et al.</i> , 2014).....	20
Figure 8: Température du muscle vaste latéral à 3cm de profondeur avant et après CCE (-110°C, 3min) (pointillés) (d'après Costello <i>et al.</i> , 2012).....	21
Figure 9 : Température rectale moyenne de 10 sujets avant, pendant et après CCE (2min, -110°C) (d'après (Westerlund <i>et al.</i> , 2003)	22
Figure 10 : Valeurs de résistance périphérique totale ($\text{dyn} \times \text{s}/\text{cm}^3$) avant, immédiatement après, 3h et 6h après CCE (-120°C, 3min) (d'après Zalewski <i>et al.</i> , 2013).....	25
Figure 11 : Représentation schématique du protocole expérimental de l'étude (d'après Krueger <i>et al.</i> , 2019).....	33
Figure 12 : Evolution de la concentration sérique de myoglobine après un effort, avec et sans CCE (d'après Krueger <i>et al.</i> , 2019).....	33
Figure 13 : Evolution de la concentration sérique de sICAM-1 après un protocole d'entraînement et de CCE quotidienne (d'après Banfi <i>et al.</i> , 2009b).....	35
Figure 14 : Ratio OPG/RANKL avant (T1) et après (T2) un protocole d'entraînement et de CCE (barres grises) ou un protocole d'entraînement seul (barres blanches) (d'après Galliera <i>et al.</i> , 2013).....	36
Figure 15 : Effets individuels de 2 sessions de CCE par jours pendant 7 jours sur les taux de cortisol, testostérone, DHEA et 17 B-estradiol (d'après Grasso <i>et al.</i> , 2014)	38
Figure 16 : Thermogramme obtenu sur une jument pur-sang (3 ans, 466kg) avant (A) et immédiatement après (B) une séance de CCP (3 min, -140°C) (d'après Bogard <i>et al.</i> , 2020).....	60

Figure 17 : Zones de mesure de la température de la peau (d'après Bogard <i>et al.</i> , 2020).....	60
Figure 18 : Températures obtenues sur les zones présentées en figure 16 avant (en bleu) et après (en rouge) CCE (3min, -140°C) (d'après Bogard <i>et al.</i> , 2020)	61
Figure 19 : Températures enregistrées à proximité de la peau pendant une séance de CCP (température annoncée à -140°C) (d'après Savic <i>et al.</i> , 2013)	64

Liste des tableaux

Tableau 1 : Tableau des coûts d'investissement et de fonctionnement (d'après Legrand, 2014)...	13
Tableau 2: Température moyenne et locales de la peau 5 minutes avant la CCE et valeur la plus basse enregistrée pendant la séance de CCE (2 min, -110°C en cryochambre) (d'après Westerlund <i>et al.</i> , 2003)	18
Tableau 3 : Pressions artérielles avant exposition et variation obtenue après exposition à la CCE, synthèse des résultats des études de Westerlund <i>et al.</i> , 2004; Lubkowska et Szyguła, 2010; Lubkowska et Suska, 2011.....	24
Tableau 4 : Récapitulatif des résultats des études sur l'effet de la CCE sur la population érythrocytaire	27
Tableau 5 : Récapitulatif des résultats des études sur l'effet de la CCE sur la population leucocytaire.....	29
Tableau 6 : Métabolisme basal et pourcentage des substrats avant et après CCE (d'après Ziemann <i>et al.</i> , 2012)	41
Tableau 7 : Effets de la CCE sur la récupération	52
Tableau 8 : Protocoles de CCE et CCP dont l'utilisation a démontré un bénéfice dans l'indication concernée	55

Liste des abréviations

ASAT : Aspartate Aminotransférase

CAT : Catalase

CCE : Cryothérapie corps entier

CCP : Cryothérapie corps partiel

CRP_{us} : Protéine C-réactive ultrasensible

CK : Créatinine Kinase

DEP : Débit expiratoire de pointe

DHEA : Déhydro-épiandrostérone

GPx : Gluthation peroxydase

GSSG-R : Gluthation reductase

Iso-P : Isoprostane

IL : Interleukine

LDH : Lactate déshydrogénase

NT-proBNP : Peptide natriurétique type B

OPG : Ostéoprotégérine

PAP : Potentialisation post-activation

PR : Polyarthrite rhumatoïde

RRI : Intervalle R-R

RMSSD : Moyenne quadratique des intervalles R-R successifs

SA : Spondylarthrite ankylosante

SOD : Super oxide dismutase (SOD)

TAS : Statut anti-oxydant total

T-GSH : Gluthation transferase

TNF α : Facteur de nécrose tumorale

TOS : Statut oxydant total

VEMS : Volume expiratoire maximal par seconde

Introduction

La cryothérapie se définit comme l'application de froid pour traiter une blessure ou une maladie (Swenson *et al.*, 1996). Cette pratique est ancienne et a été largement utilisée sur des bases empiriques et cliniques. Son utilisation remonte à l'Antiquité mais la compréhension des mécanismes sous-jacents a été tardive. Deux formes de cryothérapie sont distinguées : la cryothérapie locale et des formes de cryothérapie où le refroidissement concerne tout le corps.

Dans la première forme l'application de froid se fait directement sur une zone limitée et définie à l'aide de dispositifs variés allant de la simple poche de froid à l'application de gaz réfrigérants (Swenson *et al.*, 1996). C'est une pratique bien installée en médecine équine principalement dans le traitement et la prévention des boiteries (Roszkowska *et al.*, 2018). Il est aussi possible de refroidir l'ensemble du corps, sans chercher à cibler une zone. Dans ce domaine, deux modes de refroidissement sont majoritairement utilisés : l'immersion dans l'eau froide et la cryothérapie corps entier. Cette dernière modalité est plus récente et gagne du terrain par rapport à la première depuis quelques années.

La cryothérapie corps entier ou partiel est une pratique dans laquelle le patient est exposé à une température extrêmement froide pendant un temps relativement court. Les températures et les temps d'exposition varient respectivement entre -110°C et -190°C et 1 à 5 minutes (Rose *et al.*, 2017). L'objectif de cette thèse est d'analyser à partir d'une revue bibliographique les effets physiologiques de la cryothérapie corps entier et les utilisations de cette technique chez l'homme et d'envisager ses perspectives d'applications chez le cheval.

Après des rappels sur les principes généraux et les aspects pratiques de cette technique, les effets physiologiques et les utilisations de la cryothérapie corps entier seront ainsi décrits et analysés en santé humaine et chez le cheval.

Première partie : Principe et aspects pratiques

1. Principe et histoire

La cryothérapie corps entier ou partiel est une thérapie physique passive au cours de laquelle on expose le patient à une température extrêmement froide pendant une courte durée (Joch *et al.*, 2006). Les températures et les temps d'exposition varient respectivement entre -110°C et -190°C et 1 à 5 minutes (Rose *et al.*, 2017). On distingue la cryothérapie corps entier (CCE) de la cryothérapie corps partiel (CCP). Dans la première méthode le patient est entièrement exposé à la baisse de la température tandis que dans la deuxième méthode la tête est maintenue à l'extérieur de l'appareil.

La CCP est apparue en premier, à la fin des années 1970, suite aux travaux du professeur Yamauchi. La première cabine de cryothérapie a été présentée au Congrès Européen des Rhumatologues à Wiesbaden et avait pour objectif le traitement des affections rhumatismales. L'idée est ensuite reprise en 1982, en Allemagne, par le Professeur R. Fricke qui propose alors la première cryochambre permettant la cryothérapie corps entier (Adam, 2014). Dans les années 1980, la CCE s'est étendue au domaine sportif en URSS et a été utilisée par des athlètes pour améliorer la récupération et optimiser la préparation lors des Jeux Olympiques de Moscou (Ben Khedher Balbolia *et al.*, 2019). La CCE et la CCP se sont ensuite démocratisées et ont été introduites dans de nombreux pays. Actuellement, le nombre de constructeurs proposant des appareils de CCE ou de CCP est d'environ cinquante. La majorité des constructeurs proposent du matériel permettant la CCP et non la CCE.

2. Matériel et déroulement d'une séance

A. Matériel et fonctionnement

La différence entre les appareils de CCP et CCE réside dans l'inclusion de la tête mais aussi dans la méthode utilisée pour atteindre les basses températures.

La CCP se réalise dans une cryocabine pouvant aussi être appelée cryosauna. La plupart des cryocabines sont des cylindres dont la partie haute est ouverte afin de laisser dépasser la tête, le cou et parfois les épaules. La figure 1 présente un exemple de cryocabine. Le sol du cylindre est mobile afin de s'adapter à la taille de l'utilisateur. Le refroidissement se fait par exposition directe du patient à l'azote qui est émis dans la cabine. L'azote est stocké sous forme liquide et est décomprimé afin d'obtenir un gaz dont les températures varient de -110°C à -195°C d'après les données constructeurs. La température est contrôlée à l'aide de capteurs thermiques situés à proximité des buses de sortie d'azote. Un ajustement par dispersion d'azote est effectué lorsque la température dépasse un seuil fixé par le constructeur ou l'opérateur. Les variations de température dans la cabine lors de ces ajustements sont comprises entre 10 et 20°C (Bouzigon *et al.*, 2016).

Figure 1 : Cabine individuelle fonctionnant à l'azote liquide Criotec (d'après Adam, 2014)



La CCE nécessite l'installation d'une chambre de cryothérapie. Il s'agit d'une enceinte séparée en deux parties au moins : une chambre d'adaptation dont la température est supérieure à celle de la chambre principale, en général elle se trouve aux alentours de -60°C et une chambre principale dans laquelle le traitement a lieu et dont la température est habituellement à -110°C . Il peut exister une troisième chambre à -10°C permettant une adaptation plus progressive. La taille de la chambre principale peut permettre d'accueillir plus d'un patient à la fois, 4 à 5 en général. La figure 2 présente un exemple de cryochambre. Une vitre ou une caméra de surveillance est nécessaire afin de contrôler le déroulement de la séance. Contrairement aux cryocabines, le refroidissement des cryochambres ne se fait pas par dispersion d'azote mais par refroidissement des murs ou de l'air. Deux technologies peuvent être utilisées :

- compresseur électrique : des compresseurs séparent l'oxygène et l'azote de l'air ambiant. Une fois séparé, l'azote est refroidi. L'azote et l'oxygène sont remélangés selon les mêmes proportions que l'air ambiant ($\text{O}_2 = 22 \pm 2\%$). Le mélange est alors insufflé dans la chambre ce qui permet d'obtenir un air dans la chambre proche de la composition de l'air ambiant à une température avoisinant les -110°C .

- azote liquide : dans cette seconde solution, l'azote circule directement dans les murs de la chambre permettant un refroidissement de l'air par conduction. (Bouzigon *et al.*, 2016)

Figure 2 : Cryochambre 3 pièces (d'après Ben Khedher Balbolia *et al.*, 2019)

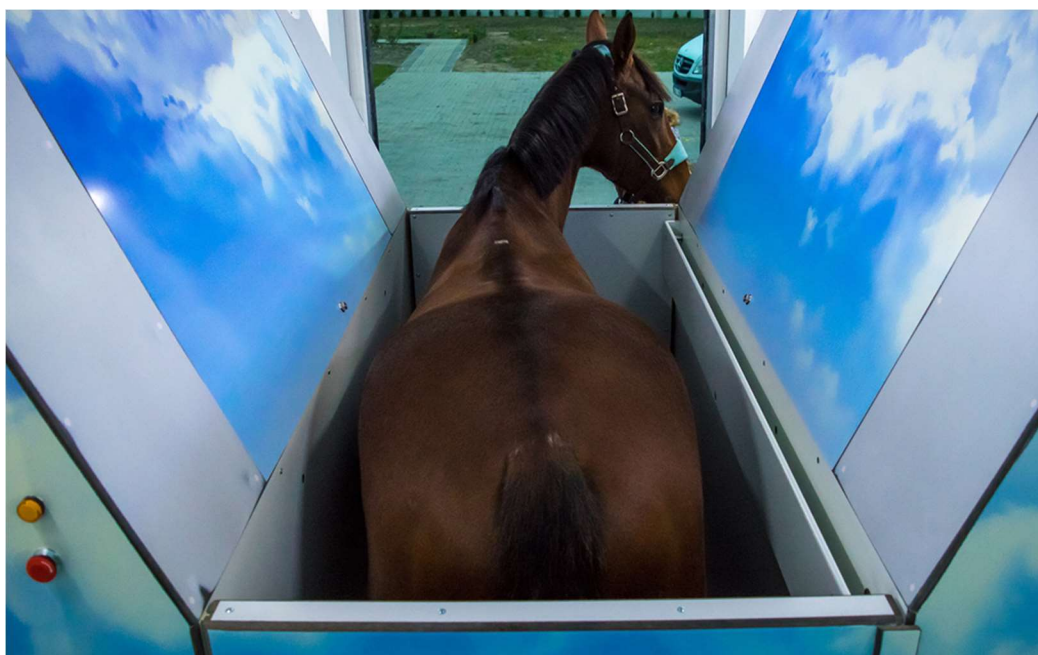


En médecine équine, les modèles proposés à l'heure actuelle sont l'équivalent de cabine de cryothérapie. Il s'agit le plus souvent de vans deux places adaptés pour recevoir les conteneurs d'azote liquide d'un côté et un cheval de l'autre. La tête du cheval est placée à l'extérieur pendant la durée de la manipulation pour limiter l'inhalation d'azote. La figure 3 montre un exemple de cabine de cryothérapie équine utilisée dans l'étude de Bogard *et al.* (2020). C'est le principe qui a été utilisé par le constructeur Cryomanufacturing (2022) pour son modèle de cryocabine destinés aux chevaux. D'autres modèles de cabines fixes existent mais le principe reste basé sur celui de la CCP. Elles se présentent sous la forme de caisson dont la partie haute est ouverte. La figure 4 présente un exemple de cryocabine réalisée selon ce modèle. Cette solution a été utilisée par plusieurs constructeurs notamment Space Cabin (2022), Life BSE (2022) et REVIVE® (2022). Le niveau d'azote dans ces cabines est maintenu juste au-dessus du dos du cheval. Il est donc possible que le refroidissement de cette zone ne soit pas équivalent à celui observé dans les cryocabines en van. Il n'existe actuellement pas de cryochambre destinée aux chevaux.

Figure 3 : Cryocabine destinée aux chevaux (A). Position de la tête dans la cryocabine (B) (d'après Bogard *et al.*, 2020)



Figure 4 : Cryocabine destiné aux chevaux, exemple de caisson de cryothérapie (crédit : Life BSE, 2022)



B. Déroulement d'une séance

L'aval d'un médecin est nécessaire avant toute séance de cryothérapie afin de s'assurer de l'absence de contre-indications. Les patients portent des maillots de bain classiques. Les extrémités sont protégées du froid par le port de gants et de chaussures. En CCE, un bandeau pour les oreilles et un masque chirurgical est ajouté afin de limiter la respiration d'un air trop froid. Les patients doivent être totalement sec, une serviette est passée sur le corps avant l'application du traitement pour retirer toute sueur. Les éventuelles blessures doivent être protégées. En CCP, le patient reste immobile pendant la séance. Le niveau d'azote est maintenu en bas du cou pour limiter l'inhalation. En CCP, le patient passe dans une chambre d'acclimatation pendant environ 1 minute puis passe dans la chambre principale. Pendant toute la durée du traitement il doit rester en mouvement (marche lente). Pour les deux modalités le temps de traitement varie selon les indications et les opérateurs. (Bouzigon *et al.*, 2016)

En CCE équine, les chevaux doivent être déferés et secs. Des bouchons peuvent être placés dans les oreilles pour les chevaux sensibles aux bruits. Aucune autre protection n'est nécessaire. Ils sont ensuite chargés dans la cabine pour le traitement. La tête est sortie de la cabine. Une personne compétente reste à la tête pendant la durée du traitement afin de pouvoir gérer un éventuel problème au cours de la séance. Les séances semblent être relativement bien tolérées chez les chevaux désensibilisés à la technique cependant une période d'acclimatation est nécessaire pour certains chevaux notamment pour la montée dans le van. La sédation n'est pas nécessaire. Ils doivent ensuite marcher pendant 15 minutes après la séance (Roszkowska *et al.*, 2018).

3. Coûts et contraintes

Les appareils de CCP représentent un investissement de départ moins élevé que celui nécessaire pour des chambres de cryothérapie. Il faut compter entre 80 000 et 350 000 euros pour des

cryocabines et entre 45 000 et 60 000 euros pour des cryochambres (Bouzigon *et al.*, 2016). A ce prix s'ajoutent des frais de fonctionnement et de maintenance. L'ensemble de ces frais est présenté dans le tableau 1.

Tableau 1 : Tableau des coûts d'investissement et de fonctionnement (d'après Legrand, 2014)

	Chambre de CCE électrique à deux chambres	Chambre de CCE à gaz à deux chambres	Cryocabine de CCP
Investissement initial			
Construction et livraison (prix moyen)	220 000 €	100 000 €	46 000 €
Coût d'installation annexes : travaux immobiliers	Local technique contigu pour la machinerie Climatisation (recommandé)	Coût d'installation d'une citerne (1200 à 12 000L) avec stockage normalisé de l'azote et accès extérieur normalisé pour le camion de livraison du gaz Coût pour l'arrivée de gaz et l'extracteur d'air Climatisation (recommandé)	Coût pour l'arrivée de gaz et l'extracteur d'air : 1700 € HT Climatisation souvent recommandée
Coût sécurité surveillance oxygène	Non	Coût pour système de détection d'oxygène, alarme et installation : 2500 € HT	Coût pour système de détection d'oxygène, alarme et installation : 2500 € HT
Coût de fonctionnement			
Coût contenant		Coût location citerne (exemple pour 3000L environ 400 € par mois)	Coût d'une bonbonne pressurisée à double paroi (achat) : 6000 € HT volume de 200L. La location des bonbonnes simple ou double paroi est également possible
Coût électricité	Pour une utilisation de 8h par jour, 288 jours	Consommation très faible	Consommation très faible

	par an : 480€/mois (sur la base de 0.12€/KW)		
Coût d'azote	Non	Coût d'un remplissage de cuve et volume du contenant, peut descendre à 0,40€ HT pour des cuves de gros volume Refroidissement de la chambre 50kg +2.5 kg par minute Coût d'évaporation de l'azote, plus élevé si grande distance entre citerne et chambre de cryothérapie	0,70 € à 1€ HT le litre (dépend du volume du contenant) Refroidissement 3kg puis environ 1kg par minute soit 4 à 6L par session + évaporation de l'azote Coût d'évaporation de l'azote : Elle peut aller jusqu'à 10% pour les industrielles simple paroi. Elle sera de 1 à 2% en cas de bonbonne médicale double paroi neuve.
Maintenance	4000€ annuel environ, dépendant des contrats		2 fois par an pour vérification notamment des circuits. Environ 4000€ annuels

L'azote liquide est un point important de dépense et de contraintes réglementaires et techniques. Les appareils de CCP, bien que moins chers à l'achat, sont de gros consommateurs d'azote liquide. Le coût de l'azote pour le fonctionnement d'un tel appareil peut être estimé entre 20 000 et 30 000 euros par an (Bouzigon *et al.*, 2016). Par ailleurs le stockage et la livraison d'azote liquide doivent répondre à des normes de sécurité contraignantes ce qui peut rendre le déplacement des cryocabines sur les événements sportifs compliqué. Pour les chambres de cryothérapie fonctionnant à l'azote, le stockage de l'azote constitue aussi un point clé puisqu'une citerne extérieure d'une capacité de 1200 à 10 000 litres doit être installée sur un sol adapté avec un accès sécurisé et adapté pour la livraison (Legrand, 2014). La consommation d'azote par les cabines conçues pour les chevaux est encore plus élevée compte-tenu du volume à refroidir. La consommation d'azote atteint les 20 à 30 kg d'azote par séance (Roszkowska *et al.*, 2018).

Les chambres à compresseur électrique ne dépendent pas de cette consommation d'azote. En revanche la majorité d'entre elles nécessite la présence d'un accès à une tension de 380Volts qui n'est pas disponible dans tous les bâtiments (Bouzigon *et al.*, 2016). Les cabines équinnes nécessitent un accès à une tension de 250Volts ce qui est plus commun mais peut représenter un frein lors de certains événements (Roszkowska *et al.*, 2018).

4. Aspects réglementaires

La législation entourant la CCE en médecine humaine est floue. En effet la cryothérapie est mentionnée dans le code de santé publique comme un acte médical ne pouvant être réalisé que par un médecin ou un masseur-kinésithérapeute. Cependant dans cet article le terme cryothérapie se réfère aux pratiques de cryothérapie aboutissant à la destruction même limitée du tégument (Ministère de la santé publique et de la population, 1962). Il semblerait donc que la CCE ne soit pas concernée par cet article étant donné que le tégument doit rester intègre après la séance (Ben Khedher Balbolia *et al.*, 2019). Cependant ce même article est cité en réponse à une question, à propos de la CCE, à la Ministre des solidarités et de la santé dans le Journal Officiel du Sénat du 19 mars 2020 dans lequel il est précisé d'une part que « les cabines de cryothérapie corps entier sont des dispositifs médicaux et répondent aux exigences de la directive 93/42/CEE, et à partir du 26 mai 2020 à celle du règlement européen pour les dispositifs médicaux 2017/745 » et d'autre part que « le code de la santé publique limite aux seuls médecins et masseurs-kinésithérapeutes dans leur exercice et donc dûment inscrits à leurs ordres respectifs, la mise en oeuvre de cette technique. Toute utilisation par d'autres personnes à des fins médicales est constitutive d'un exercice illégal de la médecine ou de la masso-kinésithérapie » (Le Sénat, 2019). Par ailleurs lors d'un jugement datant du 10 mai 2022, un directeur de salon de beauté a été condamné pour exercice illégal de la médecine à la suite d'une séance de CCE effectuée sans supervision d'un médecin et ayant entraîné des brûlures au deuxième et au troisième degrés (LEGIFRANCE, 2022). Il semble donc que la CCE puisse être considérée comme un acte médical et à ce titre soit réglementée.

Concernant la médecine vétérinaire, l'Ordre des vétérinaires a classé les appareils de cryothérapie gazeuse à l'azote liquide comme du matériel réservé exclusivement à une utilisation vétérinaire (Liot *et al.*, s. d.). Bien que dans ce même rapport il n'y ait pas de mention de la CCE comme un acte vétérinaire, le classement des appareils utilisant de l'azote, seuls disponibles en médecine vétérinaire actuellement, rend la pratique de la CCE limitée au vétérinaire. Par ailleurs la cryothérapie est un acte qui est déléguable « à l'exclusion de tout agent provoquant une modification profonde de la température tissulaire. » (Liot *et al.*). La limite à partir de laquelle la modification est considérée comme profonde n'est pas explicitée. Le caractère déléguable ou non de la CCE n'est donc pas réellement défini à ce jour.

Concernant l'usage de la cryothérapie en compétition, elle est interdite lors des événements FEI et à partir de 5 jours avant l'évènement (FEI, 2022). En course de trot, la présence d'un appareil de cryothérapie est interdite sur l'hippodrome (Société d'encouragement à l'élevage du cheval français, 2022) tandis que son utilisation sur un cheval déclaré partant avant la course est interdite en course de galop (France Galop, 2022). Aucune différence n'est faite entre la cryothérapie locale et la CCE dans les règlements précédents.

Deuxième partie : Effets physiologiques de la cryothérapie corps entier

1. Réponse thermique

L'humain est un mammifère homéotherme. Sa température interne est maintenue dans un intervalle limité malgré un effort intense ou des conditions environnementales parfois extrêmes (Tansey et Johnson, 2015). Elle est de 37°C. Le maintien de cette température interne est essentiel pour la survie puisque le fonctionnement optimal de l'organisme en dépend. La zone de neutralité thermique est définie comme l'intervalle de température dans lequel l'animal maintient sa température sans ou avec peu de dépenses énergétiques. Elle est comprise entre 25 et 30°C pour un homme adulte nu, des variations individuelles peuvent intervenir (Morgan, 1998). Cette zone est bornée par les températures critiques inférieure et supérieure. En dessous de la température critique inférieure la perte de chaleur dépasse la production, l'organisme augmente donc la thermogénèse pour maintenir une température constante jusqu'à atteindre la température létale inférieure où les pertes de chaleurs dépassent les capacités de production.

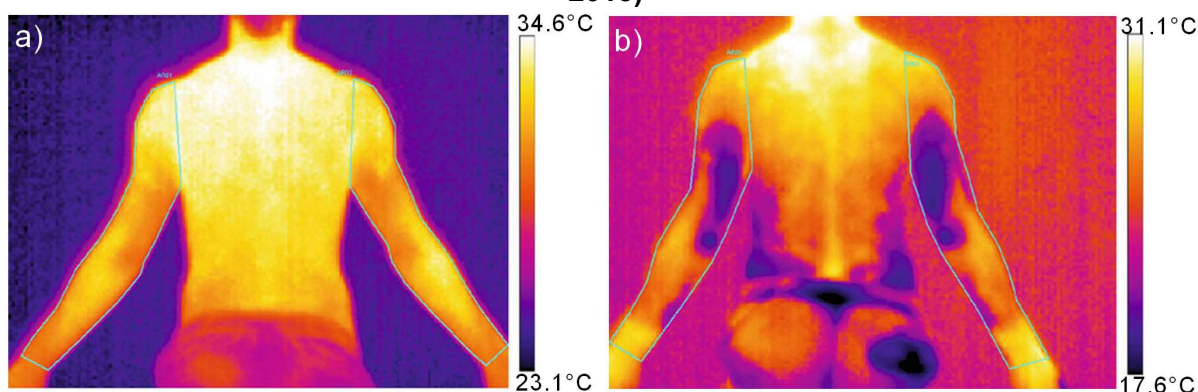
Lors d'une séance de cryothérapie, l'individu est soumis à des températures extrêmes, bien en dessous de la température critique inférieure et de la température létale inférieure, mais pendant un temps relativement court qui ne met donc pas sa vie en danger. Cependant même court, ce temps d'exposition est suffisant pour induire l'activation des mécanismes de thermorégulation et des changements de températures.

A. Variation de la température de la peau

La peau est un organe très exposé et par conséquent très soumis aux variations extérieures. La température de la peau varie selon plusieurs paramètres notamment la température ambiante et la température interne (Romanovsky, 2014). La cryothérapie aura donc un impact sur ce paramètre.

La première observation qu'il est possible de faire est que la température moyenne de la peau chute rapidement lors d'une séance de cryothérapie et cette diminution est variable en fonction des régions. Cette constatation a été confirmée par de nombreuses études (Westerlund *et al.*, 2003; Cholewka *et al.*, 2006, 2012; J.T Costello *et al.*, 2012; Dębiec-Bąk *et al.*, 2013; Savic *et al.*, 2013; Zalewski *et al.*, 2013; Fonda *et al.*, 2014; Selfe *et al.*, 2014). Ces disparités peuvent être visualisées par imagerie thermique en comparant les thermogrammes obtenus avant et après cryothérapie comme le montre la figure 5.

Figure 5 : Exemple de thermogramme du haut du corps d'un homme en face dorsale : a) avant cryothérapie et b) 5 minutes après 3min de CCE à -120°C (d'après Dębiec-Bąk et al., 2013)



On observe des différences dans les températures superficielles déjà avant traitement qui s'accroissent après le traitement. Ces variations ne diffèrent que de quelques degrés et ne peuvent pas toujours être considérées comme significatives. Elles sont liées aux caractéristiques différentes des tissus sous cutanés et cutanés en fonction des zones. Après une CCE, les différences de température entre les zones deviennent significatives (Zalewski *et al.*, 2013). Les températures de la peau sont donc plus diverses après la CCE et certaines anomalies thermiques sont plus visibles après une séance de CCE, par conséquent le diagnostic thermique post-CCE peut être intéressant. Les zones sur lesquelles la chute de température est la plus élevée sont les extrémités basses et les bras tandis que la tête et le tronc subissent une chute moins importante (Westerlund *et al.*, 2003; Cholewka *et al.*, 2012; Dębiec-Bąk *et al.*, 2013; Fonda *et al.*, 2014). Le tableau 2 présente les températures de la peau des différentes zones du corps avant et après CCE avec un protocole de 2 minutes à -110°C en cryochambre.

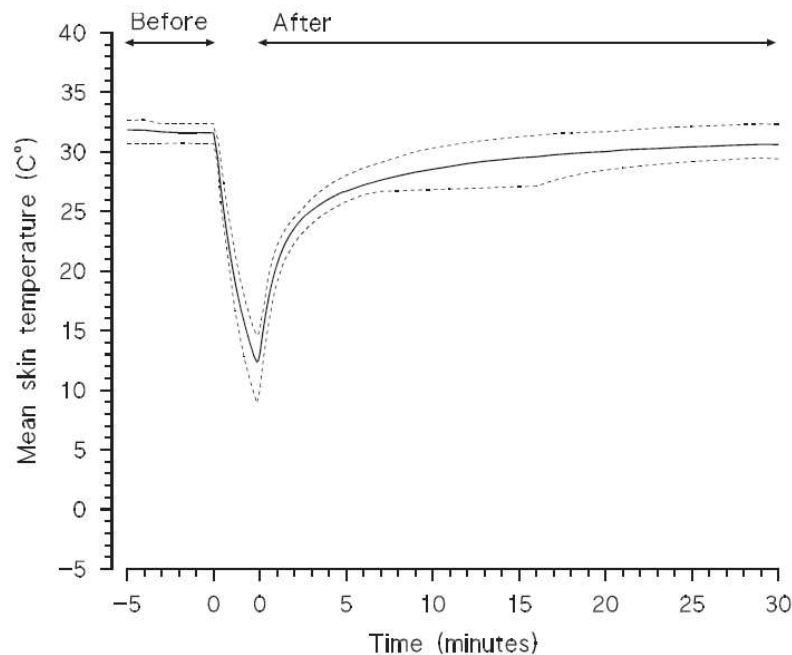
Tableau 2: Températures moyennes et locales de la peau 5 minutes avant la CCE et valeur la plus basse enregistrée pendant la séance de CCE (2 min, -110°C en cryochambre), 10 sujets (d'après Westerlund *et al.*, 2003)

Régions	Valeur de référence (°C) (Ecart type)	Valeur la plus basse pendant CCE (°C) (Ecart type)
Température moyenne de la peau	31,8 (0,65)	12,4 (1,8)
Front	34,1 (0,65)	19,1 (5,6)
Buste	32,6 (1,1)	15,7 (4,4)
Dos	31,8 (1,3)	13,1 (4,1)
Bras	31,9 (1,2)	9,2 (2,9)
Avant-bras	31,8 (0,88)	5,2 (2,8)
Paume de la main*	31,3 (1,3)	25,3 (2,4)
Cuisse	30,5 (0,87)	7,9 (3,9)
Genou	31,2 (0,35)	5,3 (3,0)
Pied*	32,3 (0,97)	23,6 (3,4)

*Parties couvertes lors de l'expérience

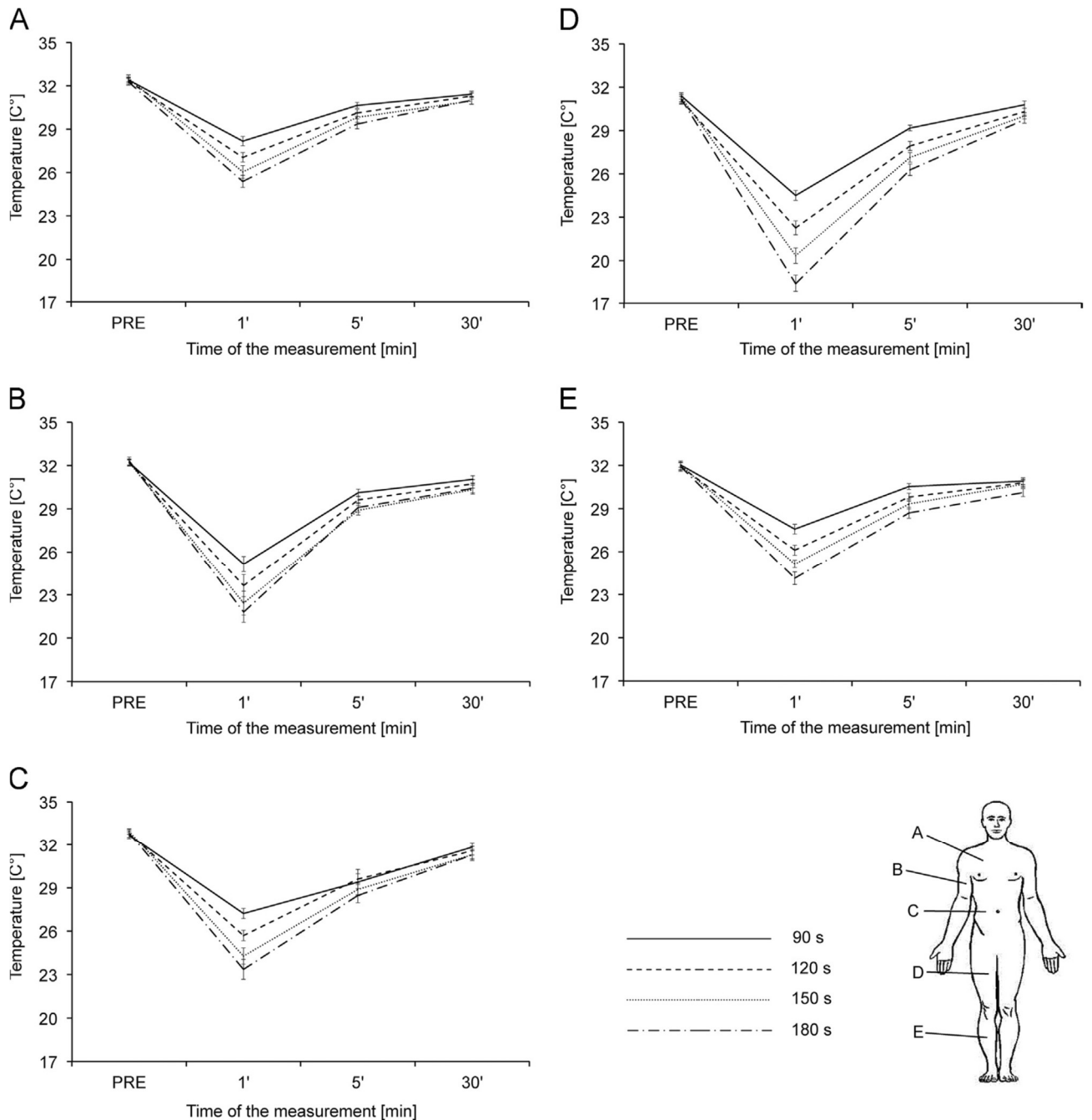
Après CCE, la température de la peau augmente rapidement pendant quelques minutes (moins de 5 minutes) puis l'augmentation est plus lente. Il faut plus de 30 minutes pour atteindre la température initiale. Cette évolution est présentée dans la figure 6. L'étude de Zalewski *et al.* (2013) montre un retour aux valeurs physiologiques des températures de la peau dans les 3 heures post CCE. Pour la poitrine, l'abdomen et les bras la température de la peau est significativement supérieure à la valeur avant cryothérapie 3 heures post CCE. Après 6 heures, toutes les températures sont significativement supérieures.

Figure 6 : Température moyenne de la peau avant (5min), pendant (2min) et après (30min) CCE (2 min, -110°C), 10 sujets (d'après Westerlund *et al.*, 2003)



Plusieurs études ont cherché à déterminer l'influence de la température et du temps d'exposition sur la température de la peau pendant et après cryothérapie. Il a été montré que le temps d'exposition joue un rôle majeur. En effet, plus le temps d'exposition est long, plus la chute de température de la peau est importante et plus le retour à la normale est long (Dębiec-Bąk *et al.*, 2013; Fonda *et al.*, 2014; Selfe *et al.*, 2014). L'influence du temps d'exposition est présentée en figure 7. L'influence de la température d'exposition est plus discutable. L'étude de Dębiec-Bąk *et al.* (2013) a montré une différence non significative entre la température de la peau des sujets exposés à -120°C pendant 3 minutes par rapport à ceux exposés à -140°C. Après 30 minutes post-CCE, la température de la peau est plus dépendante du temps d'exposition que de la température d'exposition et des résultats similaires sont observés avec des températures de -120°C et -140°C.

Figure 7 : Profils de température de la peau pour différentes régions du corps et différents temps d'exposition à la CCP (90s, 120s, 150s, 180s) (entre -130 et -170°C, cryocabine) (d'après Fonda *et al.*, 2014)



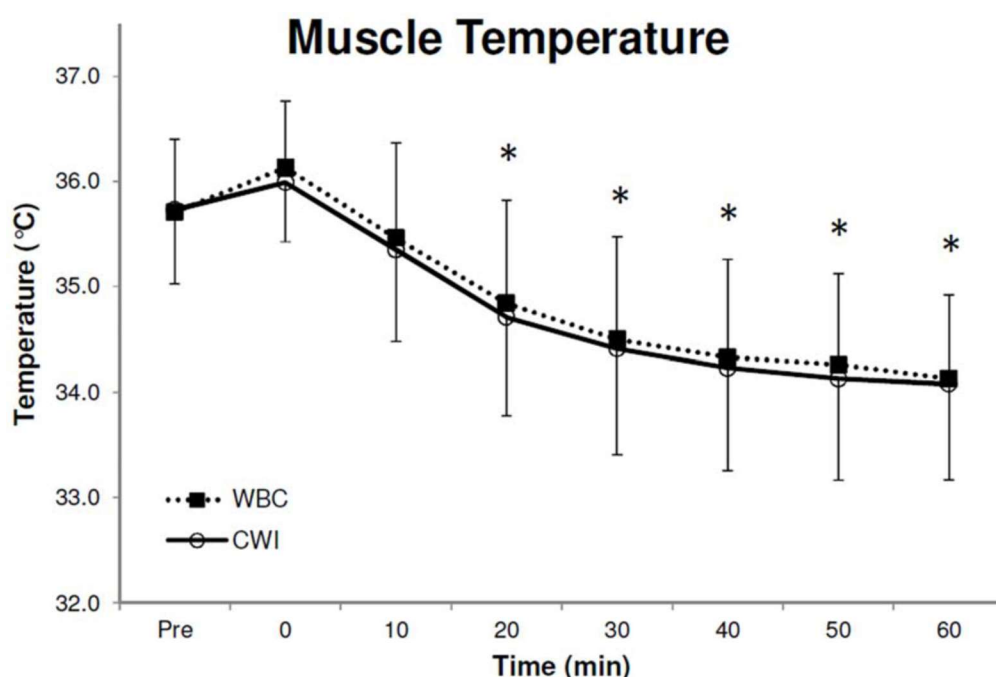
L'intensité du refroidissement de la peau est aussi dépendante des caractéristiques personnelles du sujet traité comme sa taille, sa réponse au stress thermique et son IMC. Il existe une corrélation positive entre l'IMC et la température post-CCE (Cholewka *et al.*, 2006).

La CCE et la CCP ne permettent pas un refroidissement de la peau équivalent. En effet l'étude d'Hauswirth *et al.*, 2013 compare deux protocoles de CCE et de CCP : -110°C pendant 3 minutes en CCE et -160°C pendant 3 minutes en CCP. Le résultat met en évidence que les températures de la peau sont plus basses après une séance de CCE qu'après une séance de CCP sur les protocoles habituellement employés.

B. Variation de la température musculaire

Dans l'étude de Costello *et al.* (2012) l'impact de la CCE sur la température musculaire est étudié. La température est mesurée grâce à une sonde insérée dans le muscle vaste latéral à une profondeur de 3cm en dessous du tissu sous-cutané. La température est suivie avant, pendant et jusqu'à 60 minutes après la CCE. Au moment de l'insertion de la sonde et de son retrait, les températures à 1cm et 2cm de profondeur sont aussi évaluées. Une diminution significative de la température est observée après la séance à partir de 20 minutes post-CCE. La température musculaire profonde (3cm) continue de descendre 60 minutes après l'exposition. L'évolution obtenue est présentée en figure 8. La température superficielle du muscle (1 et 2 cm) diminue aussi significativement et de façon plus importante que la température profonde.

**Figure 8: Température du muscle vaste latéral à 3cm de profondeur avant et après CCE (-110°C, 3min) (pointillés) (d'après Costello *et al.*, 2012)
WBC :CCE, CWI : immersion dans l'eau froide**



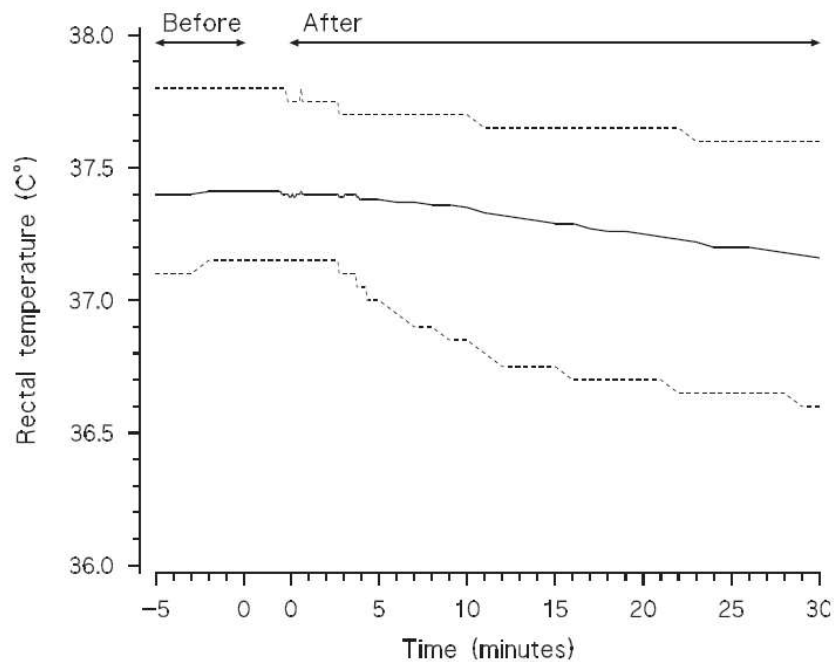
L'étude de Costello *et al.* (2012) ne permet que de dégager une tendance. En effet la température musculaire n'a été mesurée que sur une localisation alors qu'il est possible que la réponse thermique soit différente en fonction des muscles comme elle l'est sur la peau. Par ailleurs la température musculaire a été prise relativement en surface du muscle, à 3cm de profondeur au maximum. Il serait intéressant d'avoir des valeurs de température plus en profondeur.

C. Variation de la température interne

Dans la majorité des études, le constat est que la température interne reste constante pendant l'exposition et immédiatement après (Westerlund *et al.*, 2003; Costello *et al.*, 2012; Zalewski *et al.*, 2014). Elle diminue après l'exposition (Westerlund *et al.*, 2003). La diminution devient significative après 40 minutes et atteint un minimum environ 60 minutes post-CCE à 36,8°C contre 37,1°C avant. (J.T Costello *et al.*, 2012; Zalewski *et al.*, 2014) Cette chute de température est liée à un phénomène appelé « afterdrop » défini comme une diminution continue de la température interne

pendant la période initiale du réchauffement après retrait de la source de froid. Ce phénomène fait intervenir deux modes de transfert de chaleur : la convection et la conduction. La convection intervient via le retour du sang périphérique refroidi à la circulation centrale. La conduction est liée à la mise en place d'un gradient de température entre la peau et les organes internes (Romet, 1988; Westerlund *et al.*, 2003). L'évolution de la température après CCE pendant ce phénomène d'afterdrop est présenté en figure 9. Malgré une diminution, la température reste dans une zone acceptable pour l'organisme (Westerlund *et al.*, 2003).

Figure 9 : Température rectale moyenne de 10 sujets avant, pendant et après CCE (2min, - 110°C) (d'après (Westerlund *et al.*, 2003))



Seule une étude a constaté une augmentation de la température interne immédiatement après CCE (Selfe *et al.*, 2014). Dans cette étude la température interne était mesurée par un capteur avalé par les participants. Cette différence dans le recueil des données n'explique pas cette constatation puisque l'étude de Zalewski *et al.* (2013) utilisait le même procédé et montrait une diminution.

Une augmentation de la température interne est observée 3h après CCE. Elle est significative à 6h post-CCE. Elle atteint 37,4°C 6 heures après l'exposition contre 37.1°C en moyenne avant. Cette augmentation est liée à une boucle de rétroaction négative du centre hypothalamique de la température et témoigne de la perturbation de l'équilibre thermique (Zalewski *et al.*, 2013).

2. Effets de la cryothérapie corps entier sur l'appareil cardio-pulmonaire

A. Réponse cardio-vasculaire à la cryothérapie corps entier

L'exposition à un froid aussi intense que celui employé lors de la CCE est un stress pour l'organisme qui peut entraîner des modifications dans le fonctionnement du corps notamment dans celui de l'appareil cardio-vasculaire.

Une différence de réponse de la fréquence cardiaque est observée entre la CCE et la CCP. En effet on constate une diminution de la fréquence cardiaque à la suite de l'exposition à la CCE (Hausswirth *et al.*, 2013; Zalewski *et al.*, 2014). Dans le cas de la CCP, cette diminution est moins prononcée (Hausswirth *et al.*, 2013) ou absente (Fonda *et al.*, 2014) selon les études. Dans l'étude de Hausswirth *et al.*, 2013, la fréquence cardiaque est réduite de $9,4 \pm 2,1$ battements par minute après une séance de CCE et $-6,8 \pm 1,8$ battements par minute après une séance de CCP soit une réduction de 15,2% pour la CCE contre 10,9% pour la CCP. Une réaction spécifique au refroidissement de la tête ou un refroidissement plus intense avec la CCE entraînant une activation plus importante du système nerveux parasympathique a été évoquée comme hypothèse expliquant cette différence. Cette deuxième hypothèse a été écartée dans l'étude de Fonda *et al.* (2014) dans laquelle aucun changement de fréquence cardiaque n'était observé après des séances de CCP de différentes durées. L'augmentation du temps d'exposition permettait de faire descendre la température de la peau à des niveaux équivalents à ceux observés en CCE sans modification de la fréquence cardiaque. La différence se situe donc bien dans le refroidissement de la tête ou non (Fonda *et al.*, 2014). Le refroidissement de la tête chez des patients au repos entraîne une augmentation de la pression sanguine et une bradycardie liée à une stimulation vagale (Leblanc *et al.*, 1975). La bradycardie est passagère, la fréquence cardiaque se normalise dans les 3 heures après la CCE (Zalewski *et al.*, 2014).

Par ailleurs l'exposition à la CCE provoque une augmentation du volume d'éjection systolique probablement liée à une augmentation du temps de remplissage ventriculaire due à la bradycardie induite. De la même manière que pour la fréquence cardiaque, cette augmentation est passagère et la valeur du volume d'éjection systolique se normalise dans les 3h après la CCE et reste dans ces valeurs 6 heures après l'exposition. Malgré l'augmentation du volume d'éjection systolique on observe une diminution du débit cardiaque causée par la diminution concomitante de la fréquence cardiaque (Zalewski *et al.*, 2014).

L'effet de la CCE sur la pression artérielle est discuté. En effet certaines études montrent une augmentation significative des pressions artérielles systolique, diastolique et de la pression artérielle moyenne (Westerlund *et al.*, 2004; Lubkowska et Suska, 2010; Lubkowska et Szygula, 2011). Les résultats de ces études sont présentés dans le tableau 3. Par ailleurs l'augmentation est transitoire puisque les pressions artérielles reviennent à leurs valeurs initiales dans les 10 minutes après l'exposition (Lubkowska et Suska, 2011). Enfin il est constaté une très forte variation inter-individuelle dans la réponse des pressions artérielles à la CCE, même dans les études montrant une augmentation en moyenne (Lubkowska et Suska, 2011; Westerlund *et al.*, 2004). En effet, chez certains individus aucun changement de pression artérielle n'était visible (Lubkowska et Suska, 2011). Il n'y a pas de mécanisme d'adaptation de la pression artérielle après des séances répétées de CCE. Les modifications observées restent comparables (Westerlund *et al.*, 2004; Lubkowska et Szygula, 2010). D'autres études ne mettent en évidence

aucune modification significative de la pression artérielle après CCE (Fonda *et al.*, 2014; Zalewski *et al.*, 2014). La première différence entre ces études réside dans le mode de cryothérapie : CCE ou CCP. En effet, l'étude de Fonda utilise un appareil de CCP. La tête n'est donc pas incluse dans l'appareil. Or le refroidissement de la tête provoque une augmentation de la pression sanguine (LeBlanc *et al.*, 1975). Par ailleurs dans l'étude d'Hauswirth *et al.* (2013) la CCE et la CCP sont comparées. On observe une augmentation des pressions artérielles systolique et diastolique après une exposition à la CCE tandis qu'aucune différence significative n'est détectée après une séance de CCP. Dans l'étude de Zalewski *et al.* (2013) il s'agit bien de CCE à proprement parlé cependant la différence mesurée n'est pas significative.

Tableau 3 : Pressions artérielles avant exposition et variation obtenue après exposition à la CCE, synthèse des résultats des études de Westerlund *et al.*, 2004; Lubkowska et Szyguła, 2010; Lubkowska et Suska, 2011

Etude	Protocole	Pression artérielle systolique (mmHg)		Pression artérielle diastolique (mmHg)		Pression artérielle moyenne (mmHg)	
		PAS moyenne avant	Δ PAS	PAD moyenne avant	Δ PAD	PAM moyenne avant	Δ PAM
Lubkowska et Szyguła, 2010	CCE, -130°C, 3min	127 (7,5)	20,4** (13,5)	77,0 (9,0)	6,0** (4,3)	94,0 (9,8)	9,0* (4,3)
Lubkowska et Suska, 2011	CCE, -130°C, 3min	124 (7,5)	21,4** (9,5)	75 (6)	9** (3,3)	79 (17)	10* (3,2)
Westerlund et al., 2004	CCE, -110°C	128 (12)	23,6* (4)	81 (9)	4,8* (3,1)	/	/

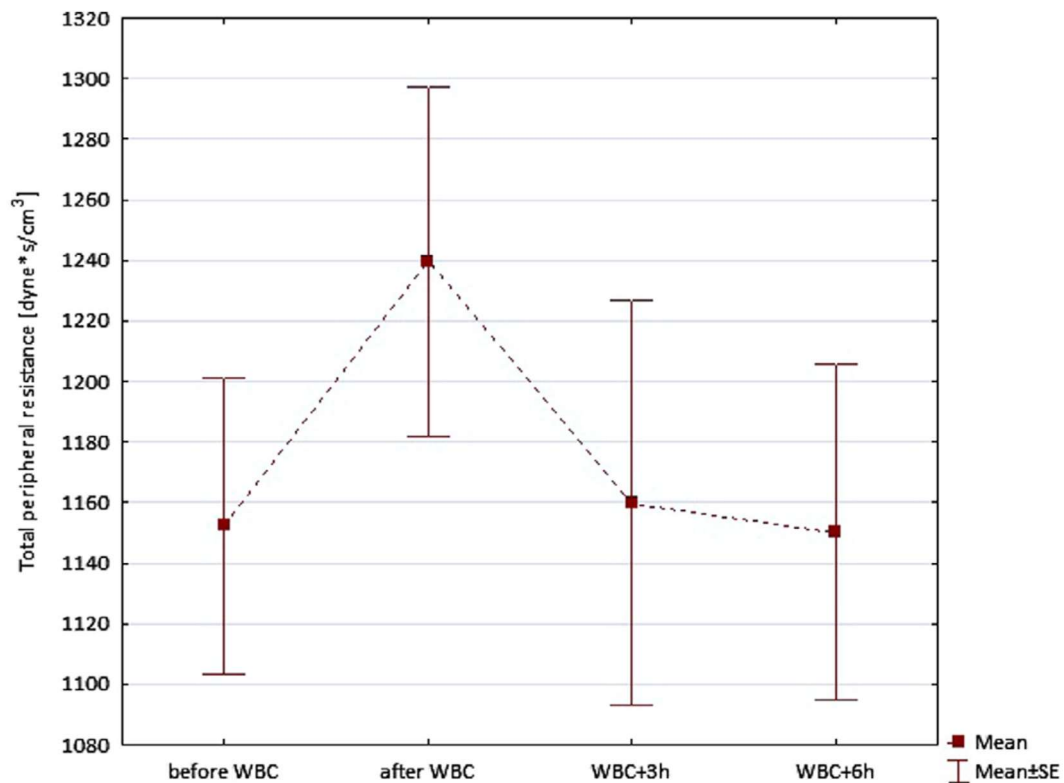
*Différence significative entre avant et après CCE ($p < 0.05$)

**Différence significative entre avant et après CCE ($p < 0.001$)

L'un des mécanismes majeurs de thermorégulation est la vasoconstriction périphérique. Cette réponse au froid permet de limiter les échanges de chaleur par convection entre les organes vitaux et les couches superficielles du corps au contact du froid. Par ailleurs la vasoconstriction périphérique participe à la diminution de la température cutanée permettant ainsi de diminuer le gradient thermique entre l'extérieur et la peau (Castellani *et al.*, 2002). Ces mécanismes de vasoconstriction périphérique sont aussi mis en place lors d'une séance de CCE où l'exposition au froid est très brève mais intense. En effet de l'étude Zalewski *et al.* (2013) révèle une augmentation de la résistance périphérique immédiatement après CCE par rapport à la valeur mesurée avant. Cette augmentation est légère mais significative ($p = 0,0425$). Cependant il s'agit d'une modification brève puisqu'elle n'est plus observable 3 et 6 heures après l'exposition. Les valeurs de résistances périphériques sont alors revenues à des valeurs similaires à celles observées avant la séance. Cette évolution des résistances périphériques est présentée en figure 10. Une autre méthode pour évaluer la microcirculation est l'imagerie de viabilité tissulaire. C'est une technique qui utilise la spectroscopie en lumière polarisée pour évaluer la présence ou

l'absence de globules rouges dans les capillaires sanguins du derme, ce qui permet d'évaluer la microcirculation. L'index de viabilité tissulaire est lié à la concentration de globules rouges dans un tissu (O'Doherty *et al.*, 2007). Cette technique a été utilisée pour évaluer la perfusion sanguine de la peau après une séance de CCE de 3min à -110°C . Une réduction d'au moins 50% de l'index de viabilité tissulaire a été identifiée chez 4 des 5 patients étudiés. Cette diminution intervient dans les 5 premières minutes (Costello *et al.*, 2014).

Figure 10 : Valeurs de résistance périphérique totale ($\text{dyn} \times \text{s}/\text{cm}^3$) avant, immédiatement après, 3h et 6h après CCE (-120°C , 3min) (d'après Zalewski *et al.*, 2013)



B. Réponse de l'appareil respiratoire à la cryothérapie corps entier

L'exposition soudaine à une température froide est à l'origine de plusieurs réponses respiratoires incontrôlables liées au choc thermique tel qu'une augmentation de la ventilation, une bronchoconstriction et une coupure réflexe du souffle (Keatinge et Nadel, 1965). Par ailleurs une bronchoconstriction peut être observée lors du refroidissement cutané de la tête ou lors de la respiration d'air froid avec un haut niveau de ventilation (Berk *et al.*, 1987).

Une augmentation de la fréquence respiratoire et du volume d'air expiré est présente immédiatement après une séance de CCE de 2 minutes 30 à -140°C . Cette augmentation est très transitoire puisque les valeurs retournent à la normale pendant la deuxième minute post-CCE (Hammond *et al.*, 2020).

Le débit expiratoire de pointe (DEP) et le volume expiratoire maximal par seconde (VEMS) sont des mesures renseignant sur le degré d'obstruction des voies respiratoires profondes. L'étude de Smolander *et al.* (2006) s'intéresse à l'effet de la CCE sur ces mesures sur le court terme et après plusieurs expositions. Les résultats ne montrent aucune différence significative entre la valeur de DEP avant et 2 minutes après CCE et ce pendant les 12 semaines de l'expérience à

raison de 2 expositions par semaine. Cependant une diminution du DEP a été observée 30 minutes après CCE et devient significative après 1 mois d'expérimentation. Cette réduction est de 5,1+/- 1,2% à un mois pour une valeur de départ avant CCE à 517,2 L/min. Pour le VEMS, une réduction 30 minutes après CCE était observée. Cette réduction était cependant minime par rapport à celle identifiée dans d'autres études mesurant les effets du refroidissement de la tête et de la respiration d'air froid. Cette réduction plus légère peut s'expliquer par l'utilisation de masque lors des séances de CCE et par la durée très courte de l'exposition au froid pendant les séances. La CCE induit donc une bronchoconstriction transitoire chez les individus en bonne santé. Cette bronchoconstriction est sans danger pour la fonction respiratoire.

3. Effets de la cryothérapie corps entier sur les paramètres sanguins

A. Hématologie

a. Population érythrocytaire

L'effet de la CCE sur la population érythrocytaire n'est pas défini avec certitude et diffère selon les études. Les résultats de ces études sont présentés dans le tableau 4 et dans l'annexe 1 pour la version détaillée.

Certaines études montrent une diminution de la numération érythrocytaire, de l'hématocrite ainsi que du taux d'hémoglobine (Klimek *et al.*, 2010; Lombardi *et al.*, 2013; Szygula *et al.*, 2014; Wyrostek *et al.*, 2021). L'explication avancée par Szygula *et al.* (2014) serait une hémolyse intravasculaire dont l'origine pourrait être la vasoconstriction ou les contractions musculaires en réponse au froid. Cette hypothèse est corroborée par une augmentation de l'hémoglobine plasmatique, de la bilirubine et une diminution de l'haptoglobine, une protéine de destruction de l'hémoglobine extra érythrocytaire. Ces changements sont liés au relargage et à la destruction de l'hémoglobine dans le plasma suite à la rupture des hématies (Szygula *et al.*, 2014). Par ailleurs on observe une augmentation de l'indice de distribution des globules rouges, du volume globulaire moyen et du nombre de réticulocytes (Lombardi *et al.*, 2013; Szygula *et al.*, 2014; Kulis *et al.*, 2017). Ces modifications pourraient peut-être indiquer une activation de l'érythropoïèse qui augmenterait le nombre de réticulocytes et donc modifierait les paramètres liés au volume et à la taille du fait de leur immaturité (Szygula *et al.*, 2014). Ces diminutions sont statistiquement significatives mais les valeurs restent dans les intervalles physiologiques. En effet l'étude de Lombardi montre une diminution de la numération érythrocytaire de $5,11 \pm 0,33 \times 10^{12}/L$ à $4,98 \pm 0,27 \times 10^{12}/L$ après CCE tandis que l'hématocrite baisse de 0,59 points et l'hémoglobine diminue de $150,6 \pm 8,4$ à $147,0 \pm 6,2$ (Lombardi *et al.*, 2013). Les changements observés sont réversibles. En effet la numération érythrocytaire, l'hématocrite et le taux d'hémoglobine reviennent à des valeurs normales entre la 20^{ème} et la 30^{ème} sessions soit entre la quatrième et la sixième semaine d'expérimentation (Szygula *et al.*, 2014).

D'autres études ne mettent en évidence aucune modification des paramètres liés à la population érythrocytaire après des séances de CCE (Ziemann *et al.*, 2012; Sutkowy *et al.*, 2014; Kulis *et al.*, 2017). Cette différence pourrait résider dans le type d'activité physique réalisée par les sujets des études (Lombardi *et al.*, 2013).

En revanche Banfi *et al.* (2009) postulent que la CCE réduit l'hémolyse liée à l'exercice. L'exercice physique est lié à une hémolyse intravasculaire dont l'origine est à la fois mécanique et métabolique (Lippi et Sanchis-Gomar, 2019). L'hypothèse de Banfi *et al.* (2009) repose sur une augmentation de la concentration d'haptoglobine et une absence de modification du volume globulaire moyen et du nombre de réticulocytes. Plusieurs explications à ce résultat ont été émises. Tout d'abord l'évolution de la concentration d'haptoglobine est le critère principal utilisé pour évaluer la présence d'une hémolyse ou pas dans cette étude. La concentration de cette protéine peut être influencée par des facteurs tels que des pathologies ou l'exercice physique. D'autres marqueurs permettant d'évaluer une éventuelle hémolyse n'ont pas été mesurés dans l'étude notamment l'hémoglobine plasmatique et la bilirubine (Szygula *et al.*, 2014). Par ailleurs le nombre de séances de CCE effectué dans cette étude est inférieur à celui réalisé dans les autres études puisqu'il n'est que de 5 contre 14 sessions dans l'étude de Lombardi *et al.* (2013) et 30 dans celle de Szygula *et al.* (2014).

L'absence de groupe contrôle non soumis à la CCE dans beaucoup d'étude rend l'interprétation des résultats compliquée. En effet les modifications observées pourraient être liées à l'activité physique réalisée par les participants en parallèle des séances de CCE et non aux séances de CCE.

Tableau 4 : Récapitulatif des résultats des études sur l'effet de la CCE sur la population érythrocytaire

Paramètre	Effets	Etude
Numération globulaire	Diminution	Lombardi <i>et al.</i> , 2013
		Klimek <i>et al.</i> , 2010
		Wyrostek <i>et al.</i> , 2021
	Diminution après 10 et 20 sessions Retour à la valeur de référence à 30 sessions	Szygula <i>et al.</i> , 2014
		Pas de différence
	Pas de différence	Sutkowy <i>et al.</i> , 2014
		Ziemann <i>et al.</i> , 2012
Kulis <i>et al.</i> , 2017		
Hématocrite	Diminution	Lombardi <i>et al.</i> , 2013
		Klimek <i>et al.</i> , 2010
		Wyrostek <i>et al.</i> , 2021
	Diminution après 10 et 20 sessions Retour à la valeur de	Szygula <i>et al.</i> , 2014

	référence à 30 sessions	
	Pas de différence	Kulis <i>et al.</i> , 2017
Taux d'hémoglobine	Diminution	Lombardi <i>et al.</i> , 2013
		Klimek <i>et al.</i> , 2010
	Diminution après 10 et 20 sessions	Szygula <i>et al.</i> , 2014
	Retour à la valeur de référence à 30 sessions	
	Pas de différence	Kulis <i>et al.</i> , 2017
		Ziemann <i>et al.</i> , 2012
		Wyrostek <i>et al.</i> , 2021
Volume globulaire moyen	Augmentation	Lombardi <i>et al.</i> , 2013
		Wyrostek <i>et al.</i> , 2021
	Pas de différence	Szygula <i>et al.</i> , 2014
		Kulis <i>et al.</i> , 2017
Teneur globulaire moyenne en hémoglobine	Pas de différence	Lombardi <i>et al.</i> , 2013
		Wyrostek <i>et al.</i> , 2021
		Szygula <i>et al.</i> , 2014
Concentration corpusculaire moyenne en hémoglobine	Diminution	Lombardi <i>et al.</i> , 2013
	Pas de différence	Szygula <i>et al.</i> , 2014
	Augmentation	Wyrostek <i>et al.</i> , 2021
Taux de réticulocytes	Pas de différence	Kulis <i>et al.</i> , 2017
Indice de distribution des globules rouges	Augmentation	Szygula <i>et al.</i> , 2014
		Lombardi <i>et al.</i> , 2013
	Pas de différence	Wyrostek <i>et al.</i> , 2021

b. Leucocytes

Les informations sur les effets de la CCE sur les leucocytes ne permettent pas de dégager une tendance. Plusieurs études s'y intéressent et obtiennent des résultats différents. Ces résultats sont présentés dans le tableau 5 et en annexe 2 pour la version détaillée.

Parmi ces études, trois constatent une augmentation du nombre de leucocytes après les sessions de CCE (Lubkowska *et al.*, 2010b; Ziemann *et al.*, 2012; Szygula *et al.*, 2014). Dans une étude réalisée sur 15 hommes de 21 ans en bonne santé soumis à 1 session par jour pendant 10 jours, Lubkowska *et al.* (2010) constatent une augmentation du nombre de leucocytes liée à une augmentation du nombre de monocytes, des lymphocytes, des neutrophiles et dans une moindre mesure des éosinophiles. Aucune modification de la numération des basophiles n'a été observée. L'étude de Szygula *et al.* (2014) révèle une modification de la formule avec une augmentation du pourcentage de lymphocytes après 20 sessions, du pourcentage de monocytes dès 10 sessions et jusqu'à 30 sessions et une augmentation du pourcentage de granulocytes après 10 et 20 sessions. Les valeurs ne dépassent pas les normes physiologiques (Lubkowska *et al.*, 2010b; Szygula *et al.*, 2014). Une mobilisation des lymphocytes depuis les organes lymphoïdes pourrait être à l'origine de cette augmentation du nombre de leucocytes observée dans ces études (Szygula *et al.*, 2014).

Pournot *et al.* (2011) se sont intéressés à l'effet de la CCE sur la récupération en comparaison avec une récupération passive. Une neutrophilie est observée 1 heure après l'exercice. Cette neutrophilie est plus marquée dans le groupe soumis à la CCE où l'augmentation des neutrophiles est de 114% contre 101% dans le groupe contrôle. L'exposition au froid intense entraîne donc une neutrophilie. Cette neutrophilie participe à une meilleure perfusion des tissus grâce à une augmentation de l'angiogenèse via l'expression du facteur de croissance de l'endothélium vasculaire.

La plupart des études ne montrent pas d'effet significatif de la CCE sur la numération leucocytaire (Pournot *et al.*, 2011; Lubkowska *et al.*, 2010b; Sutkowy *et al.*, 2014; Kulis *et al.*, 2017; Wyrostek *et al.*, 2021). Ces études ont été réalisées sur des sportifs de haut niveau (Lombardi *et al.*, 2013; Sutkowy *et al.*, 2014), des sportifs amateurs (Pournot *et al.*, 2011) et sur des individus présentant des pathologies comme une obésité (Wyrostek *et al.*, 2021) ou une spondylarthrite (Kulis *et al.*, 2017). Une hypothèse avancée dans l'étude de Szygula *et al.* (2014) pour expliquer cette différence de résultat serait une activation différente du système immunitaire chez les individus très athlétiques comme des sportifs de haut niveau par rapport à des individus lambda. Le système immunitaire des athlètes serait plus sensible aux conditions extrêmes. Cette hypothèse semble cependant être réfutée par les études ne démontrant aucune différence après des sessions de CCE sur des athlètes de haut niveau.

L'effet de la CCE sur la population leucocytaire n'est pas encore déterminé. Cependant il est probable que cet effet soit limité et qu'une différence significative soit donc difficile à obtenir sur des effectifs de petite taille. L'absence de groupe témoin, les effectifs limités et un nombre et des modes de session de CCE variables rendent les résultats des études peu comparables. Par ailleurs l'étude de Pournot *et al.* (2011) montre qu'il serait intéressant de suivre ces paramètres dans la durée après une exposition à la CCE. En effet certains effets ne sont peut-être observables que quelques heures suite à l'exposition.

Tableau 5 : Récapitulatif des résultats des études sur l'effet de la CCE sur la population leucocytaire

Paramètre	Effets	Etude
Numération leucocytaire	Augmentation	Szygula <i>et al.</i> , 2014

		Ziemann <i>et al.</i> , 2012
		Lubkowska <i>et al.</i> , 2010b
	Pas de différence	Lombardi <i>et al.</i> , 2013
		Sutkowy <i>et al.</i> , 2014
		Kulis <i>et al.</i> , 2017
		Pournot <i>et al.</i> , 2011
		Wyrostek <i>et al.</i> , 2021
Numération lymphocytaire	Augmentation	Lubkowska <i>et al.</i> , 2010b
	Pas de différence	Lombardi <i>et al.</i> , 2013
		Pournot <i>et al.</i> , 2011
		Wyrostek <i>et al.</i> , 2021
% de lymphocytes	Augmentation	Szygula <i>et al.</i> , 2014
	Pas de différence	Ziemann <i>et al.</i> , 2012
		Lombardi <i>et al.</i> , 2013
		Sutkowy <i>et al.</i> , 2014
Numération monocytaire	Augmentation	Lubkowska <i>et al.</i> , 2010b
	Pas de différence	Lombardi <i>et al.</i> , 2013
		Pournot <i>et al.</i> , 2011
		Wyrostek <i>et al.</i> ,

			2021
% de monocytes		Augmentation	Szygula <i>et al.</i> , 2014
		Pas de différence	Lombardi <i>et al.</i> , 2013
Numération granulocytaire	Eosinophiles	Augmentation	Lubkowska <i>et al.</i> , 2010b
		Pas de différence	Lombardi <i>et al.</i> , 2013
			Wyrostek <i>et al.</i> , 2021
	% d'éosinophiles	Pas de différence	Lombardi <i>et al.</i> , 2013
	Basophiles	Pas de différence	Lubkowska <i>et al.</i> , 2010b
			Lombardi <i>et al.</i> , 2013
			Wyrostek <i>et al.</i> , 2021
	% de basophiles	Augmentation	Ziemann <i>et al.</i> , 2012
		Pas de différence	Lombardi <i>et al.</i> , 2013
	Neutrophiles	Augmentation	Lubkowska <i>et al.</i> , 2010b
			Pournot <i>et al.</i> , 2011
		Pas de différence	Lombardi <i>et al.</i> , 2013
Wyrostek <i>et al.</i> , 2021			
% de neutrophiles	Pas de différence	Sutkowy <i>et al.</i> , 2014	
		Ziemann <i>et al.</i> , 2012	
% de granulocytes		Augmentation	Szygula <i>et al.</i> , 2014

c. Plaquettes

La numération plaquettaire ne semble pas modifiée par la CCE. Ce résultat a été obtenu parmi des sportifs de haut niveau (Ziemann *et al.*, 2012; Lombardi *et al.*, 2013) mais aussi chez des sportifs de niveau plus modeste (Klimek *et al.*, 2010; Szygula *et al.*, 2014). Le nombre de séances ne semble pas modifier cette constatation, en effet aucune différence significative n'a été relevée même après 30 sessions de CCE (Szygula *et al.*, 2014).

B. Paramètres biochimiques

a. Paramètres musculaires

La majorité des études s'accordent sur le fait que la CCE a un impact positif sur les marqueurs de dommages musculaires.

La créatinine kinase (CK) est le paramètre le plus utilisé dans les études. Sa concentration sérique augmente 2 à 12 heures après les dommages musculaires et atteint son maximum entre 24 et 72h après. Elle décroît ensuite de manière régulière (Khan, 2009). Dans l'étude de Lombardi *et al.* (2014), la concentration sérique de CK est mesurée chez 27 joueurs de rugby professionnels après un protocole d'entraînement de 2 sessions d'une heure par jour suivi d'une session de CCE de 3 minutes à -140°C. Aucune modification significative de la concentration de CK n'est observée après ce protocole. L'absence de modification est considérée par l'auteur comme un effet positif de la CCE sur les dommages musculaires puisqu'un effort physique comparable à celui effectué a induit une augmentation des CK dans une autre étude. Ces résultats ont aussi été retrouvés dans une étude de Wozniak *et al.* (2013), effectuée sur 6 rameurs professionnels dans laquelle l'activité des CK dans le groupe contrôle avait été multipliée par 2,5 après 6 jours d'entraînement alors qu'aucune différence significative n'a été observée dans le groupe soumis à la CCE. L'absence de groupe contrôle dans la première étude et l'effectif très réduit dans la deuxième conduisent à considérer ces résultats avec prudence. L'étude de Banfi *et al.* (2009b) montre aussi une diminution de la concentration sérique de CK. Cette étude a été réalisée sur des joueurs de rugby professionnel soumis à leur entraînement habituel, à savoir 3 heures d'entraînement par jour, et à de la CCE à -110°C pendant 2 minutes. Le moment de la CCE par rapport à l'entraînement n'est pas précisé. Banfi *et al.* (2009b) ont observé une diminution significative de la concentration sérique de 362,3 +/- 34,3 U/L à 318,4 +/- 28,6 U/L. Des résultats similaires ont été obtenus dans l'étude de Wozniak *et al.* (2007) sur des kayakistes professionnels. Après 6 jours d'entraînement la concentration de CK était inférieure de 34% dans le groupe soumis à la CCE après les entraînements par rapport au groupe non soumis à la CCE. Les valeurs étaient supérieures à celles obtenues avant l'entraînement dans les deux groupes. Après 10 jours d'entraînement la différence n'était plus statistiquement significative (Wozniak *et al.*, 2007). De même une diminution des CK a été observée dans l'étude de Ziemann *et al.* (2012) sur des joueurs de tennis.

D'autres études font le choix d'étudier des paramètres différents. C'est le cas dans l'étude de Krueger *et al.* (2019) où le paramètre employé pour évaluer les dommages musculaires est la concentration de myoglobine sérique. D'après ces auteurs ce choix se justifie par le délai nécessaire à l'augmentation des CK après l'effort par rapport à celui nécessaire pour l'augmentation de la myoglobine. En effet la CK est une protéine ayant un poids moléculaire relativement élevé, d'environ 84kDa. Par ailleurs elle n'est pas libérée directement dans la

circulation sanguine après destruction des sarcomères mais elle est transportée par le système lymphatique avant d'atteindre la circulation générale. Ces deux particularités entraînent un retard de l'augmentation des CK par rapport à l'exercice pouvant aller de 24 à 96 heures. La myoglobine en revanche a un poids moléculaire inférieur, d'environ 18 kDa et est libérée directement dans la circulation sanguine. Le pic de concentration de myoglobine est donc atteint de manière plus rapide après l'exercice physique, il a lieu dans les heures suivant l'effort. Dans cette étude aucune différence significative n'était obtenue entre le groupe soumis à la CCE et le groupe témoin. Le protocole de l'étude est présenté en figure 11, les résultats obtenus sont présentés en figure 12. Une différence significative était cependant observée entre la concentration de myoglobine sérique pré-effort et post-effort. Ce résultat suggère qu'une seule session n'est pas suffisante pour prévenir les dommages musculaires liés à l'effort.

Figure 11 : Représentation schématique du protocole expérimental de l'étude (d'après Krueger *et al.*, 2019)
WBC : groupe soumis à la CCE, CON : groupe témoin

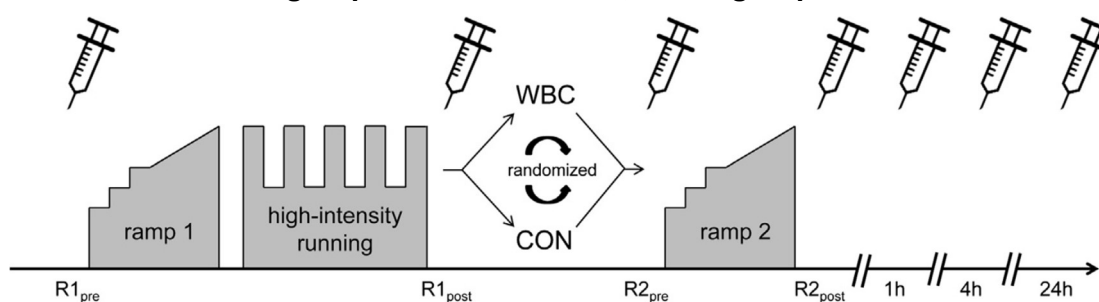
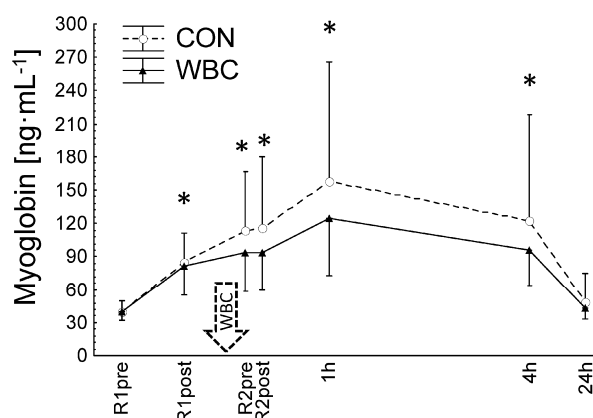


Figure 12 : Evolution de la concentration sérique de myoglobine après un effort, avec et sans CCE (d'après Krueger *et al.*, 2019)
WBC : groupe soumis à la CCE, CON : groupe témoin

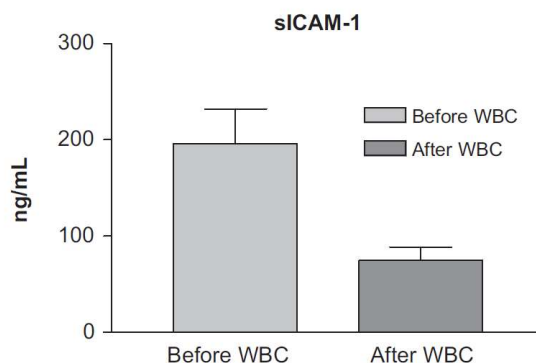


Enfin d'autres paramètres comme les lactates déshydrogénases (LDH) peuvent être suivis. L'activité sérique des LDH est un marqueur de dommages cellulaires. L'exercice physique peut être à l'origine d'une augmentation des LDH (Brancaccio *et al.*, 2010). L'étude de Banfi *et al.* (2009b) s'est intéressée à l'effet de la CCE sur l'activité sérique des LDH en post-effort. Une diminution significative a été montrée dans le groupe soumis à la CCE. L'étude de Lombardi *et al.* (2014) révèle une augmentation des LDH après l'effort et la cryostimulation cependant l'absence de groupe contrôle ne permet pas de déterminer l'effet de la CCE sur les LDH dans cette étude. L'aspartate aminotransférase (ASAT) est le dernier marqueur utilisable pour évaluer la souffrance musculaire. L'activité sérique des ASAT augmente après un effort musculaire et reste élevée

jusqu'à 24 heures après l'exercice (Brancaccio *et al.*, 2010). Dans l'étude de Lombardi *et al.* (2014), l'activité des ASAT reste inchangée après le protocole d'exercice et de CCE. Les auteurs considèrent ce résultat comme un signe que la CCE a un effet bénéfique sur les dommages musculaires car les ASAT auraient dû augmenter du fait de l'activité physique. Encore une fois l'absence de groupe contrôle ne permet pas d'évaluer réellement le bénéfice de la CCE.

Plusieurs hypothèses sont émises concernant le mécanisme expliquant un effet bénéfique de la CCE sur la souffrance musculaire. Ces hypothèses sont en lien avec la réaction inflammatoire liée à l'exercice. Au cours d'un effort physique suffisamment intense, les membranes des sarcomères peuvent être endommagées. Cette rupture des membranes des sarcomères entraîne une mobilisation des leucocytes vers les tissus endommagés. Des cytokines pro-inflammatoires et des dérivés réactifs à l'oxygène sont produits dans le tissu et entraînent des dommages secondaires s'ajoutant aux dommages primaires (Clarkson et Hubal, 2002). La CCE entraîne une vasoconstriction périphérique ce qui pourrait limiter l'afflux de leucocytes vers les tissus musculaires endommagés et donc prévenir des dommages secondaires (J.B. Ferreira-Junior *et al.*, 2014). Une autre hypothèse est l'effet de la CCE sur la protéine sICAM-1. ICAM-1 est une protéine de la membrane cellulaire participant à l'adhésion et la migration des leucocytes à travers l'endothélium. Elle peut aussi circuler sous forme soluble dans le sérum, elle est alors dénommée sICAM-1 (Dugué, 2015). L'hypothèse de Joao B. Ferreira-Junior *et al.* (2014) est que la CCE diminue le niveau de sICAM-1 dans le sang et par conséquent limite la diapédèse leucocytaire et donc les dommages cellulaires ultérieurs. Cette hypothèse s'appuie notamment sur l'étude de Banfi *et al.* (2009b) qui a montré une diminution significative de la concentration sérique de sICAM-1 après le protocole d'étude comprenant plusieurs jours d'exercice physique et une exposition quotidienne à la CCE. Les résultats sont exposés en figure 13. L'exercice physique est habituellement lié à une augmentation de la concentration de sICAM-1 (Dugué, 2015). Ces résultats sont à nuancer car il n'y a pas de groupe témoin dans l'étude de Banfi *et al.* (2009b). D'autre part l'étude de Krueger *et al.* (2019) n'a montré aucune modification de la concentration sérique de sICAM-1 après le protocole exposé en figure 11. Une seule session n'est donc pas suffisante pour obtenir un effet sur la concentration de sICAM-1. Ce modèle n'apporte cependant pas entière satisfaction et une proposition d'amélioration a été rédigée par Dugué (2015). En effet le mécanisme permettant de passage de ICAM-1 à une forme soluble est mal connu et les relations entre les variations de sICAM-1 et de ICAM-1 ne sont pas encore définies. Dugué (2015) émet l'hypothèse qu'une augmentation de sICAM-1 pourrait entraîner une diminution de la diapédèse si on considère que l'augmentation de sICAM-1 correspond à un relargage de ICAM-1. L'augmentation de sICAM-1 serait donc associée à une diminution de ICAM-1 à la surface des cellules et donc une diapédèse limitée.

Figure 13 : Evolution de la concentration sérique de sICAM-1 après un protocole d'entraînement et de CCE quotidienne (d'après Banfi *et al.*, 2009b)
WBC : CCE



b. Paramètres rénaux

L'évaluation de l'effet de la CCE sur les paramètres rénaux est nécessaire compte-tenu du contexte d'utilisation de la CCE. En effet une application majeure est la récupération post-effort. Or un exercice physique trop intense peut être à l'origine d'une myoglobinurie délétère pour les reins notamment chez des athlètes potentiellement déshydratés.

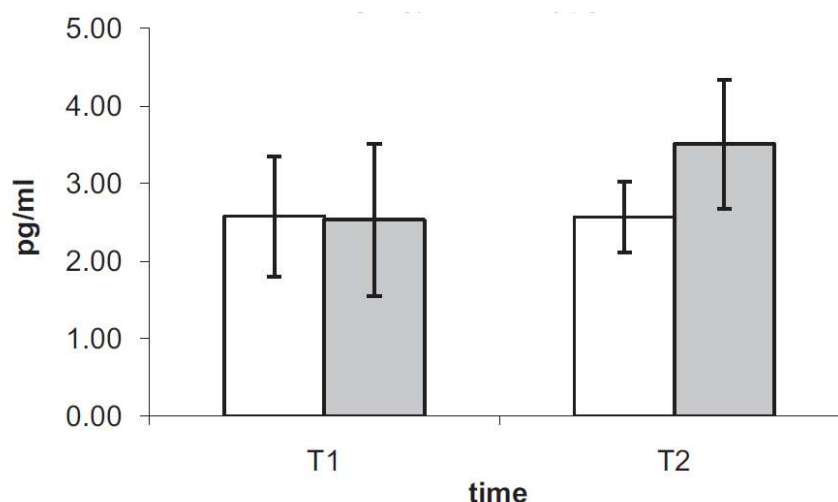
Seule une étude s'intéresse à l'effet de la CCE sur les paramètres rénaux. Il s'agit d'une étude effectuée sur des joueurs de rugby en entraînement soumis à deux sessions de CCE par jour pendant 7 jours. Les paramètres rénaux mesurés sont la créatinine et la cystatine C. Le débit de filtration glomérulaire a été calculé à partir de deux équations prenant en compte ces mesures ainsi que des facteurs de corrections liés aux caractéristiques des individus. Cette étude montre une augmentation très légère mais significative de la cystatine C tandis que la créatinine sérique n'est pas modifiée après le protocole d'entraînement et de CCE. L'effet du protocole sur le débit de filtration glomérulaire est différent entre les deux équations, une des équations ne montre aucune différence tandis que l'autre montre une diminution légère d'environ 4%. Par ailleurs aucune corrélation n'a été trouvée entre le débit de filtration glomérulaire et les marqueurs de dommages musculaires. Il semblerait donc que la CCE affecte peu les paramètres rénaux. Ces résultats sont à interpréter avec prudence car l'absence de groupe contrôle ne permet pas de différencier l'effet de l'entraînement de celui de la CCE. Par ailleurs les équations utilisées pour déterminer le débit de filtration glomérulaire sont d'après les auteurs eux-mêmes mal adaptés à l'évaluation de la fonction rénale chez les athlètes (Lombardi *et al.*, 2014).

c. Marqueurs de lyse osseuse

Le métabolisme osseux peut être étudié grâce au système RANK/RANKL/OPG. RANK est un récepteur exprimé par les ostéoclastes, dont l'activation entraîne une résorption osseuse. RANKL, son ligand est produit par les ostéoblastes et les lymphocytes. L'ostéoprotégérine (OPG) est un récepteur pouvant fixer RANKL et ainsi empêcher l'activation de RANK par son ligand (Banfi *et al.*, 2010). L'étude de Galliera *et al.* (2013) s'est intéressée à l'effet de la CCE sur le système RANK/RANKL/OPG. Cette étude a été conduite sur 10 joueurs de rugby professionnel soumis à leur entraînement habituel et à une session de CCE quotidienne à -110°C pendant 2 minutes. Un deuxième groupe était soumis aux mêmes conditions d'entraînement sans exposition au froid. Les résultats montrent que la concentration de RANK et RANKL dans la circulation périphérique n'est

pas modifiée par le protocole d'entraînement et de CCE. Les valeurs observées après le protocole sont similaires à celles mesurées avant et à celles du groupe témoin. Cependant une augmentation significative de la concentration d'OPG est trouvée après le protocole d'entraînement avec CCE par rapport aux valeurs du groupe contrôle et aux valeurs antérieures. On observe donc une augmentation du ratio OPG/RANKL par la CCE. Les résultats sont présentés en figure 14. L'augmentation de ce ratio oriente le métabolisme osseux vers l'ostéogénèse. La CCE pourrait donc être intéressante en récupération osseuse après l'effort et en prévention des fractures de stress (Galliera *et al.*, 2013).

Figure 14 : Ratio OPG/RANKL avant (T1) et après (T2) un protocole d'entraînement et de CCE (barres grises) ou un protocole d'entraînement seul (barres blanches) (d'après Galliera *et al.*, 2013)



d. Marqueurs cardiaques

Seule une étude s'est intéressée à l'effet de la CCE sur les marqueurs cardiaques. Il s'agit d'une étude de Banfi *et al.* (2009c), réalisée sur 10 joueurs de rugby professionnels, dans laquelle les participants étaient soumis à leur entraînement habituel et à une session de CCE par jour pendant 5 jours. Trois paramètres étaient mesurés, la troponine I, la protéine C-réactive ultrasensible (CRP_{us}) et le peptide natriurétique type B (NT-proBNP). Le NT-proBNP est un peptide produit par les myocytes en cas de souffrance du myocarde (Hall, 2004). La troponine I est un marqueur permettant le diagnostic des nécroses myocardiques aiguës (Edouard et Cosson, 2003). La CRP ultrasensible est la mesure de concentration très basse de CRP. La CRP_{us} est un indicateur du risque de développement de maladies cardiovasculaires (Moutachakir *et al.*, 2017). Les résultats de l'étude de Banfi *et al.* (2009c) n'ont montré aucune modification de la concentration de troponine I et de CRP_{us} après le protocole. Une légère augmentation du NT-proBNP a été identifiée avec une moyenne passant de 19,7 pg/mL avant le protocole à 31,3 pg/mL après. Cette augmentation reste cependant inférieure au niveau observé chez ces mêmes athlètes en période d'entraînement intense. La CCE ne semble donc pas délétère pour la fonction cardiaque. Ces résultats doivent être interprétés avec prudence étant donné l'absence de groupe contrôle, l'effectif réduit de l'étude et l'absence d'autre étude sur le sujet.

e. Profil lipidique

La CCE a une influence sur le profil lipidique. Dans une étude réalisée sur 69 personnes ayant reçu 5, 10 ou 20 sessions de CCE, Lubkowska *et al.* (2010a) ont montré une diminution des triglycérides dans les groupes ayant eu 10 et 20 sessions. La diminution était plus marquée après 20 sessions qu'après 10 sessions et n'était pas observable après 5 sessions. Par ailleurs, à partir de 20 sessions, une diminution de la concentration de LDL et du cholestérol total et une augmentation des HDL pouvaient être observées. Ces résultats sont confirmés par ceux de Ziemann *et al.* (2014), qui a obtenu une diminution du cholestérol total et des LDL de respectivement 43 et 52% après 20 sessions de CCE sur 18 hommes en bonne santé. Les résultats de l'étude de Lubkowska *et al.* (2010a) suggèrent une relation dose/effet. Il faut cependant prendre en compte la possibilité qu'un délai, lié à un temps d'adaptation, soit nécessaire avant d'obtenir des effets visibles.

C. Paramètres hormonaux

Le niveau de cortisol salivaire a été mesuré, chez 27 joueurs de rugby professionnels avant CCE, après 2 et 14 séances de CCE à raison de deux sessions par jour. Les concentrations des hormones stéroïdes dans la salive sont fiables et corrélées avec les concentrations plasmatiques. Une diminution du taux de cortisol salivaire est observée dès la deuxième séance et après 14 séances. La majorité des variations observées chez les sujets de l'étude excédait la différence critique (Grasso *et al.*, 2014). La différence critique est la valeur minimale à partir de laquelle on peut considérer qu'une variation d'un même paramètre est liée à un facteur externe (Lombardi *et al.*, 2017). Cependant l'absence de groupe témoin dans l'étude de Grasso *et al.* (2014) ne permet pas de distinguer les effets de la CCE et ceux de l'exercice physique lié à l'entraînement des sportifs pendant la période de mesure. Il s'agit d'une limite majeure à l'interprétation de cette étude. Cette tendance à la diminution du cortisol est cependant retrouvée dans d'autres études. Leppäluoto *et al.* (2008) ont mesuré le taux de cortisol sanguin chez 10 femmes ayant eu trois séances de CCE par semaine pendant 12 semaines. Une diminution du cortisol sanguin est observée à partir de la quatrième semaine soit à partir de la 10^{ème} séance. Une diminution de la concentration d'ACTH est aussi remarquée. Il n'y a pas de groupe témoin dans cette étude. Dans l'étude de Wozniak *et al.* (2013), 6 rameurs professionnels en entraînement avaient des séances de CCE deux fois par jour avant chaque entraînement pendant 6 jours. Une augmentation du taux de cortisol sanguin est observée dans le groupe test et dans le groupe témoin. Cependant l'augmentation constatée dans le groupe soumis à la CCE est moins intense que celle du groupe témoin. En effet le taux de cortisol augmente de 25% après les 3 premiers jours d'entraînement en l'absence de CCE tandis que celui des sportifs recevant des séances de CCE augmente de 13% au 6^{ème} jour. La CCE semble donc retarder la réponse de l'organisme au stress. Deux études obtiennent des résultats différents. Une étude a montré une augmentation du taux de cortisol sanguin après 10 sessions de CCE chez des joueurs de tennis en entraînement. Ces résultats sont cependant peu interprétables car les taux de cortisol du groupe témoin n'étaient pas comparables à ceux du groupe test avant le début du protocole (Ziemann *et al.*, 2012). L'étude de Sutkowy *et al.* (2014) sur des kayakistes n'a montré aucune modification significative du taux de cortisol après 20 séances de CCE.

Concernant la testostérone, la tendance semble être inverse à celle du cortisol. Dans l'étude de Grasso *et al.* (2014), le taux de testostérone est augmenté après une semaine. Le

même résultat est constaté après 10 sessions de CCE chez des joueurs de tennis (Ziemann *et al.*, 2012).

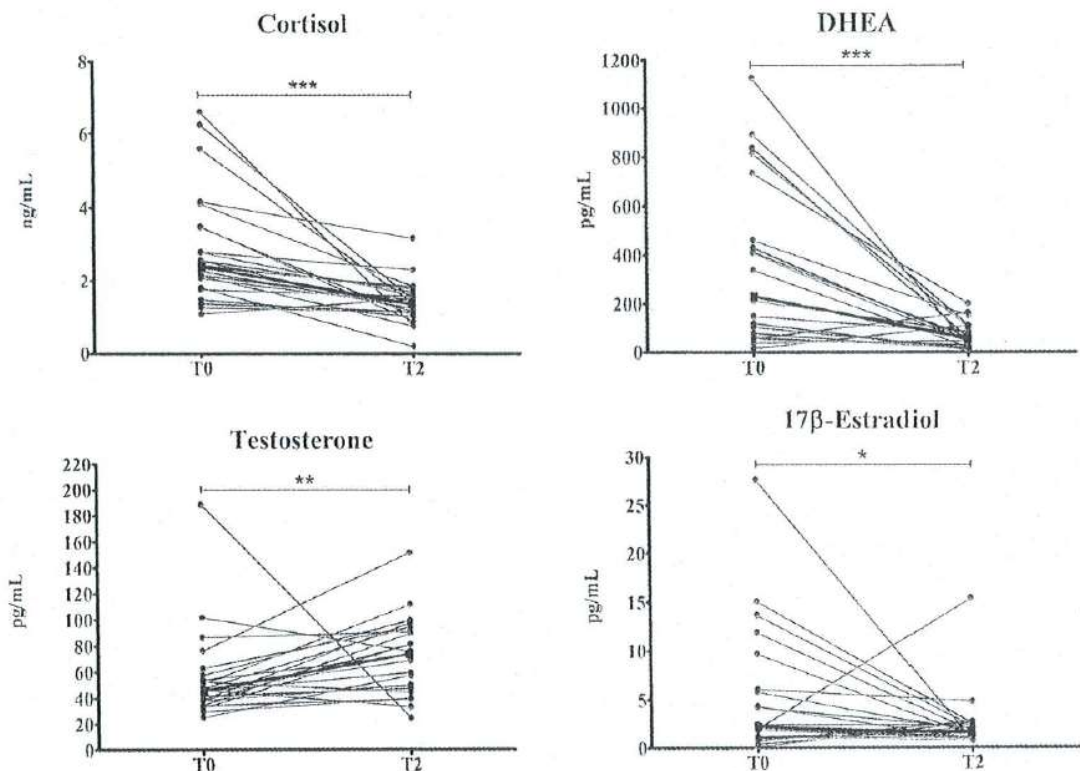
Un ratio testostérone/cortisol élevé pourrait être associé à une meilleure récupération et à des meilleures performances. Dans l'étude de Grasso *et al.* (2014), une augmentation du ratio testostérone/cortisol est observée après 14 sessions de CCE.

Le taux de 17 β -oestradiol diminue après 14 sessions tandis que celui de déhydro-épiandrostérone (DHEA) diminue après 2 sessions chez des rugbymen en entraînement (Grasso *et al.*, 2014).

Pour ces trois dernières hormones comme pour le cortisol, il n'est pas possible de différencier l'effet de l'exercice physique de celui de la CCE dans l'étude de Grasso *et al.* (2014) à cause de l'absence de groupe témoin.

Bien que les différences observées soient significatives, l'étude de Grasso *et al.* (2014) a aussi mis en évidence une grande variabilité individuelle dans la réponse hormonale à la CCE. Cette variabilité est d'autant plus visible dans le cas du cortisol et de la DHEA. Les tendances sont en revanche cohérentes dans le groupe, une tendance inverse au groupe est mise en évidence pour 3 individus sur 25 pour le cortisol et 4 sur 25 pour la DHEA. Concernant la testostérone et l'oestradiol, les tendances sont moins homogènes. Les résultats de cette étude sont présentés en figure 15. Chaque ligne représente un athlète.

Figure 15 : Effets individuels de 2 sessions de CCE par jours pendant 7 jours sur les taux de cortisol, testostérone, DHEA et 17 B-estradiol (d'après Grasso *et al.*, 2014)
T0=avant le début des sessions de CCE et d'entraînement, T2=le matin après la dernière session de CCE (7 jours après T0)



D. Marqueurs de l'inflammation

La CCE est principalement utilisée pour des vertus anti-inflammatoires. Certaines études montrent en effet une réduction des facteurs pro-inflammatoires et une augmentation des facteurs anti-inflammatoires.

Les principales cytokines anti-inflammatoires sur lesquelles l'effet de la CCE a été étudié sont l'interleukine-10 (IL-10), le récepteur antagoniste de l'interleukine-1 (IL-1Ra). Le rôle de l'interleukine-6 est plus complexe. En effet, l'IL-6 a longtemps été considérée comme une cytokine pro-inflammatoire. Bien qu'elle ait des propriétés pro-inflammatoires, son action majoritaire est une action anti-inflammatoire. Elle participe notamment à la régulation de sécrétion de cytokine inflammatoire comme l'IL-1 et TNF α (Opal et DePalo, 2000). Dans l'étude de Lubkowska *et al.* (2011), une augmentation de la concentration d'IL-6 et d'IL-10 est observée dès la 5^{ème} séance de CCE, chez 45 hommes en bonne santé. Cette augmentation est transitoire. En effet, deux semaines après la dernière séance de CCE, le niveau d'IL-6 et d'IL-10 est revenu à sa valeur initiale dans les groupes ayant reçu 5, 10 et 20 sessions de CCE. Une augmentation du niveau d'IL-6 est aussi observée après 10 sessions de CCE chez 15 hommes en bonne santé (Lubkowska *et al.*, 2010b), chez 10 hommes, 30 minutes après une session unique de CCE (Szpotowicz-Czech *et al.*, 2018) et chez des tennismen soumis à 10 sessions de CCE (Ziemann *et al.*, 2012). Dans cette dernière étude l'augmentation du niveau d'IL-6 était de 23% alors qu'une diminution de 7,7% était remarquée dans le groupe témoin. Dans une étude réalisée sur 10 athlètes, exposés à 1 séance de CCE par jour pendant 5 jours, Banfi *et al.* (2009b) ont obtenu des résultats similaires. Une augmentation de la concentration d'IL-10 était observée après le protocole. Une augmentation de la concentration d'IL-1Ra a été observée dans l'étude de Pournot *et al.* (2011) réalisée sur 11 coureurs amateurs après une session de CCE après un effort modéré.

D'autres études ont cependant des résultats plus mitigés sur l'effet de la CCE sur les cytokines pro-inflammatoires. L'étude de Pournot *et al.* (2011), présentée précédemment n'a montré aucune différence significative pour l'IL-10 et l'IL-6. C'est aussi le cas dans l'étude de Selfe *et al.* (2014), sur 14 joueurs de rugby soumis à 3 séances de CCE séparées d'une semaine. Dans l'étude de Mila-Kierzenkowska *et al.* (2013), une diminution de la concentration d'IL-6 a été constatée. Cette étude a été conduite sur 18 joueurs de volley professionnels précédemment au repos pendant 2 semaines. Plusieurs hypothèses peuvent permettre d'expliquer cette différence. Tout d'abord l'étude de Mila-Kierzenkowska *et al.* (2013) a été réalisée sur des sportifs professionnels en sortie de saison. La première partie de l'expérience consistait à réaliser un exercice physique suivi de la CCE. Cette partie du protocole a été réalisée 2 semaines après la fin de la saison de compétition. L'exercice physique témoin, qui a donné les valeurs de référence sans CCE, a été réalisé 2 semaines plus tard soit 1 mois après la fin de la saison de compétition. Pendant ce mois de repos il a été demandé aux athlètes de ne faire aucune activité physique. Il n'est donc pas possible de différencier les effets potentiels de la CCE et les effets d'une réadaptation de l'organisme à un effort physique limité chez des athlètes de haut niveau. Par ailleurs dans les études de Pournot *et al.* (2011) et Selfe *et al.* (2014), le nombre de séances était limité à 1 et 3 sessions. Il est possible que les effets sur les cytokines anti-inflammatoires nécessitent plus de sessions avant de se mettre en place. Enfin l'hypothèse de Pournot *et al.* (2011) pour expliquer cette variation est la différence d'intensité de l'exercice physique entre son étude et celle de Lubkowska *et al.* (2011). En effet, dans l'étude de Pournot *et al.* (2011) l'activité

physique se limitait à 48 minutes de courses à pied tandis que dans celle de Lubkowska *et al.* (2011), les athlètes sont soumis à 3 heures d'entraînement quotidien.

Concernant les cytokines pro-inflammatoires, celles sur lesquelles l'effet de la CCE a été étudié sont l'interleukine-1, 2, 3, 8 et 12 (IL-1, IL-2, IL-3, IL-8 et IL-12) et le facteur de nécrose tumorale (TNF α). Trois études obtiennent une diminution de la concentration d'IL-1. Dans l'étude de Mila-Kierzenkowska *et al.* (2013), une diminution de 50% est observée après l'exercice suivi de CCE par rapport à l'exercice témoin. Cependant les mêmes objections que celles sur l'IL-6 peuvent être soulevées. Dans l'étude de Lubkowska *et al.* (2011), la diminution était observable dès la 5^{ème} séance. Le niveau d'IL-1 était revenu à la normal deux semaines après la dernière séance pour les groupes ayant reçu 5 et 10 séances. Pour le groupe ayant reçu 20 séances, la concentration d'IL-1 était toujours basse 2 semaines après. L'effet de la CCE semble donc plus durable lorsque le nombre de séances augmente. Enfin une seule exposition après un exercice physique modéré a permis de diminuer l'augmentation d'IL-1 par rapport au groupe contrôle. (Pournot *et al.*, 2011). Une diminution de l'IL-2 et de l'IL-8 est observée dans l'étude de Banfi *et al.* (2009b) sur 10 athlètes après 5 séances. Pour le TNF α , deux études obtiennent des résultats différents. Dans l'étude de Ziemann *et al.* (2012), le TNF α diminue de 60% dans le groupe test tandis qu'il ne diminue que de 35% dans le groupe témoin. Dans l'étude de Lubkowska *et al.* (2011), aucune différence significative n'est observée pour le TNF α mais aussi pour l'IL-12 et l'IL-1 β .

Par ailleurs, l'effet de la CCE sur l'inflammation semble varier selon l'état de forme du patient. Chez 14 sujets obèses, séparés en deux groupes en fonction de leur capacité aérobie, la diminution de TNF α observée suite à la CCE était plus importante dans le groupe ayant une faible capacité aérobie (Ziemann *et al.*, 2013).

E. Equilibre oxydo-réducteur

Le stress oxydatif participe à l'inflammation par les dégâts qu'il peut entraîner sur les membranes cellulaires. L'évaluation de l'équilibre acido-basique passe par la mesure du statut oxydant ou anti-oxydant total, la mesure de marqueurs de stress oxydatif ou l'évaluation de l'activité des certaines enzymes comme la super oxyde dismutase (SOD), la catalase (CAT), le glutathion peroxydase (GPx), le glutathion transférase et reductase (respectivement T-GSH et GSSG-R).

Après 10 sessions de CCE, une diminution du statut anti-oxydant total (TAS) et une légère augmentation du statut oxydant total (TOS) était observée chez 15 jeunes hommes (Lubkowska *et al.*, 2010b). Dans l'étude de Sutkowy *et al.* (2014), une diminution de l'activité de la GPx de 15,1% est observée chez le groupe ayant reçu 10 séances de CCE en plus de l'exercice physique. Cette diminution est une manifestation d'une perturbation de l'équilibre oxydo-réducteur. L'isoprostane (Iso-P) est considéré comme un biomarqueur du stress oxydatif. Il a été mesuré dans l'étude de Lubkowska *et al.* (2012) réalisée sur 30 hommes. La première séance de CCE a entraîné une augmentation de la concentration en Iso-P. Cette augmentation s'est maintenue sur quelques jours puis une diminution a été constatée à la 20^{ème} séance. Il est possible que l'effet de la CCE sur le statut oxydatif soit dépendant du nombre de séances (Lubkowska *et al.*, 2012). Dans une autre étude, cette équipe s'est intéressée à l'effet d'une seule session sur le statut oxydatif. Les résultats sont en faveur de l'hypothèse qu'une session unique de CCE entraîne un stress oxydatif léger chez des patients en bonne santé. En effet après cette séance de CCE, l'activité de plusieurs enzymes anti-oxydantes était modifiée. L'activité de la catalase (CAT) et de la glutathion

transferase (T-GSH) était diminuée immédiatement après la CCE et celle de super oxide dismutase (SOD) était diminuée 24 heures après la CCE. Les activités de la glutathion peroxydase (GPx) et de la glutathion reductase (R-GSSG) étaient augmentées après la CCE mais diminuaient par la suite (Lubkowska *et al.*, 2009).

D'autres études obtiennent des résultats en faveur d'une amélioration de l'équilibre oxydo-réducteur. C'est le cas de l'étude de Stanek *et al.* (2019), dans laquelle 16 individus en bonne santé étaient exposés à 10 séances de CCE en plus de séances de kinésithérapie. Une augmentation du TAS et une diminution du TOS et de l'index de stress oxydatif étaient constatées. De même dans l'étude de Miller *et al.* (2010), 3 cycles de 10 séances de CCE chacun ont entraîné une augmentation du TAS chez des patients atteints de sclérose en plaques.

F. Métabolisme

a. Métabolisme énergétique

La CCE constitue un stimulus de froid intense qui pourrait être à l'origine d'une thermogénèse et donc de modification du métabolisme.

L'étude de Ziemann *et al.* (2012) a été réalisée sur 12 joueurs de tennis professionnels soumis à un entraînement d'intensité modéré et à deux sessions de CCE par jour pendant 5 jours. Les résultats ne montrent aucune modification du métabolisme basal après CCE. Par ailleurs les pourcentages de lipides, de glucides, de protéines consommés pour répondre aux besoins ne sont pas modifiés par la CCE. Les résultats de cette étude sont présentés dans le tableau 6. Ces résultats semblent se confirmer sur un plus long terme. L'étude de Lubkowska *et al.* (2015) ne montre aucune évolution du poids ou de l'indice de masse corporel après 6 mois d'efforts physiques légers et de CCE.

Tableau 6 : Métabolisme basal et pourcentage des substrats avant et après CCE (d'après Ziemann *et al.*, 2012)

Variables	Groupe			
	CCE		Témoin	
	Avant étude	Après étude	Avant étude	Après étude
Métabolisme basal (kcal)	1920 +/- 171	1916 +/- 183	2017 +/- 79	2010 +/- 95
Glucides %	57,5 +/- 7,2	57,3 +/- 3,2	62,6 +/- 6,2	61,8 +/- 2,8
Lipides %	29,6 +/- 6,4	30,6 +/- 5,3	25,1 +/- 9,4	26,5 +/- 4,3
Protéines %	12,8 v 2,3	14,8 +/- 2,2	12,1 +/- 4,0	11,6 +/- 2,2
Glucides g/kg	3,5 +/- 0,4	3,4 +/- 0,2	3,9 +/- 0,4	3,8 +/- 0,3
Lipides g/kg	0,8 +/- 0,1	0,8 +/- 0,1	0,7 +/- 0,2	0,7 +/- 0,1
Protéines g/kg	0,8 +/- 0,1	0,9 +/- 0,1	0,7 +/- 0,1	0,7 +/- 0,1

Les adipocytokines sont des molécules produites par le tissu adipeux. Elles interviennent dans la régulation de nombreuses fonctions. La leptine intervient dans la régulation de l'appétit et de la satiété, la prise alimentaire, l'activité locomotrice et la dépense énergétique. (Fasshauer et Blüher, 2015). Les concentrations de leptine et de son récepteur restent inchangées après 10 sessions de CCE chez des sujets obèses, répartis en deux groupes selon leur capacité aérobie (Ziemann *et al.*, 2013). La concentration de leptine n'est pas non plus modifiée par un programme d'exercice physique associé à de la CCE sur 6 mois (Lubkowska *et al.*, 2015). La résistine est liée à l'obésité, au diabète insulino-résistant et à l'inflammation. L'évolution de la concentration de résistine après 10 sessions de CCE chez des patients obèses varie selon la capacité aérobie. En effet chez les sujets ayant une forte capacité aérobie, la concentration de résistine augmente de 9,4% tandis qu'elle diminue de 6,8% chez ceux ayant une capacité aérobie moindre (Ziemann *et al.*, 2013). La même tendance a été observée pour la concentration de visfatine, une adipocytokine pro-inflammatoire. L'augmentation observée dans le groupe à haute capacité aérobie était de 23,4% tandis que la diminution était de 7,4% dans le groupe à faible capacité aérobie (Ziemann *et al.*, 2013). Les explications et les implications de cette différence ne sont cependant pas encore connues.

L'irisine est une myokine, c'est-à-dire une cytokine produite par le muscle, libérée pendant l'exercice physique qui active la thermogénèse. Elle pourrait apporter un bénéfice dans le traitement de l'obésité et de certains diabètes (Dulian *et al.*, 2015). L'étude de Dulian *et al.* (2015) s'est intéressée à l'effet de la CCE sur la concentration d'irisine. Douze sujets obèses étaient répartis en deux groupes selon leur capacité aérobie et soumis à 10 sessions de cryothérapie sur 10 jours. Les résultats montrent une légère diminution de l'irisine chez les sujets à haute capacité respiratoire tandis qu'une augmentation est observée dans le deuxième groupe. Une corrélation positive est remarquée entre l'augmentation de la concentration d'irisine après la CCE et le pourcentage de masse grasse. Cette corrélation pourrait s'expliquer par une production d'irisine dans le tissu adipeux plutôt que par les muscles lors d'une réponse au froid.

b. Capacités aérobie et anaérobie

La CCE ne semble pas modifier la capacité aérobie. En effet deux études obtiennent des résultats similaires. La première a été réalisée sur 15 hommes et 15 femmes sportifs amateurs, exposés à 10 sessions de CCE à -130°C pendant 3 minutes. Cette étude n'a montré aucune différence dans la capacité aérobie des participants, évaluée via le volume maximal d'oxygène consommé (VO_{2max}) (Klimek *et al.*, 2010). La deuxième étude obtient des résultats similaires chez 25 hommes en bonne santé, ayant effectué 15 sessions de CCE à -130°C pendant 3 minutes (Lubkowska *et al.*, 2010a).

Seule l'étude de Klimek *et al.* (2010) s'est intéressée à l'effet de la CCE sur la capacité anaérobie. Une augmentation de la capacité anaérobie a été observée après 10 sessions de CCE chez les hommes. Cette augmentation de la capacité anaérobie se traduit par une augmentation de la puissance maximale anaérobie, de la puissance moyenne et de l'énergie produite. Cette tendance n'a pas été retrouvée chez les femmes.

4. Effets de la cryothérapie corps entier sur le système nerveux

A. Effets de la cryothérapie corps entier sur le système nerveux autonome

Les modifications du rythme cardiaque détaillées en partie 2.A (p24) sont le résultat d'une modification de l'équilibre entre les systèmes nerveux sympathique et parasympathique. L'activité du système nerveux autonome peut être évaluée via la mesure d'indices de variabilité de la fréquence cardiaque. Les hautes et basses fréquences (respectivement HF et LF) sont le reflet de l'activité parasympathique et sympathique. La moyenne quadratique des intervalles R-R successifs (RMSSD) permet d'évaluer la variabilité des hautes fréquences. Son augmentation signe une activité parasympathique. Ces mesures permettent une évaluation de l'activité parasympathique principalement car certains auteurs les considèrent comme peu fiable pour mesurer l'activité sympathique. L'activité sympathique peut s'évaluer via la mesure de la concentration de noradrénaline et d'adrénaline plasmatique (Hauswirth *et al.*, 2013).

Deux études ont montré une augmentation des indices de variabilité de la fréquence cardiaque. Dans l'étude de Westerlund *et al.* (2006), à la suite d'une unique session de CCE, une augmentation de l'intervalle R-R (RRI) et de la RMSSD a été observée chez 10 femmes modérément actives. Ces résultats montrent une augmentation de l'activité parasympathique suite à la séance de CCE. Cette réponse est similaire à la réponse provoquée par un exercice physique. Dans l'étude de Hauswirth *et al.* (2013), les volontaires étaient 40 hommes en bonne santé. Deux groupes de 15 hommes réalisaient soit une séance de CCE à -110°C, soit une séance de CCP à -160°C pendant 3 minutes. Un groupe témoin de 10 hommes n'était pas exposé. Les résultats de cette étude montrent une augmentation de la RMSSD et des HF après les séances de CCE et plus modérément aussi après une séance de CCP. Ces résultats témoignent d'une activation parasympathique suite au stress thermique que représentent la CCE et la CCP. L'activation parasympathique est plus importante dans le cas de la CCE, probablement liée au refroidissement de la tête qui entraîne une stimulation du réflexe trijémino-cardiaque.

Le système nerveux sympathique est lui aussi stimulé, dans une moindre mesure, par la CCE. En effet, l'étude de Hauswirth *et al.* (2013) montre une augmentation de la concentration de noradrénaline dans le groupe soumis à la CCE et à la CCP. Le même résultat a été mis en évidence dans l'étude de Leppäluoto *et al.* (2008) réalisée sur 20 femmes entre 35 et 45 ans, soumises à trois sessions de CCE par semaine pendant 12 semaines. La concentration de noradrénaline était multipliée par 2 à 3 immédiatement après l'exposition au froid. Les réponses ont été similaires pendant les 12 semaines. Les concentrations d'adrénaline n'étaient pas modifiées. Cette augmentation de concentration témoigne d'une activation sympathique qui n'est pas visible au niveau cardiaque car atténuée par une réponse parasympathique plus forte.

La CCE a donc un effet activateur sur le système nerveux parasympathique et dans une moindre mesure sympathique : l'effet parasympathique dominant au niveau cardiaque.

B. Cryothérapie corps entier et analgésie

L'analgésie est un des effets les plus recherchés par les personnes ayant recours à la CCE. Certaines études ont cherché à démontrer l'existence d'une analgésie liée à la CCE. L'utilisation d'une échelle de notation de la douleur est la méthode la plus courante et la plus facile à mettre en œuvre. Plusieurs études montrent une réduction de la douleur perçue après la CCE (Bleakley *et*

al., 2014). García-Espinoza *et al.* (2017) ont cherché à évaluer la douleur de façon plus objective, en mesurant une pression nécessaire pour faire apparaître une douleur chez des patients atteints du syndrome de douleur myofasciale. La mesure était réalisée immédiatement après les séances de CCE. Vingt sessions étaient réalisées à raison de 4 sessions par semaine. Les résultats ont montré une augmentation de la pression nécessaire pour engendrer une douleur de 1,4 +/- 0,35 kg/cm²/s à 2,49 +/- 0,34 kg/cm²/s après les 20 séances de CCP à -160°C pendant 3 minutes. Par ailleurs une différence entre les niveaux initiaux de douleur est visible à partir de la 6^{ème} session ce qui suggère un effet cumulé et perceptible à plus long terme après plusieurs expositions au froid.

Le mécanisme à l'origine de l'analgésie liée au froid n'est pas encore défini. Il existe cependant plusieurs hypothèses. La première est une augmentation du temps de conduction nerveuse lié au refroidissement. Ce ralentissement n'a pas été démontré dans le cas de la CCE cependant l'étude de Herrera *et al.* (2010) montre une diminution de l'amplitude des potentiels d'action et de la vitesse de conduction nerveuse après d'autres modalités de cryothérapie telles que l'immersion dans l'eau froide et l'application de glace. Il est raisonnable de penser que l'effet de la CCE est comparable puisqu'elle entraîne aussi une diminution de la température de la peau et des muscles (Herrera *et al.*, 2010). L'analgésie complète est obtenue lorsque la température cutanée atteint 13,6°C (Meeusen et Lievens, 1986).

Une autre hypothèse est que l'analgésie est liée à la libération de noradrénaline. En effet, comme expliqué dans la partie précédente, la CCE entraîne une augmentation de la concentration de noradrénaline plasmatique (Leppäluoto *et al.*, 2008; Hausswirth *et al.*, 2013). Or l'administration en épidurale de noradrénaline chez des animaux d'expérimentation et l'administration spinale d'un agoniste adrénergique chez l'homme permet une analgésie (Leppäluoto *et al.*, 2008). La libération de noradrénaline après les séances de CCE pourrait donc participer à atténuer les douleurs.

La cryothérapie pourrait aussi agir comme un contre-irritant activant un rétrocontrôle et bloquant la transmission de l'information douloureuse au cerveau (Herrera *et al.*, 2010). Enfin l'action anti-inflammatoire de la CCE participe à plus long terme à limiter la douleur.

C. Effets de la cryothérapie corps entier sur la proprioception

La proprioception est définie comme « la perception de la position des articulations et de leur mouvement ». Elle peut aussi se définir pour le système locomoteur comme les « informations afférentes remontant des zones périphériques du corps (notamment des muscles, tendons et capsules articulaires) qui contribuent au contrôle postural, à la stabilité des articulations et aux sensations » (Furmanek *et al.*, 2014). Le refroidissement, en ralentissant l'arrivée des informations afférentes, pourrait avoir des effets délétères sur la proprioception. La CCE étant parfois utilisée avant l'effort chez les athlètes, cette diminution de la proprioception pourrait être à l'origine de blessures parfois graves, pouvant mettre la carrière de l'athlète en jeu. Seule une étude s'est intéressée à l'effet de la CCE sur la proprioception. Dans cette étude, la proprioception est évaluée via la capacité à sentir la position de l'articulation du genou. Les patients ont les yeux bandés et les oreilles bouchées afin de limiter les informations disponibles. Alors qu'ils sont assis, un opérateur place la jambe de façon à donner un angle de flexion du genou entre 10 et 90°. Le patient maintient cette position pendant 5 secondes avant de la quitter puis doit reproduire l'angle donné avec la jambe controlatérale. Les écarts entre les angles donnés et reproduits sont mesurés. Cette opération est réalisée après une séance de CCE de 3 minutes à -110°C. Les résultats ne montrent pas de différence entre le groupe de 18 personnes soumis à la CCE et le

groupe témoin. La perception des positions de l'articulation du genou ne semble donc pas altérée par une séance de CCE. Son utilisation serait donc relativement sûre pour les athlètes avant un effort. Ces résultats nécessitent cependant confirmation. D'autres études ont été réalisées afin d'évaluer l'effet d'autres formes de cryothérapie sur la sensibilité de la position des articulations. Certaines montrent une légère altération de la proprioception avec l'immersion dans l'eau froide (4°C) sans pour autant pouvoir affirmer que cette différence a une influence clinique. La plupart des études cependant n'indique pas une augmentation du risque de blessure après l'utilisation de cryothérapie (Furmanek *et al.*, 2014).

Pour conclure sur cette synthèse des données bibliographiques, les effets de la CCE ne sont pas tous démontrés avec un bon niveau de fiabilité, cependant les résultats de ces travaux semblent converger vers les données suivantes. La CCE est une exposition au froid intense qui entraîne une diminution de la température cutanée d'environ 10 à plus de 20°C, cette baisse étant variable selon les zones du corps. Un retour à la température initiale est observé 30 minutes après la séance. La température centrale n'est pas modifiée ou légèrement abaissée mais reste dans les valeurs physiologiques. Une réponse cardio-vasculaire est aussi initiée. Une bradycardie est observée après des séances de CCE. Elle est moins prononcée ou absente après les séances de CCP et est liée au refroidissement de la tête. Par ailleurs une activation du système nerveux sympathique et parasympathique est constatée avec une activation parasympathique dominante. La CCE semble également avoir des effets analgésiques dont la cause n'est pas encore déterminée avec précision. Concernant les paramètres sanguins, la majorité des études constatent une diminution des paramètres de dommages musculaires tels que les CK. L'hypothèse avancée serait une diminution des dommages musculaires secondaires lié à l'inflammation. En effet, la CCE semble entraîner une diminution de la concentration de cytokines pro-inflammatoires telles que l'IL-1, 2, 8 et TNF α et une augmentation des cytokines anti-inflammatoires comme l'IL-10, IL-1Ra et IL-6. La CCE entraîne par ailleurs une augmentation de la capacité anaérobie.

Troisième partie : Utilisation de la cryothérapie corps entier chez l'homme

1. Utilisations thérapeutiques

A. Maladies rhumatismales inflammatoires

a. Polyarthrite rhumatoïde

La polyarthrite rhumatoïde (PR) est une maladie auto-immune inflammatoire à l'origine d'une destruction des articulations paires et d'effets systémiques. Cette maladie entraîne des douleurs chroniques et un handicap physique pouvant rendre les tâches quotidiennes douloureuses. Les conséquences systémiques sont sérieuses et le taux de mortalité dans la population touchée par cette maladie est deux fois supérieur à celui de la population générale. Le mécanisme d'apparition de cette maladie n'est pas totalement élucidé mais l'action de certaines cytokines, notamment TNF α et IL-6, a été démontrée (Choy, 2012). Plusieurs paramètres peuvent permettre d'évaluer l'effet d'une thérapie sur cette maladie notamment le score DAS 28 qui inclut notamment le nombre d'articulations touchées, la douleur ressentie par le patient et la vitesse de sédimentation des érythrocytes (Gizińska *et al.*, 2015). Il est aussi possible d'utiliser des scores mesurant le handicap entraîné par la maladie pour les tâches quotidiennes (score HAQ), des échelles de douleurs et des tests de marche (Gizińska *et al.*, 2015).

L'étude de Gizińska *et al.* (2015) a montré une réduction significative du DAS 28, de la fatigue, du temps mis pour réaliser le test de marche et du score HAQ après la réalisation de 10 séances de CCE à -110°C pendant 3 minutes associées à des thérapies médicamenteuses et de la kinésithérapie. Cette étude a été réalisée sur 44 femmes atteintes de PR réparties en deux groupes, un groupe soumis à la CCE et un groupe soumis à des méthodes de réhabilitations recommandées habituellement tel que le laser, les ultrasons etc. Il n'y avait pas de différence significative entre les deux groupes hormis sur deux paramètres : la durée des raideurs matinales et le score HAQ pour lesquels le groupe CCE obtenait des meilleurs résultats. Par ailleurs une réduction significative de la concentration d'IL-6 et de TNF α était visible dans les deux groupes (Gizińska *et al.*, 2015). L'étude d'Hirvonen *et al.* (2006) a comparé différentes méthodes de cryothérapies locales (CCE à -60°C et CCE à -110°C). Une réduction du DAS 28 et du score de douleur était observée dans les deux groupes. La diminution de la douleur était plus importante dans le groupe CCE à -110°C. Des résultats similaires ont été obtenus dans l'étude de Jastrzabek *et al.* (2013) comparant la cryothérapie locale à l'azote liquide à -160°C et la CCE à -30°C pendant 3 minutes. Le score DAS 28, le score HAQ et la fatigue ressentie étaient améliorés dans les deux groupes. Une diminution de la concentration de TNF α a été constatée tandis que la concentration d'IL-6 n'était pas modifiée. L'étude de Sadura-Sieklucka *et al.* (2019) a comparé les marqueurs de l'inflammation systémique dans deux groupes. Le premier groupe recevait, en plus des thérapies habituelles, 20 sessions de CCE, de 2 à 3 minutes chacune à la température de -120°C à -140°C. Le deuxième groupe était un groupe témoin, ne recevant que les thérapies habituelles, aussi utilisées dans le groupe 1. Les concentrations des cytokines TNF α et IL-6 ne changeaient pas

dans aucun des deux groupes. Cependant la concentration de CRP a diminué dans le groupe 1 alors qu'elle est restée inchangée dans le groupe témoin.

Ces résultats sont cependant à nuancer. Les groupes témoins présents dans la plupart des études sont de petites tailles. Des études supplémentaires, évaluant la CCE sans autre traitement, sont nécessaires pour confirmer les effets de la CCE seule sur la PR. De plus un effet placebo ne peut pas être exclu puisque l'étude n'est pas réalisable en aveugle. Les patients sont conscients de recevoir de la CCE ou non (Guillot *et al.*, 2014). Par ailleurs une étude a montré des résultats contradictoires avec ceux observés dans les travaux précédemment cités. L'étude de Straub *et al.* (2009) compare la cryothérapie locale, la CCE à -60°C et la CCE à -110°C chez des patients recevant des glucocorticoïdes et d'autres n'en recevant pas. Les trois modalités de cryothérapie sont appliquées 20 fois à raison de trois applications par jour pendant 6 jours et de deux applications le dernier jour. La concentration d'IL-6 restait élevée chez les patients du groupe CCE à -110°C ne recevant pas de glucocorticoïde alors qu'elle diminuait chez les patients du groupe CCE à -60°C et du groupe soumis à une cryothérapie locale. Les patients du groupe CCE à -110°C recevant des glucocorticoïdes présentaient une diminution de la concentration d'IL-6 (Straub *et al.*, 2009). Ces résultats montrent qu'il est important de déterminer les paramètres de temps, température et nombre de session de CCE optimal pour que la CCE ne devienne pas pro-inflammatoire.

b. Spondylarthrite ankylosante

La spondylarthrite ankylosante (SA) est une maladie inflammatoire chronique touchant en particulier le squelette axial et les articulations sacro-iliaques. La progression de cette maladie peut entraîner une complète fusion des vertèbres. La SA peut aussi avoir d'autres manifestations tel que des arthrites des articulations périphériques, des uvéites, une inflammation chronique des intestins et diverses complications cardiaques. Le mécanisme d'apparition de la SA n'est pas connu (Chee et Sturrock, 2007). Le score BASDAI estime l'activité de la maladie. Une valeur de score BASDAI au-dessus de 4 signifie une phase active de la maladie. C'est un score assez sensible et pouvant varier rapidement (Stanek *et al.*, 2015). Le score BASFI est un autre indicateur. Il permet d'évaluer le niveau de handicap fonctionnel chez les patients atteints de SA (Stanek *et al.*, 2015). Le traitement de la SA est multimodal et comprend notamment de la kinésithérapie.

Plusieurs études ont montré un apport de l'association CCE avec la kinésithérapie par rapport à la kinésithérapie seule. Dans l'étude de Straburzyńska-Lupa *et al.* (2018), une réduction du score BASDAI plus importante était observée dans le groupe recevant des séances de CCE à -110°C en plus des séances de kinésithérapie. Les patients étaient divisés en trois groupes : sans cryothérapie, avec CCE à -60°C, avec CCE à -110°C. Une réduction du BASDAI était observée dans les trois groupes mais elle était plus importante dans le groupe exposé à -110°C. Des résultats similaires ont été identifiés dans d'autres études (Stanek *et al.*, 2005, 2015, 2018a; Romanowski et Straburzyńska-Lupa, 2020). Par ailleurs dans l'étude de Stanek *et al.* (2015), comportant 32 hommes atteints de SA, une réduction du score BASDAI en dessous de 4 a été trouvée dans le groupe traité avec 10 séances de CCE en plus de la kinésithérapie. Le score BASDAI du groupe sans CCE est resté au-dessus de 4 après le protocole. Les scores étaient comparables et supérieurs à 4 dans les deux groupes avant CCE. Cette réduction montre qu'une association de la CCE avec la kinésithérapie peut permettre de refaire passer la maladie dans une phase non active, ce que ne peut pas faire la kinésithérapie seule (Stanek *et al.*, 2015). Cette

réduction du score BASFI a aussi été trouvée dans plusieurs études (Stanek *et al.*, 2005, 2015, 2018).

Le mécanisme à l'origine de cette amélioration n'est pas connu précisément. Une hypothèse, émise dans l'étude de Stanek *et al.* (2018b), serait que le bénéfice est lié à une diminution du stress oxydatif. Cette hypothèse est soutenue par une diminution du TOS, de l'activité de GPx et CAT (Stanek *et al.*, 2018b).

B. Fibromyalgie

La fibromyalgie est une maladie chronique caractérisée par une douleur musculosquelettique diffuse associée à des symptômes de fatigue, de troubles du sommeil, de dépression et d'autres troubles cognitifs et somatiques. L'origine de la douleur est une perturbation de la régulation de la douleur entraînant une amplification centrale de la perception de la douleur et donc une hyperalgie et une allodynie. La participation de cytokines pro-inflammatoires est suspectée dans l'induction et le maintien de la douleur. La gestion de cette maladie constitue un défi thérapeutique et les conséquences sur la vie quotidienne pour les patients sont importantes (Bettoni *et al.*, 2013; Bair et Krebs, 2020).

Deux études se sont intéressées à la CCE comme traitement de la fibromyalgie. La première étude concerne 100 volontaires (94 femmes et 6 hommes), séparés en deux groupes, un groupe CCE et un groupe témoin. Le groupe CCE recevait 15 sessions en trois semaines, à la température de -140°C pendant 3 minutes. L'étude s'intéressait à l'évolution du score de douleur, du statut de santé global évalué par le patient et à un score de fatigue. Une diminution des trois scores était observée dans le groupe CCE. La différence avec le groupe témoin était significative. Le score de douleur diminuait de 58% dans le groupe CCE contre 22% dans le groupe témoin. (Bettoni *et al.*, 2013). Une deuxième étude, qui concernait 24 hommes et femmes, a obtenu des résultats similaires. Une amélioration de l'état mental et physique était observée dans le groupe CCE tandis qu'aucune différence n'était rapportée dans le groupe témoin (Vitenet *et al.*, 2018). Deux explications à cette amélioration sont possibles : le ralentissement de la conduction nerveuse avec la diminution de la température et/ou un effet positif de la CCE sur les cytokines pro-inflammatoires (Bettoni *et al.*, 2013).

C. Sclérose en plaques

La sclérose en plaques est une maladie auto-immune entraînant une démyélinisation du système nerveux central à l'origine d'un ralentissement voire d'un blocage de la conduction nerveuse dans les zones concernées. Les manifestations cliniques sont diverses et comprennent notamment une paralysie, une ataxie, une spasticité, de l'incontinence et de la fatigue. Ce dernier symptôme est présent chez 70 à 80% des patients et intervient à tous les stades de la maladie.

Une amélioration du statut fonctionnel et de la fatigue a été observée chez des patients atteints de sclérose en plaques après 10 séances de CCE de 3 minutes entre -110°C et -160°C. Dans cette étude les participants étaient séparés en deux groupes en fonction de leur résultat initial au score de fatigue. Le statut fonctionnel était déterminé via l'évaluation motrice de Rivermead (RMA) qui utilise trois paramètres : la motricité globale, la motricité des jambes et du tronc et celle des bras. Un score de handicap a aussi été calculé. Les résultats montrent une amélioration de tous les scores calculés, plus importante dans le groupe ayant un score de fatigue élevé initialement. (Miller *et al.*, 2016). Des résultats similaires ont été rapportés dans l'étude de

Pawik *et al.* (2019) qui s'intéressait à l'introduction de la CCE en plus d'une réhabilitation physique. Le groupe associant la CCE à l'exercice physique obtenait des meilleurs résultats tant sur le plan fonctionnel que sur le plan psychologique (Pawik *et al.* (2019). Par ailleurs, le stress oxydatif semble jouer un rôle majeur dans la pathogénie de la sclérose en plaques. Dix expositions de 3 minutes à une température comprise entre -110°C et -160°C ont permis une augmentation du statut anti-oxydant total. Cette amélioration était plus importante chez les patients atteints de sclérose en plaques et dépressifs par rapport à ceux n'étant pas dépressif (Miller *et al.*, 2016). La CCE pourrait donc être une aide à la gestion de la sclérose en plaque notamment en participant à une amélioration du statut psychologique et de la fatigue ressentie par les patients. L'effet de la CCE sur ces symptômes semble donc en lien avec le niveau de fatigue ressentie initialement.

D. Douleurs lombaires

La douleur lombaire est un symptôme fréquent, touchant 70% de la population après l'âge de 30 ans. La CCE a été proposée comme traitement des douleurs lombaires pour son effet analgésique supposé. Dans l'étude de Barłowska-Trybulec *et al.* (2022), une réduction du score de douleur a été constatée chez 30 patients après une exposition de 3 minutes à -130°C . Dans l'étude de Nugraha *et al.* (2015), deux groupes ont été comparés. Le premier groupe était exposé à -67°C tandis que le second groupe était exposé à -5°C . L'objectif de ce second groupe était de pouvoir évaluer un éventuel effet placebo en plaçant les patients dans un environnement froid mais n'atteignant pas des températures extrêmes. Les résultats montrent une réduction du score de douleur identique dans les deux groupes. D'autres études sont donc nécessaires pour définir de l'intérêt ou non de l'usage de la CCE dans le traitement des douleurs lombaires.

E. Troubles mentaux

L'idée d'une utilisation de la CCE dans le traitement des troubles mentaux est relativement récente. Les études concernent en particulier la dépression et l'anxiété. Dans une étude sur 30 adultes diagnostiqués comme étant en épisode dépressif, une amélioration des symptômes dépressifs et de la qualité de vie a été remarquée après 10 sessions de 2 minutes entre -110°C et -130°C (Rymaszewska *et al.*, 2019). Dans une seconde étude réalisée sur 23 patients exposés à 10 séances de CCE de 160 secondes à -150°C , Rymaszewska *et al.* (2003) ont montré une amélioration de plusieurs symptômes de la dépression et de l'anxiété. La qualité du sommeil était notamment très modifiée avec une réduction de 91% des difficultés à s'endormir, une amélioration de 98% de la qualité du sommeil et une disparition des réveils précoces. Dans cette même étude l'anxiété et les troubles moteurs d'hyperactivité étaient réduits de 90%. Il semblerait donc que la CCE ait un impact très positif sur la qualité du sommeil. Comme précédemment, un possible effet placebo ne peut être exclu, les patients ayant parfaitement conscience des séances de CCE.

2. Utilisations en médecine du sport

L'effet de la CCE sur les paramètres musculaires et l'inflammation obtenus dans certaines études explique l'intérêt des sportifs pour l'utilisation de cette technique dans le cadre de la préparation à la compétition ou dans celui de la récupération.

A. Impact de la cryothérapie corps entier sur la récupération

La récupération est le processus de retour à un état de stabilité biologique et psychologique à la suite d'une perturbation physique ou mentale. Un effort physique intense est un stress entraînant des conséquences physiques et mentales sur les athlètes. L'équilibre entre l'entraînement, les compétitions et la récupération est essentiel chez les athlètes. Une récupération insuffisante peut conduire à des baisses de performances et parfois à des blessures. Lors d'une saison de compétition, au cours de laquelle les échéances s'enchaînent sur un court laps de temps, les sportifs peuvent chercher à accélérer la récupération. C'est un processus qui fait intervenir plusieurs appareils notamment les appareils musculosquelettique et cardiaque. L'aspect psychologique est aussi déterminant (Kellmann *et al.*, 2018).

Un effort intense peut être à l'origine de dommages musculaires, d'autant plus importants lors de contractions excentriques. Cette altération des muscles est liée à une destruction cellulaire. Des dommages secondaires, liés à la réaction inflammatoire, peuvent ensuite s'ajouter à l'atteinte primaire. Ces dégâts sont à l'origine d'une réduction de la force du muscle concerné, d'une douleur et d'une contracture pouvant durer jusqu'à 5 à 7 jours. La CCE a été proposée comme solution pour accélérer la récupération musculaire et limiter l'atteinte musculaire notamment secondaire en réduisant la réaction inflammatoire associée (Rose *et al.*, 2017). Plusieurs études ont effectivement montré une amélioration de la récupération suite à des séances de CCE. Les variables étudiées pour évaluer la récupération musculaire sont différentes selon les études. Dans l'étude de Fonda et Sarabon (2013) réalisée sur 11 sportifs amateurs, 6 séances de CCE ont permis une amélioration plus rapide de la hauteur de saut vertical, de la puissance de démarrage du saut vertical et du moment maximal de la force de contraction des fléchisseurs du genou. Le protocole d'effort employé dans cette étude était un protocole d'exercice pliométrique, incluant donc des contractions excentriques. Le protocole a été étudié pour entraîner des dommages musculaires. La première séance de CCE avait lieu dans l'heure suivant l'exercice. La différence était significative 24h et 48h après l'effort mais ne l'était plus après 72h. Cette évolution montre une récupération plus rapide chez les sujets exposés à la CCE après l'effort par rapport aux sujets n'ayant aucune mesure de récupération. Des résultats similaires ont été observés dans l'étude de Qu *et al.* (2020) et Hausswirth *et al.* (2011) dont l'épreuve physique était une épreuve de course de 90 et 48 minutes respectivement. Des sauts verticaux étaient ajoutés à l'épreuve dans l'étude de Qu *et al.* (2020) afin d'ajouter des mouvements entraînant des contractions excentriques favorisant les dommages musculaires. Dans l'étude de J. B. Ferreira-Junior *et al.* (2014), seul le moment de la force de contraction excentrique était amélioré après CCE tandis que celui de la force de contraction concentrique n'était pas impacté par la CCE 40 minutes après l'effort. Le protocole d'effort physique était constitué de 6 séries de 10 répétitions de contractions concentriques puis de contractions excentriques des extenseurs du genou. La séance de CCE avait lieu immédiatement après l'effort et les mesures avaient lieu 40 minutes après le premier test. Une théorie avancée par les auteurs pour expliquer la différence constatée serait en lien avec la température musculaire au moment de la prise de mesure. La réduction de la température musculaire entraîne une diminution de la force de contraction. Les effets bénéfiques de la CCE auraient donc pu être masqués par le refroidissement. Les mesures sont effectuées très précocement par rapport aux autres études. Dans l'étude de Ziemann *et al.* (2012), réalisée sur des tennismen professionnels, le paramètre employé pour évaluer la récupération était l'efficacité du coup lors d'un test de tennis standardisé. Une amélioration de l'efficacité du coup était observée chez les joueurs ayant reçu de la CCE. Une meilleure récupération musculaire pourrait en être partiellement responsable. L'index de saturation

tissulaire est utilisé dans l'étude de Krueger *et al.* (2019). Une meilleure oxygénation du vaste latéral était constatée dans le groupe exposé à la CCE dans les 45 minutes après l'effort. Une diminution de la douleur dans les jours suivant l'application de la CCE après l'effort a été observée dans toutes les études qui ont mesuré ce paramètre (Hauswirth *et al.*, 2011; Fonda et Sarabon, 2013; Wilson *et al.*, 2018; Qu *et al.*, 2020). Ces résultats restent cependant à nuancer. D'une part la plupart de ces études sont des essais croisés. Le groupe témoin est donc constitué des mêmes individus que ceux du groupe test, l'épreuve est donc répétée ce qui peut modifier les résultats (Rose *et al.*, 2017). D'autres auteurs obtiennent des résultats différents. Wilson *et al.* (2018) constate une dégradation de la force de contraction musculaire, du moment de la force de contraction et de la performance pliométrique qui est le reflet de la capacité musculaire à passer d'une contraction concentrique à une contraction excentrique. Cette baisse de performance est légère, elle est observable 24h après l'effort et l'application de la CCE. L'épreuve physique est un marathon. Le protocole de CCE, 3 minutes à -85°C, est appliqué dans les 15 minutes suivant la fin de l'effort. Dans l'étude de J. T. Costello *et al.* (2012), aucun effet de la CCE n'a été observé sur la contraction volontaire maximale et sur la puissance développée par les extenseurs du genou. L'effort imposé était 100 contractions excentriques à charge maximale pour l'individu. Dans une étude de synthèse, Costello *et al.* (2015) ont estimé que le niveau de preuve d'efficacité de la CCE sur la récupération musculaire est insuffisant. Les raisons sont liées aux limites des études qui ont montré une amélioration de la récupération : un fort risque de biais, des tailles d'échantillons limitées et une hétérogénéité dans les groupes.

Un effort intense constitue un stress important pour l'organisme, à l'origine d'une activation du système nerveux sympathique et d'une diminution de l'activité parasympathique dépendante de l'intensité de l'effort. Une augmentation de la fréquence cardiaque et une diminution des indices de variabilité cardiaque liée à l'activité parasympathique sont observées. Les indices de variabilité cardiaque peuvent être modifiés au repos après un effort très intense ou lors de périodes d'entraînement chargées. Cette perturbation est associée à une augmentation de la fatigue, une diminution de la qualité du sommeil et une dégradation des performances (Schaal *et al.*, 2013). L'étude de Schaal *et al.* (2013) a montré une augmentation 2 à 4 fois supérieure des indices de variabilité cardiaque associés aux fonctions vagales dans le groupe soumis à la CCE par rapport au groupe témoin ou à d'autres modalités de récupération. La CCE pourrait donc être un atout lors de période d'entraînement intense pour rétablir le tonus vagal après l'effort et limiter les effets néfastes sur la performance de la perturbation de ce tonus.

Le tableau 7 récapitule les résultats des études s'intéressant aux effets de la CCE sur la récupération.

Tableau 7 : Effets de la CCE sur la récupération

Effet sur la récupération	Paramètres mesurés	Type d'effort physique	Protocole de CCE/CCP	Sujets	Groupe témoin	Etude
Amélioration	Efficacité du coup, fréquence cardiaque après l'effort	Tennis 2x6min d'effort séparé par 6 min de repos Intensité au	CCE 3 min, -120°C Moment par rapport à l'effort inconnu	12 joueurs de tennis professionnels	Oui	Ziemann <i>et al.</i> , 2012

		seuil anaérobie	2x par jour pendant 5 jours			
Amélioration	Douleur au repos et à l'effort, moment maximal et moyen de la force, puissance de démarrage du saut vertical	Exercices pliométriques induisant des dommages musculaires	CCP 3 min, -140 à -195°C 1x/J pendant 6J Première exposition 1h après l'exercice	11 hommes sportifs amateurs (sport d'endurance et d'agilité)	Essai croisé	Fonda et Sarabon, 2013
Amélioration	Indices de variabilité de la fréquence cardiaque	Chorégraphie de compétition (intensité maximale), 2x3 min (dont 64% du temps en apnée) séparé par 70min	CCE 3min, -110°C, 1 fois moins de 70min après l'effort	11 nageuses professionnelles (natation synchronisée)	Essai croisé	Schaal et al., 2013
Amélioration	Douleur musculaire, hauteur de saut vertical	90 minutes de courses à VO ₂ max + 20 séries de 40 sauts verticaux (Protocole ayant pour objectif d'induire des dommages musculaires)	CCP 3min, entre -110°C et -140°C, 4 sessions (1 par jour pendant 4j, la première dans l'heure suivant l'exercice)	20 coureurs amateurs (moyenne et longue distance)	Essai croisé	Qu et al., 2020
Amélioration	Moment maximal de la force de contraction excentrique, et concentrique, travail total	6x10 contractions concentriques + 6x10 contractions excentriques des extenseurs du genou	CCP 3min, -110°C, une session immédiatement après effort	12 hommes sportifs amateurs	Etude croisée	J. B. Ferreira-Junior et al., 2014
Amélioration	Contraction maximale volontaire, douleur, CK	Simulation de trail sur tapis de course, 48min (avec montée et descente)	CCE 3 min, -110°C, 3 sessions (avant 1h, 24h et 48h post-exercice)	9 coureurs amateurs	Etude croisée	Hausswirth et al., 2011
Amélioration	Lactate sanguin, index de saturation	Course de haute intensité, 5x5 min à 90%	CCE 3min, -110°C,	11 coureurs d'endurance	Oui	Krueger et al., 2019

	tissulaire du vaste latéral, récupération subjective, fréquence cardiaque,	de la vitesse maximale séparée par 4min de récupération active à 60%.	réalisée 45min après l'effort			
Dégradation sauf pour la douleur à 48h	Contraction isométrique volontaire maximum, moment maximal de l'extenseur du genou, performance pliométrique, douleur	42km de course	CCE 3min, -85°C, 1 session dans les 15 min après le marathon	31 coureurs d'endurance, amateurs entraînés	Oui	Wilson <i>et al.</i> , 2018
Sans effet	Contraction isométrique volontaire maximale, puissance maximale utile des extenseurs du genou, douleur musculaire	100 contractions excentriques à charge maximale	CCE 3 min, -110°C	36 participants (hommes et femmes)	Oui	J. T. Costello <i>et al.</i> , 2012

B. Utilisation de la cryothérapie corps entier pour la préparation des échéances sportives

La préparation à la compétition permet aux athlètes de concourir à leur niveau maximal tant physiquement que psychologiquement. Elle fait intervenir des techniques passives et actives. L'utilisation de la CCE a été proposée par Partridge *et al.* (2019) comme une technique possible de préparation à l'effort liée à un possible effet de potentialisation post-activation (PAP). La PAP est un phénomène physiologique entraînant un changement rapide et bref de la puissance musculaire dans les 1 à 3 heures suivant une première activité. Ce phénomène est bénéfique pour les athlètes qui cherchent une amélioration de leur performance sur un court laps de temps, pendant une compétition par exemple. La PAP est liée à une sensibilité accrue de l'actine et la myosine au calcium. Une amélioration des performances pourrait aussi être obtenue par un effet analgésique (Partridge *et al.*, 2019). Cette hypothèse a été testée sur 12 joueurs de rugby professionnels. Une unique séance de CCP, de 3min à -110°C, était réalisée, avant l'effort, au cours d'un protocole de préparation globale. Cette étude a montré une amélioration de la vitesse de saut vertical 15 minutes après l'exposition par rapport au groupe contrôle. Cette amélioration se maintenait dans les 3 heures après la séance (Partridge *et al.*, 2022). Ces résultats sont cependant en contradiction avec ceux montrant une diminution de la puissance musculaire lors d'une diminution de la température du muscle (J. B. Ferreira-Junior *et al.*, 2014). D'autres études sont nécessaires afin de déterminer si l'utilisation de la CCE avant un effort est bénéfique pour la

performance et donc si cette technique pourrait être utilisée en préparation avant une échéance et non simplement pendant la récupération. De nouveau, il est difficile d'identifier la part d'un possible effet placebo dans le rôle de la CCE sur la performance sportive.

3. Protocoles recommandés

Les protocoles employés dans les études sont très variables en termes de temps, température et de nombre d'expositions. L'absence de standardisation des protocoles et un nombre insuffisant d'études comparant les modalités rendent difficile l'établissement d'un protocole sur des bases scientifiques solides. Le tableau 8 présente les protocoles ayant obtenu des résultats positifs dans diverses indications. Ces protocoles ne sont cependant pas nécessairement les protocoles optimaux.

Tableau 8 : Protocoles de CCE et CCP dont l'utilisation a démontré un bénéfice dans l'indication concernée

Indication	Protocole
Arthrite rhumatoïde	10 à 20 séances, 3 min, -110°C à -160°C, CCE ou CCP, 1 à 2 séances par jour
Spondylarthrite ankylosante	10 séances, 3min à -120°C, 1 séance par jour
Fibromyalgie	15 séances, 3 min, -140°C, 5 sessions par semaine à 2 sessions par jour
Sclérose en plaque	10 séances, 3min, -120°C à -130°C, 1 session par jour
Douleurs lombaires	1 à 10 séances, 3min, -5 à -110°C, 5 séances par semaine
Anxiété, trouble du sommeil	15 séances, 2 à 3min, -110°C à -160°C, 5 séances par semaine
Récupération	1 à 10 séances, -110°C à -195°C dans l'heure suivant l'effort, 1 à 2 séances par jour
Préparation à l'effort	1 séance, 3min, -110°C, entre 15 et 3h avant l'effort

Seule une étude a comparé les effets de plusieurs durées d'exposition. Il s'agit de l'étude de Fonda *et al.* (2014), qui a évalué la réponse thermique suite à 4 durées d'exposition différentes : 90s, 120s, 150s, 180s. La température d'exposition était constante autour de -140°C. Les résultats montrent que la température de la peau diminue avec la durée jusqu'à 150s. Par la suite, la prolongation des sessions n'entraîne pas une diminution de la température significative par rapport à celle observée après 150s. Pour ces auteurs, il est donc raisonnable de ne pas dépasser les 150s puisque la prolongation n'a pas d'effet sur la réponse thermique mais peut être liée à un risque de complications plus important. Néanmoins la durée de l'application de cette

diminution de température peut aussi avoir un effet biologique. D'autres études seraient ainsi nécessaires pour évaluer l'effet de la durée d'exposition sur les paramètres d'intérêts et pour déterminer le temps idéal en fonction de l'indication d'utilisation. En effet, l'effet de la CCE sur certains paramètres n'est peut-être pas corrélé avec la réponse thermique au-delà d'une certaine température ou durée.

Le nombre de sessions et le rythme des sessions sont aussi très variables. Certaines études n'utilisent qu'une exposition tandis que d'autres vont jusqu'à 30 expositions avec plusieurs séances par jour. La réponse à la CCE varie selon le nombre de sessions. Il s'agit donc d'un paramètre important à prendre en compte lors de l'établissement d'un plan de CCE. Certaines études suivent les paramètres au cours des expositions successives, ce qui permet d'avoir une meilleure idée du seuil de modification. C'est par exemple le cas de l'étude de Szygula *et al.* (2014) qui a montré une diminution de la numération érythrocytaire et du taux d'hématocrite après 10 et 20 séances et qui rapportait un retour à la normale entre 20 et 30 sessions. D'autre part, la comparaison des résultats de certaines études peut indiquer un nombre suffisant de séances. Dans le cas des paramètres musculaires, aucune différence n'avait été obtenue entre le groupe test et le groupe témoin après une seule séance de CCE (Krueger *et al.*, 2019) tandis que des études ayant réalisé plusieurs expositions obtenaient une réduction des paramètres de dégradation musculaire (Ziemann *et al.*, 2012; Wozniak *et al.*, 2013; Lombardi *et al.*, 2014). Ces comparaisons ne permettent cependant pas d'apporter un niveau de preuve suffisant pour valider un nombre de séances optimal.

Dans le cadre de la récupération, le moment de l'exposition par rapport à l'effort fourni pourrait être déterminant. En effet, la CCE est souvent utilisée dans cette indication pour ses propriétés anti-inflammatoires qui pourraient permettre de limiter les dommages musculaires secondaires. La CCE serait donc d'autant plus bénéfique qu'elle interviendrait tôt après l'effort, et permettrait ainsi de limiter l'inflammation et donc les dommages musculaires secondaires. Si l'exposition est plus tardive, le risque serait que l'inflammation ait déjà entraîné des altérations musculaires. Le bénéfice de la CCE serait donc perdu et l'effet attendu sur la récupération ne serait pas présent.

Enfin il a été démontré qu'une exposition au froid identique pouvait être perçue de façon différente par les individus. Les caractéristiques physiques comme la masse grasse influent la réponse thermique (Dębiec-Bąk *et al.*, 2013). Le sexe est aussi une donnée pouvant intervenir dans la réponse à la CCE. Il pourrait donc être pertinent de prendre en compte ces paramètres afin d'établir un protocole individualisé en fonction des caractéristiques de l'individu traité. Cette personnalisation pourrait permettre une meilleure réponse à la CCE et ainsi augmenter les effets positifs de cette technique (Bouzigon *et al.*, 2016).

4. Complications et contre-indications

La CCE et la CCP sont des procédures relativement sûres. Cependant quelques complications peuvent survenir. La plupart sont des lésions cutanées liées à une mauvaise préparation comme le fait d'entrer dans le dispositif avec des vêtements humides ou une peau mal séchée. La surface de la peau est brûlée entre -3,7 et -4,8°C, les dommages cellulaires graves sont atteints à -10°C. Les températures atteintes après une séance de CCE sont en général autour de 15°C lorsque la peau est séchée correctement. Le risque de brûlure par le froid est donc négligeable si des précautions sont mises en place avant la séance (Bleakley *et al.*, 2014). Deux cas de complications graves ont

été rapportés après une exposition à la CCE. Le premier est un cas de dissection aortique chez un homme de 56 ans publié en 2016. L'homme avait des antécédents d'hypercholestérolémie et d'hypertension. Il avait reçu 15 sessions de CCP, chacune ayant duré 3 minutes entre -150 et -160°C, dans le cadre d'un traitement d'un syndrome du muscle piriforme. La première manifestation douloureuse a eu lieu 1 mois après le traitement. La dissection aortique est causée par une fissure dans l'intima de l'aorte ou la rupture d'un vaisseau irrigant la paroi de l'artère. L'un des facteurs de risque est l'hypertension artérielle non traitée. La CCE est à l'origine de modifications cardiovasculaires et pourrait donc avoir participé au développement de l'affection (Cámara-Lemarroy *et al.*, 2017). Le deuxième effet grave a été rapporté en 2017. Il s'agit d'une amnésie transitoire qui s'est déclarée chez un homme de 63 ans, 30 minutes après une séance de CCE. L'amnésie a débuté par une amnésie antérograde et rétrograde remontant à plusieurs années. Les paramètres vitaux, l'examen neurologique et les examens complémentaires entrepris se sont révélés normaux. Une récupération partielle a été observée. Une amnésie de la période allant de 30 minutes avant et finissant 3 heures après la séance de CCE s'est maintenue. L'exposition au froid est un déclencheur de l'amnésie globale transitoire, le mécanisme n'est cependant pas élucidé (Carrard *et al.*, 2017). Dans les deux cas, il n'est pas possible d'imputer ces affections à la CCE de manière certaine.

Les contre-indications communément admises sont l'hypertension non traitée, les maladies cardiovasculaires, le syndrome de Reynaud, l'intolérance au froid, une insuffisance respiratoire grave et des lésions cutanées préexistantes (Bleakley *et al.*, 2014; Lombardi *et al.*, 2017). L'observation d'une augmentation légère de la pression artérielle suite à la CCE justifie des précautions particulières voir l'abandon de la CCE chez les patients atteints de maladies cardiovasculaires (Lombardi *et al.*, 2017).

Quatrième partie : La cryothérapie corps entier chez le cheval

La cryothérapie est largement employée en médecine équine. Ces thérapies ont prouvé leur intérêt dans le traitement et la prévention de certaines affections. Aujourd'hui, après l'accroissement de l'utilisation en médecine humaine, des dispositifs de CCP commencent à être disponibles pour les chevaux. Cependant la base scientifique de cette utilisation chez le cheval est très pauvre. Seule une étude expérimentale s'est intéressée à la CCP chez le cheval. L'objet de l'étude était la réponse thermique.

1. Réponse thermique

Bogard *et al.* (2020) étudient la réponse thermique de 5 chevaux à une exposition à la CCP. Il s'agissait de 5 juments pur-sang anglais d'un centre d'entraînement âgées de 3 ans +/- 3 mois et d'un poids moyen de 448 +/- 18kg en moyenne. Elles n'avaient aucun historique d'affection musculosquelettique. L'étude a été réalisée en dehors de la saison de reproduction. Elles étaient exposées une fois, à une température de -140°C pendant 3 minutes. Le dispositif employé était un van deux places aménagé avec le dispositif contenant l'azote d'un côté et le cheval traité de l'autre. La tête des chevaux était maintenue à l'extérieur de la cabine de CCP. La température de la peau a été évaluée par imagerie thermique avant et juste après la séance.

La première constatation de l'étude est que la température de la peau varie selon la région du corps déjà avant la séance. Les températures les plus hautes étaient obtenues en regard des organes vitaux. Par ailleurs, de la même manière que chez l'humain, la diminution de la température suite à l'exposition au froid était variable. Elle était comprise entre -1,12°C pour la région du grand dorsal à -2,80°C pour la région du fessier moyen. La figure 16 présente le thermogramme obtenu avant et après la séance de CCP. Les figures 17 et 18 présentent respectivement les zones de mesures et les températures de la peau obtenues sur ces zones avant et après traitement.

L'amplitude de la réduction de température est 5 à 6 fois inférieure chez les chevaux par rapport à celle obtenue chez les humains. Cette différence s'explique par différents facteurs liés au transfert de chaleur (Bogard *et al.*, 2020). Comme l'homme, le cheval est un mammifère homéotherme. Sa température interne est de 38°C et sa zone de neutralité thermique est comprise entre 5 et 25°C pour un cheval adulte. Des variations individuelles existent. Pour maintenir une température interne constante, la production de chaleur doit être égale à la perte. La chaleur est constamment produite par l'organisme et dissipée via par convection, conduction, radiation et évaporation (Morgan, 1998). La convection est dépendante du ratio entre la masse et la surface de l'objet et de la forme de l'objet. Le corps humain peut être modélisé par un cylindre fin et vertical tandis que le corps d'un cheval peut être représenté par un cylindre large et horizontal. Par ailleurs le ratio masse/surface est d'environ 80kg pour 1,8m² soit 44,4 kg/m² pour un homme de taille moyenne alors qu'il est de 500 kg pour 5m² pour un cheval soit 100 kg/m². Il est donc plus de 2 fois supérieur chez le cheval que chez l'humain. Cela signifie que pour une production de chaleur

égale par unité de masse, la surface à travers laquelle cette énergie sera dissipée sera inférieure chez le cheval. Cette caractéristique explique une meilleure résistance au froid chez le cheval par rapport à l'homme (Bogard *et al.*, 2020). Par ailleurs la résistance thermique de la peau d'un cheval est deux fois supérieure à celle d'un homme. Elle est de $0,10 \text{ m}^2 \text{ K/W}$ pour un cheval et de $0,05 \text{ m}^2 \text{ K/W}$ pour un homme. Cette différence est due notamment à l'épaisseur de la peau qui est de $3,8 \text{ mm}$ pour les chevaux alors qu'elle est de $0,6 \text{ mm}$ pour l'homme mais aussi à des différences de structures (Morgan, 1998; Bogard *et al.*, 2020). De plus, la présence de poil chez le cheval est une limite à la déperdition d'énergie supplémentaire par rapport à l'homme. La résistance thermique du poil d'hiver chez un cheval de sport est d'environ $0.12 \text{ m}^2 \text{ K/W}$ lorsqu'il est sec. Cette valeur peut varier d'un individu à l'autre du fait de caractéristiques individuelles telles que la longueur et la densité des poils (Morgan, 1997). Ces différences sont à l'origine d'une diminution moindre de la température de la peau chez le cheval pour une même exposition au froid par rapport à l'homme (Bogard *et al.*, 2020).

Figure 16 : Thermogramme obtenu sur une jument pur-sang (3 ans, 466kg) avant (A) et immédiatement après (B) une séance de CCP (3 min, -140°C) (d'après Bogard *et al.*, 2020)

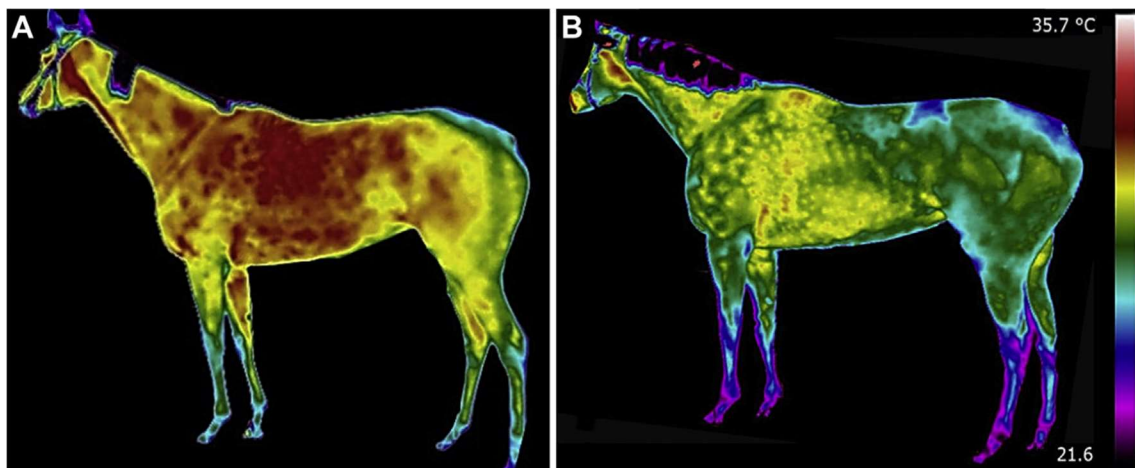


Figure 17 : Zones de mesure de la température de la peau (d'après Bogard *et al.*, 2020)

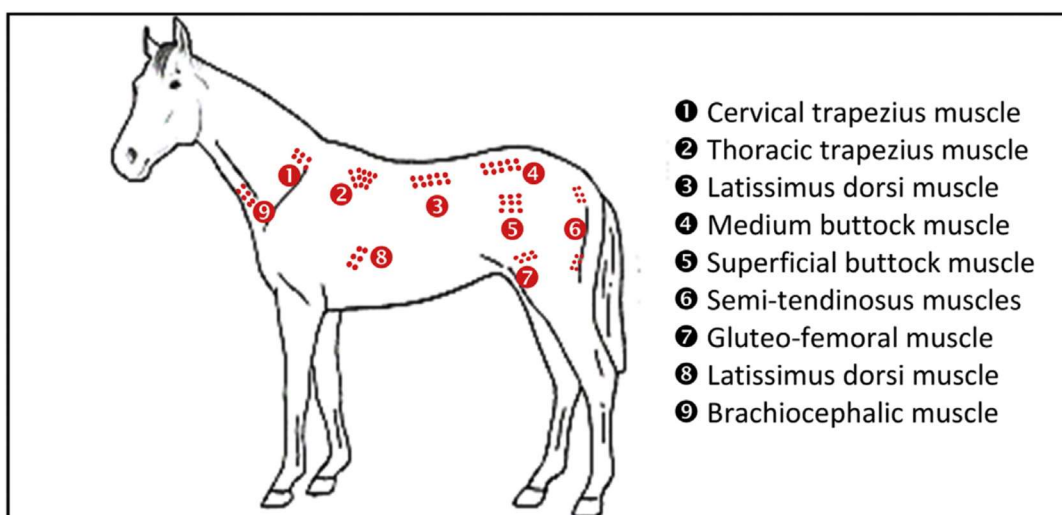
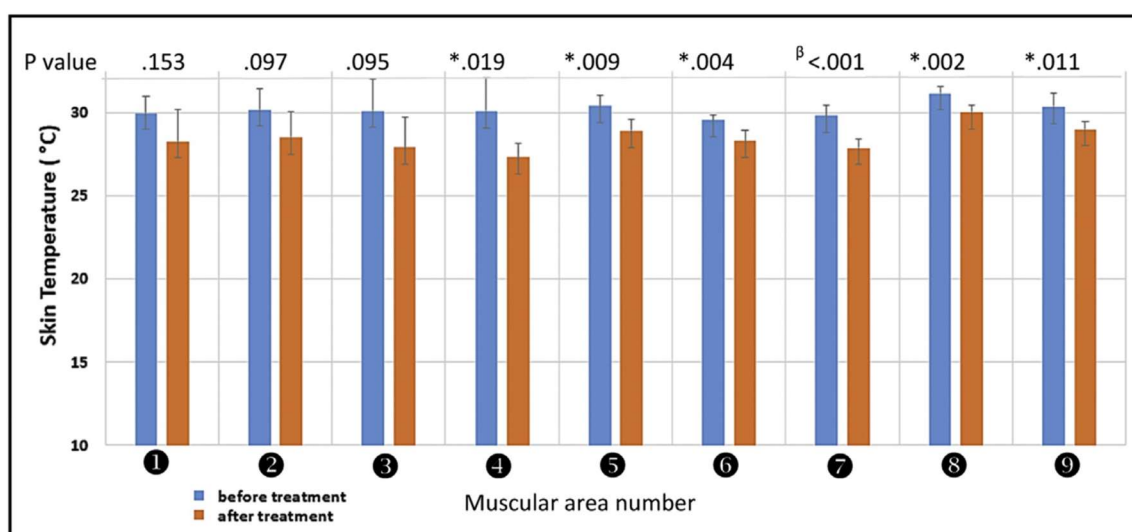


Figure 18 : Températures obtenues sur les zones présentées en figure 16 avant (en bleu) et après (en rouge) CCE (3min, -140°C) (d'après Bogard *et al.*, 2020)



2. Propositions de protocoles

Actuellement les protocoles utilisés en CCP équine sont ceux recommandés par les constructeurs. Ils ne reposent sur aucune réalité scientifique et sont souvent calqués sur ceux utilisés en médecine humaine. Par exemple, pour un modèle d'un fabricant ukrainien, le protocole consiste en 5 minutes de CCP à une température de -110°C à -160°C. Un autre constructeur anglais propose des protocoles de 2 à 3 minutes à -160°C. En Pologne, deux entreprises ont proposé un protocole de 2 à 3 minutes de -140°C à -160°C environ précédé d'une phase de refroidissement permettant d'atteindre la température de traitement (Roszkowska *et al.*, 2018).

L'étude de Bogard *et al.* (2020) a montré que ces protocoles ne permettaient pas une diminution intéressante de la température. Chez l'homme, des effets de la CCE ont été démontrés pour des protocoles de 2 à 3 minutes pour des températures autour de -110°C. Ces protocoles entraînent des diminutions de la température de la peau 5 à 6 fois plus importantes que chez le cheval. Ces températures ne sont pas atteintes en utilisant les mêmes protocoles chez les chevaux. Les effets de la CCE observés chez l'homme ne sont donc pas garantis chez le cheval. D'autres études sont nécessaires, d'une part pour déterminer les protocoles permettant une réduction de température suffisante chez le cheval et d'autre part pour confirmer que l'obtention de ces températures a un effet comparable à celui observé chez l'homme.

Deux solutions seraient possibles pour atteindre des températures suffisamment basses : augmenter le temps d'exposition ou diminuer la température d'exposition. Cette dernière solution est impossible techniquement pour le moment puisque la décompression de l'azote ne permet pas d'obtenir des températures inférieures à -160°C (Bogard *et al.*; 2020)

Le nombre de session de CCP chez les chevaux ainsi que leur moment par rapport à l'effort est un point essentiel qui n'a été discuté dans aucune étude pour le moment. C'est un point de réflexion qui nécessitera un approfondissement. La réaction des chevaux à l'organisation des séances de CCE ou CCP dans le temps n'est peut-être pas la même que chez l'homme.

3. Applications espérées

L'utilisation de la CCP ou de la CCE en médecine équine est principalement destinée aux chevaux de courses et de sport. Les applications espérées sont diverses. L'amélioration de la récupération et de la performance est souvent mise en avant par les constructeurs comme l'un des bienfaits de la CCE chez le cheval. Ces effets bénéfiques seraient liés à une réduction de l'inflammation et à un effet analgésique (REVIVE®, 2022; Space Cabin, 2022). D'autres applications sont couramment citées notamment les boiteries, les contractures musculaires, la récupération suite aux traumatismes, les œdèmes et les hématomes (Cryomanufacturing, 2022). Enfin certains fabricants mettent en avant des applications moins évoquées dans ce contexte comme la récupération après des chirurgies osseuses, le syndrome naviculaire et la gale de boue (Life BSE, 2022). La CCE n'a démontré son efficacité pour aucune des applications revendiquées par les constructeurs. La plupart sont transposées depuis les indications humaines chez lesquelles un intérêt a été démontré. D'autres sont citées par les constructeurs sans aucune preuve ni en médecine humaine ni en médecine équine.

Cinquième partie : Discussion

1. Limites

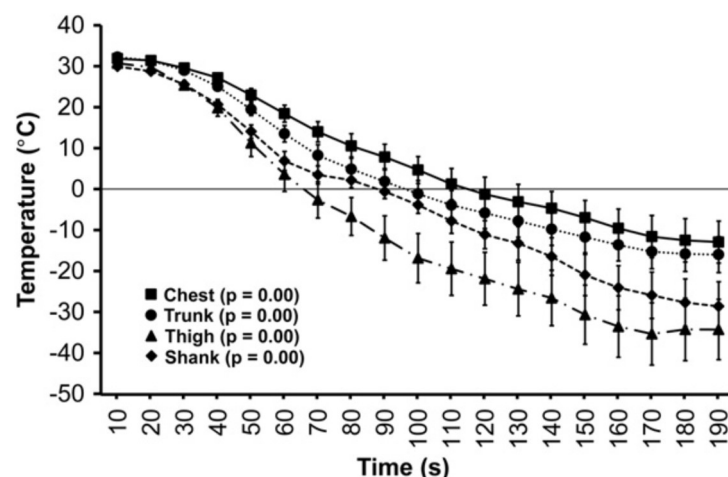
Plusieurs limites s'opposent à l'usage plus fréquent de la CCE tant chez l'homme que chez le cheval. Elles sont liées aux limites des études, aux problèmes purement techniques mais aussi au coût par rapport aux bénéfices.

Tout d'abord, les études s'intéressant à la CCE souffrent souvent de plusieurs biais pouvant remettre en question les résultats. Les effectifs sont généralement réduits et les groupes témoins ne sont pas toujours présents. Lorsqu'ils le sont, les études sont souvent organisées en étude croisée, c'est-à-dire qu'il n'existe pas de groupe témoin réel, tous les groupes sont soumis aux deux protocoles : protocole témoin et test. Selon les protocoles, ce type d'étude peut impliquer un biais lié à la répétition des protocoles par les mêmes individus. C'est par exemple le cas de l'étude de Qu *et al.* (2020) dans laquelle trois méthodes de récupération liées au froid sont testées. Les participants réalisent quatre efforts suivis d'un protocole de CCE, d'immersion dans l'eau froide, ou d'un protocole d'alternance d'immersion dans l'eau froide et l'eau chaude. Un effort est aussi suivi d'une récupération sans protocole et constitue le témoin. Les efforts sont réalisés sur quatre semaines non successives. L'ordre dans lequel les participants sont exposés au protocole de récupération ne change pas. Les modifications ne sont pas nécessairement imputables à la CCE mais peuvent être liées à la répétition des efforts. Ce biais pourrait être annulé en assignant de façon aléatoire l'ordre des protocoles suivis par les participants selon le principe des carrés latins. Ainsi une partie des participants réaliserait le protocole témoin en premier et la deuxième partie effectuerait le protocole test en premier. D'autres études choisissent de prendre en compte l'ordre d'exposition dans les analyses statistiques en plus de l'assignation aléatoire (Fonda et Sarabon, 2013). Par ailleurs les études en double aveugle sont difficiles voire impossibles à mettre en place. Les patients sont nécessairement conscients d'être soumis ou non à la CCE. L'effet placebo ne peut donc pas être exclu. Une étude a cherché à contourner ce biais en utilisant un second protocole à une température moindre n'entraînant a priori pas d'effets physiologiques. Dans cette étude la CCE n'apporte pas de bénéfice par rapport au protocole témoin (Nugraha *et al.*, 2015). Par ailleurs, la diversité des protocoles appliqués dans les études en termes de temps, température et nombre de sessions rend compliqué l'interprétation et la comparaison des résultats. Il manque actuellement des travaux pour déterminer exactement les protocoles efficaces. Cette problématique est d'autant plus vraie en médecine équine qu'aucun protocole n'a prouvé son efficacité à l'heure actuelle. Les conseils des constructeurs sont basés sur des protocoles de médecine humaine qui ont montré leur inefficacité chez les chevaux (Bogard *et al.*, 2020). Actuellement, aucune étude ne justifie de l'intérêt de l'utilisation de la CCE chez les chevaux.

Une autre limite est la différence entre la température annoncée par le constructeur et la température réelle dans l'appareil. Savic *et al.* (2013) ont étudié la température au centre d'une cryocabine pendant une session de CCP. L'exposition durait 3 minutes et la température programmée était de -140°C. Les résultats ont montré que la température atteinte à proximité de la peau du patient était bien supérieure. La température la plus basse a été enregistrée au niveau de

la taille, après 3 minutes de séance et était de -35°C . La figure 19 montre la température réelle mesurée au centre de la cabine lors de la séance de CCP. Cette même étude a montré que la température donnée par le constructeur pouvait être atteinte après 3 minutes de séance dans une cabine vide. La différence entre les températures attendues et celles constatées s'expliquent d'une part par le mode de mesure de la température et d'autre part par le transfert de chaleur du patient lui-même. En effet, la température est mesurée à proximité des buses de libérations de l'azote, elle est donc bien inférieure à la température au centre de la cabine à ce même moment. De plus le patient est une source de chaleur, la température dans la cabine pourrait être supérieure à cause des transferts de chaleur par convection. Ce phénomène pourrait être moindre dans les chambres de cryothérapie par rapport aux cabines. De plus, on remarque aussi que les températures sont différentes en fonction des zones de la cabine. Cette non-homogénéité peut s'expliquer par la différence de densité entre l'air chaud qui monte et l'air froid plus dense qui reste dans les parties basses de la cabine (Savic *et al.*; 2013). Par ailleurs, une couche d'air appelée couche limite diminue les transferts de chaleur et isole en partie le patient de l'environnement (Bouzigon *et al.*, 2017). Ces constatations ont plusieurs conséquences pour la CCE. La température réelle dans la cabine est souvent inconnue et variable selon le patient puisque les transferts convectifs sont dépendants de facteurs individuels. Le refroidissement de la peau peut être insuffisant à cause de cette différence de température. Les études utilisent des équipements différents, les températures annoncées pour un équipement ne sont peut-être pas applicables à un autre. Les études sont donc très difficilement comparables. La CCE en médecine équine est encore plus soumise à ces limites. En effet, les dispositifs actuels sont des cabines de CPP, souvent ouvertes au niveau du dos et de la tête. Compte-tenu du volume des cabines et de leur ouverture plus large que les cabines humaines, la température au centre des cabines est probablement encore plus chaude que celle constatée dans l'étude de Savic *et al.* (2013) chez les humains. L'hétérogénéité des températures est probablement aussi plus marquée. Une première étape dans l'évaluation des systèmes de CCP équine serait de documenter les températures atteintes autour des différentes régions corporelles du cheval, avant même de s'intéresser aux effets biologiques de ces dernières. Par ailleurs, nous avons vu dans la partie précédente que le flux de chaleur était plus élevé chez un cheval que chez un humain. Il est donc probable que l'augmentation de la température liée au transfert convectif soit encore plus importante en CCP équine qu'en CCP humaine. La présence de poil chez le cheval s'ajoute enfin à la problématique de couche limite.

Figure 19 : Températures enregistrées à proximité de la peau de différentes régions du corps* pendant une séance de CCP (température annoncée à -140°C) (d'après Savic *et al.*, 2013)



*Chest = poitrine, Trunk = tronc, thigh = cuisse, shank = bras

Une solution au problème de couche limite et à l'hétérogénéité de température liée au transfert convectif a été proposée par Bouzigon *et al.* (2017). Il s'agit d'une chambre de cryothérapie à convection forcée. La vitesse de l'air était comprise entre 1,5 m/s et 3,7 m/s. La température d'exposition programmée était de -40°C. Les résultats ont montré que la température à l'intérieur de la chambre pendant l'exposition était de -34,5 +/- 3°C. Cette température se rapproche de la température programmée. La convection pourrait donc être une solution au problème de différence de température. Par ailleurs la réduction de la température de la peau observée lors de cette étude était comparable à celle obtenue avec des protocoles habituels à plus basse température dans des chambres classiques sans convection. Ces résultats sont liés notamment à la diminution de la couche limite avec la convection. Cette solution pourrait être utilisée en médecine équine et aurait plusieurs intérêts. En premier, la convection forcée pourrait limiter la différence entre la température annoncée et la température réelle qui est d'autant plus grande que le volume des cabines équines est important. D'autre part, réduire la couche limite permet d'obtenir des résultats de réductions de température de peau comparables en utilisant une température plus haute. Ainsi l'introduction de la convection en CCE équine permettrait d'obtenir des diminutions de température de peau plus importantes et donc de dépasser la limite technologique liée à la température minimale obtenue par décompression de l'azote.

Enfin, le coût financier et les contraintes d'utilisation par rapport aux bénéfices espérés est un frein à la généralisation de la CCP notamment chez les chevaux en récupération. En effet l'investissement pour les séances de CCE ou de CCP est conséquent tant en investissement initial qu'en coût d'entretien. Or les bénéfices apportés par la CCE ne semblent pas être majeurs. Le rapport coût financier versus effets biologiques bénéfiques ne semble donc pas en faveur de son utilisation de manière habituelle pour améliorer la performance ou la récupération des chevaux de sports et de courses. Une amélioration de la technologie permettant d'obtenir des résultats fiables ou une diminution du coût de la technique semble nécessaire pour une utilisation en pratique courante.

2. Comparaison entre la cryothérapie corps entier et d'autres méthodes de cryothérapie

La cryothérapie pour améliorer la récupération est largement employé chez les sportifs. D'autres méthodes étaient utilisées avant l'apparition de la CCE telles que l'immersion dans l'eau froide, l'application de poches de glace ou l'utilisation de dispositifs cryogéniques locaux (ex : pistolets cryogéniques). L'immersion dans l'eau froide est réalisée dans une eau à moins de 15°C pendant 10 à 12 minutes. Ces méthodes sont plus accessibles que la CCE tant d'un point de vue pratique que financier. Il est donc intéressant d'évaluer si la CCE apporte un réel bénéfice par rapport à ces méthodes plus classiques.

Les propriétés de la cryothérapie sont en lien avec la réduction de la température des tissus. D'après Bleakley *et al.* (2014), chez l'humain, l'application de poches de glace semble être la méthode entraînant la plus grande réduction de la température de la peau sur la zone d'application de la poche (genoux ou cuisse), elle est autour de -20°C. La diminution de la température de ces deux mêmes zones après l'immersion dans l'eau froide et la CCE semblent similaires pour les deux techniques, autour de -10°C. Les températures musculaire et centrale sont

comparables pour les trois techniques et la diminution est faible. La réduction de la température musculaire est autour de -2°C pour les trois techniques, celle de la température centrale est négligeable.

Concernant la récupération, les études ne semblent pas démontrer un bénéfice de la CCE par rapport à l'immersion. L'étude de Wilson montre un effet négatif de la CCE sur la fonction musculaire par rapport à l'immersion après un marathon et au groupe placebo (Wilson *et al.*, 2018). Des résultats similaires ont été observés dans l'étude d'Abaïdia *et al.* (2017). Ces résultats sont cependant à nuancer, des études ont montré un intérêt de la CCE dans la récupération. D'autres travaux sont nécessaires pour confirmer ces résultats. Les effets de la CCE et de l'immersion semblent comparables concernant la réactivation parasympathique après l'exercice (Bleakley *et al.*, 2014).

Les marqueurs de l'inflammation et musculaires ne sont pas modifiés par l'immersion. Plusieurs études sont en faveur d'une modification de ces marqueurs par la CCE. De plus, l'immersion dans l'eau froide constitue un stress oxydatif à l'origine de l'augmentation de radicaux libres tandis qu'une augmentation de la capacité anti-oxydante a été montrée après la CCE (Bleakley *et al.*, 2014).

Les preuves scientifiques ne semblent donc pas encore suffisantes pour favoriser la CCE par rapport à d'autres formes de cryothérapie notamment l'immersion dans l'eau froide. D'autres études seraient nécessaires pour confirmer ou infirmer un apport de la CCE par rapport à l'immersion notamment.

Conclusion

Apparue dans les années 70, la cryothérapie corps entier s'est développée chez l'homme notamment en médecine du sport. Cette technique consiste à exposer un patient à des températures extrêmement froides, de l'ordre de -110°C pendant environ 2 à 4 minutes.

L'effet recherché chez les sportifs est une amélioration de la récupération et parfois de la performance. Les preuves d'un effet dans cette indication sont prometteuses mais encore insuffisantes. Certaines études semblent montrer une augmentation de certaines cytokines anti-inflammatoires, une diminution des cytokines pro-inflammatoires. Une diminution des marqueurs de dommages musculaires est observée dans certaines recherches. Elle pourrait être liée à une réduction des dommages secondaires liés à l'inflammation.

En médecine équine, l'utilisation de la cryothérapie corps entier est encore anecdotique. Elle est destinée en particulier à des chevaux de sport et de course. Les applications déclarées par les constructeurs sont variées malgré l'absence de preuves scientifiques les validant. Seule une étude expérimentale a été réalisée sur la cryothérapie corps entier sur le cheval. Elle a permis de montrer l'inefficacité des protocoles utilisées en médecine humaine sur les chevaux. Le refroidissement de la peau était insuffisant. Plusieurs solutions pourraient être proposées notamment une augmentation du temps d'exposition ou l'utilisation de chambre à convection forcée. Des recherches supplémentaires doivent être réalisées avant une utilisation plus large de la cryothérapie corps entier chez le cheval.

Liste des références bibliographiques

- ABAÏDIA, A.-E., LAMBLIN, J., DELECROIX, B., *et al.* (2017) Recovery From Exercise-Induced Muscle Damage: Cold-Water Immersion Versus Whole-Body Cryotherapy. *International Journal of Sports Physiology and Performance* vol. 12, n° 3, p. 402-409. [<https://doi.org/10.1123/ijsp.2016-0186>]
- ADAM, J. (2014) Cryothérapie corps entier : histoire, concept et matériel. *Kinésithérapie, la Revue* vol. 14, n° 152-153, p. 41-44. [<https://doi.org/10.1016/j.kine.2014.06.005>]
- BAIR, M.J., KREBS, E.E. (2020) Fibromyalgia. *Annals of Internal Medicine* vol. 172, n° 5, p. ITC33-ITC48. [<https://doi.org/10.7326/AITC202003030>]
- BANFI, G., LOMBARDI, G., COLOMBINI, A., *et al.* (2010) Bone metabolism markers in sports medicine. *Sports Medicine* vol. 40, n° 8, p. 697-714. [<https://doi.org/10.2165/11533090-000000000-00000>]
- BANFI, G., MELEGATI, G., BARASSI, A., *et al.* (2009a) Beneficial effects of the whole-body cryotherapy on sport haemolysis. *Journal of Human Sport and Exercise* vol. 4, n° 2, p. 189-193. [<https://doi.org/10.4100/jhse.2009.42.11>]
- BANFI, G., MELEGATI, G., BARASSI, A., *et al.* (2009b) Effects of whole-body cryotherapy on serum mediators of inflammation and serum muscle enzymes in athletes. *Journal of Thermal Biology* vol. 34, n° 2, p. 55-59. [<https://doi.org/10.1016/j.jtherbio.2008.10.003>]
- BANFI, G., MELEGATI, G., BARASSI, A., *et al.* (2009c) Effects of the whole-body cryotherapy on NTproBNP, hsCRP and troponin I in athletes. *Journal of Science and Medicine in Sport* vol. 12, n° 6, p. 609-610. [<https://doi.org/10.1016/j.jsams.2008.06.004>]
- BARŁOWSKA-TRYBULEC, M., ZAWOJSKA, K., SZKLARCZYK, J., *et al.* (2022) Effect of whole body cryotherapy on low back pain and release of endorphins and stress hormones in patients with lumbar spine osteoarthritis. *Reumatologia* vol. 60, n° 4, p. 247-251. [<https://doi.org/10.5114/reum.2022.119040>]
- BEN KHEDHER BALBOLIA, S., BARRY, C., HASSLER, C., *et al.* (2019) Evaluation de l'efficacité et de la sécurité de la cryothérapie du corps entier à visée thérapeutique. In *INSERM*. [<https://www.inserm.fr/rapport/evaluation-de-lefficacite-et-de-la-securite-de-la-cryotherapie-du-corps-entier-a-visee-therapeutique-2019/>] (consulté le 31/07/2022).
- BERK, J.L., LENNER, K.A., MCFADDEN, E.R. (1987) Cold-induced bronchoconstriction: role of cutaneous reflexes vs. direct airway effects. *Journal of Applied Physiology* vol. 63, n° 2, p. 659-664. [<https://doi.org/10.1152/jappl.1987.63.2.659>]
- BETTONI, L., BONOMI, F.G., ZANI, V., *et al.* (2013) Effects of 15 consecutive cryotherapy sessions on the clinical output of fibromyalgic patients. *Clinical Rheumatology* vol. 32, n° 9, p. 1337-1345. [<https://doi.org/10.1007/s10067-013-2280-9>]
- BLEAKLEY, C.M., BIEUZEN, F., DAVISON, G.W., *et al.* (2014) Whole-body cryotherapy: empirical evidence and theoretical perspectives. *Open Access Journal of Sports Medicine* vol. 5, p. 25-36. [<https://doi.org/10.2147/OAJSM.S41655>]
- BOGARD, F., BOUCHET, B., MURER, S., *et al.* (2020) Critical Evaluation of Whole-Body Cryostimulation Protocol in Race Horses. *Journal of Equine Veterinary Science* vol. 88, p. 102944. [<https://doi.org/10.1016/j.jevs.2020.102944>]
- BOUZIGON, R., ARFAOUI, A., GRAPPE, F., *et al.* (2017) Validation of a new whole-body cryotherapy chamber based on forced convection. *Journal of Thermal Biology* vol. 65, p. 138-144. [<https://doi.org/10.1016/j.jtherbio.2017.02.019>]
- BOUZIGON, R., GRAPPE, F., RAVIER, G., *et al.* (2016) Whole- and partial-body cryostimulation/cryotherapy: Current technologies and practical applications. *Journal of Thermal Biology* vol. 61, p. 67-81. [<https://doi.org/10.1016/j.jtherbio.2016.08.009>]
- BRANCACCIO, P., LIPPI, G., MAFFULLI, N. (2010) Biochemical markers of muscular damage. *Clinical Chemistry and Laboratory Medicine* vol. 48, n° 6, p. 757-767. [<https://doi.org/10.1515/CCLM.2010.179>]

- CÁMARA-LEMARROY, C.R., AZPIRI-LÓPEZ, J.R., VÁZQUEZ-DÍAZ, L.A., *et al.* (2017) Abdominal Aortic Dissection and Cold-Intolerance After Whole-Body Cryotherapy: A Case Report. *Clinical Journal of Sport Medicine* vol. 27, n° 5, p. e67-e68. [https://doi.org/10.1097/JSM.0000000000000376]
- CARRARD, J., LAMBERT, A.C., GENNÉ, D. (2017) Transient global amnesia following a whole-body cryotherapy session. *BMJ Case Reports* vol. 2017, p. bcr-2017-221431. [https://doi.org/10.1136/bcr-2017-221431]
- CASTELLANI, J.W., M BRENNER, I.K., RHIND, S.G. (2002) Cold exposure: human immune responses and intracellular cytokine expression. *Medicine and Science in Sports and Exercise* vol. 34, n° 12, p. 2013-2020. [https://doi.org/10.1097/00005768-200212000-00023]
- CHEE, M.M., STURROCK, R.D. (2007) Ankylosing spondylitis. *Scottish Medical Journal* vol. 52, n° 4, p. 32-35; quiz 35, 54. [https://doi.org/10.1258/rsmsmj.52.4.32]
- CHOLEWKA, A., DRZAZGA, Z., SIEROŃ, A. (2006) Monitoring of whole body cryotherapy effects by thermal imaging: preliminary report. *Physica Medica* vol. 22, n° 2, p. 57-62. [https://doi.org/10.1016/S1120-1797(06)80054-2]
- CHOLEWKA, A., STANEK, A., SIEROŃ, A., *et al.* (2012) Thermography study of skin response due to whole-body cryotherapy. *Skin Research and Technology* vol. 18, n° 2, p. 180-187. [https://doi.org/10.1111/j.1600-0846.2011.00550.x]
- CHOY, E. (2012) Understanding the dynamics: pathways involved in the pathogenesis of rheumatoid arthritis. *Rheumatology* vol. 51 Suppl 5, p. v3-11. [https://doi.org/10.1093/rheumatology/kes113]
- CLARKSON, P.M., HUBAL, M.J. (2002) Exercise-induced muscle damage in humans. *American Journal of Physical Medicine & Rehabilitation* vol. 81, n° 11 Suppl, p. S52-69. [https://doi.org/10.1097/00002060-200211001-00007]
- COSTELLO, J., MCNAMARA, P., O'CONNELL, M.-L., *et al.* (2014) 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* vol. 4, p. 243-250. [https://doi.org/10.5628/aeht.v4i1.152]
- COSTELLO, J. T., ALGAR, L.A., DONNELLY, A.E. (2012) Effects of whole-body cryotherapy (-110 °C) on proprioception and indices of muscle damage. *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports* vol. 22, n° 2, p. 190-198. [https://doi.org/10.1111/j.1600-0838.2011.01292.x]
- COSTELLO, J.T., BAKER, P.R.A., MINETT, G.M., *et al.* (2015) Whole-body cryotherapy (extreme cold air exposure) for preventing and treating muscle soreness after exercise in adults. *The Cochrane Database of Systematic Reviews* n° 9, p. CD010789. [https://doi.org/10.1002/14651858.CD010789.pub2]
- COSTELLO, J.T., CULLIGAN, K., SELFE, J., *et al.* (2012) Muscle, Skin and Core Temperature after -110°C Cold Air and 8°C Water Treatment. *PLoS One* vol. 7, n° 11, p. e48190. [https://doi.org/10.1371/journal.pone.0048190]
- CRYOMANUFACTURING (2022) Cryojump : The whole body cryotherapy van for horses. *In Cryo Manufacturing*. [https://www.cryomanufacturing.com/en/cryojump-equine-cryotherapy-cabin/] (consulté le 26/10/2022).
- DĘBIEC-BAK, A., SKRZEK, A., PODBIELSKA, H. (2013) Application of thermovision for estimation of the optimal and safe parameters of the whole body cryotherapy. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry* vol. 111, n° 3, p. 1853-1859. [https://doi.org/10.1007/s10973-012-2741-4]
- DUGUÉ, B.M. (2015) An attempt to improve Ferreira-Junior model concerning the anti-inflammatory action of whole-body cryotherapy after exercise induced muscular damage (EIMD). *Frontiers in Physiology* vol. 6, p. 35. [https://doi.org/10.3389/fphys.2015.00035]
- DULIAN, K., LASKOWSKI, R., GRZYWACZ, T., *et al.* (2015) The whole body cryostimulation modifies irisin concentration and reduces inflammation in middle aged, obese men. *Cryobiology* vol. 71, n° 3, p. 398-404. [https://doi.org/10.1016/j.cryobiol.2015.10.143]

- EDOUARD, A., COSSON, C. (2003) Circulating troponin I assay: uses and misuses in medical practice. *La Revue De Médecine Interne* vol. 24, n° 9, p. 623-626. [https://doi.org/10.1016/s0248-8663(03)00228-5]
- FASSHAUER, M., BLÜHER, M. (2015) Adipokines in health and disease. *Trends in Pharmacological Sciences* vol. 36, n° 7, p. 461-470. [https://doi.org/10.1016/j.tips.2015.04.014]
- FEI (2022) Prohibited supportive therapies. In *FEI Veterinary rules*. [https://inside.fei.org/content/fei-veterinary-rules] (consulté le 31/07/2022).
- FERREIRA-JUNIOR, J.B., BOTTARO, M., LOENNEKE, J.P., *et al.* (2014) Could whole-body cryotherapy (below -100°C) improve muscle recovery from muscle damage? *Frontiers in Physiology* vol. 5, p. 247. [https://doi.org/10.3389/fphys.2014.00247]
- FERREIRA-JUNIOR, J. B., BOTTARO, M., VIEIRA, C.A., *et al.* (2014) Effects of partial-body cryotherapy (-110°C) on muscle recovery between high-intensity exercise bouts. *International Journal of Sports Medicine* vol. 35, n° 14, p. 1155-1160. [https://doi.org/10.1055/s-0034-1382057]
- FONDA, B., DE NARDI, M., SARABON, N. (2014) Effects of whole-body cryotherapy duration on thermal and cardio-vascular response. *Journal of Thermal Biology* vol. 42, p. 52-55. [https://doi.org/10.1016/j.jtherbio.2014.04.001]
- 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* vol. 23, n° 5, p. e270-278. [https://doi.org/10.1111/sms.12074]
- FRANCE GALOP (2022) Mesures de protection. In *Code des courses de galop*. [https://www.france-galop.com/fr/Code_des_Courses_et_Conditions_Generales] (consulté le 14/10/2022).
- FURMANEK, M.P., SŁOMKA, K., JURAS, G. (2014) The effects of cryotherapy on proprioception system. *BioMed Research International* vol. 2014, p. 696397. [https://doi.org/10.1155/2014/696397]
- GALLIERA, E., DOGLIOTTI, G., MELEGATI, G., *et al.* (2013) Bone remodelling biomarkers after whole body cryotherapy (WBC) in elite rugby players. *Injury* vol. 44, n° 8, p. 1117-1121. [https://doi.org/10.1016/j.injury.2012.08.057]
- GARCÍA-ESPINOZA, Ó.A., SALAS-FRAIRE, Ó., FLORES-GARZA, P.P., *et al.* (2017) Analgesic effect of whole body cryotherapy in patients with trapezius myofascial pain syndrome: A longitudinal, non-blinded, experimental study. *Medicina Universitaria* vol. 19, n° 76, p. 115-122. [https://doi.org/10.1016/j.rmu.2017.07.004]
- GIZIŃSKA, M., RUTKOWSKI, R., ROMANOWSKI, W., *et al.* (2015) Effects of Whole-Body Cryotherapy in Comparison with Other Physical Modalities Used with Kinesitherapy in Rheumatoid Arthritis. *BioMed Research International* vol. 2015, p. 409174. [https://doi.org/10.1155/2015/409174]
- GRASSO, D., LANTERI, P., DI BERNARDO, C., *et al.* (2014) Salivary steroid hormone response to whole-body cryotherapy in elite rugby players. *Journal of Biological Regulators and Homeostatic Agents* vol. 28, n° 2, p. 291-300.
- GUILLOT, X., TORDI, N., MOUROT, L., *et al.* (2014) Cryotherapy in inflammatory rheumatic diseases: a systematic review. *Expert Review of Clinical Immunology* vol. 10, n° 2, p. 281-294. [https://doi.org/10.1586/1744666X.2014.870036]
- HALL, C. (2004) Essential biochemistry and physiology of (NT-pro)BNP. *European Journal of Heart Failure* vol. 6, n° 3, p. 257-260. [https://doi.org/10.1016/j.ejheart.2003.12.015]
- HAMMOND, L., MITCHELL, K., CUTTELL, S. (2020) Ventilatory responses to whole body cryotherapy. *Journal of Thermal Biology* vol. 91, p. 102633. [https://doi.org/10.1016/j.jtherbio.2020.102633]
- HAUSSWIRTH, C., LOUIS, J., BIEUZEN, F., *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* vol. 6, n° 12, p. e27749. [https://doi.org/10.1371/journal.pone.0027749]
- HAUSSWIRTH, C., SCHAAL, K., LE MEUR, Y., *et al.* (2013) Parasympathetic activity and blood catecholamine responses following a single partial-body cryostimulation and a whole-body

- cryostimulation. *PloS One* vol. 8, n° 8, p. e72658. [https://doi.org/10.1371/journal.pone.0072658]
- HERRERA, E., SANDOVAL, M.C., CAMARGO, D.M., *et al.* (2010) Motor and sensory nerve conduction are affected differently by ice pack, ice massage, and cold water immersion. *Physical Therapy* vol. 90, n° 4, p. 581-591. [https://doi.org/10.2522/ptj.20090131]
- HIRVONEN, H.E., MIKKELSSON, M.K., KAUTIAINEN, H., *et al.* (2006) Effectiveness of different cryotherapies on pain and disease activity in active rheumatoid arthritis. A randomised single blinded controlled trial. *Clinical and Experimental Rheumatology* vol. 24, n° 3, p. 295-301.
- JASTRZĄBEK, R., STRABURZYŃSKA-LUPA, A., RUTKOWSKI, R., *et al.* (2013) Effects of different local cryotherapies on systemic levels of TNF- α , IL-6, and clinical parameters in active rheumatoid arthritis. *Rheumatology International* vol. 33, n° 8, p. 2053-2060. [https://doi.org/10.1007/s00296-013-2692-5]
- JOCH, W., JONAS, L., NÖCKER, K., *et al.* (2006) Déclaration de consensus relative à la cryothérapie du corps entier. [https://www.kinecryo.fr/wp-content/uploads/2021/04/Consensus-cryo.pdf] (consulté le 31/07/2022).
- KEATINGE, W.R., NADEL, J.A. (1965) Immediate respiratory responses to sudden cooling of the skin. *Journal of Applied Physiology* vol. 20, p. 65-69. [https://doi.org/10.1152/jappl.1965.20.1.65]
- KELLMANN, M., BERTOLLO, M., BOSQUET, L., *et al.* (2018) Recovery and Performance in Sport: Consensus Statement. *International Journal of Sports Physiology and Performance* vol. 13, n° 2, p. 240-245. [https://doi.org/10.1123/ijsp.2017-0759]
- KHAN, F.Y. (2009) Rhabdomyolysis: a review of the literature. *The Netherlands Journal of Medicine* vol. 67, n° 9, p. 272-283.
- KLIMEK, A.T., LUBKOWSKA, A., SZYGUŁA, Z., *et al.* (2010) Influence of the ten sessions of the whole body cryostimulation on aerobic and anaerobic capacity. *International Journal of Occupational Medicine and Environmental Health* vol. 23, n° 2, p. 181-189. [https://doi.org/10.2478/v10001-010-0019-2]
- KRUEGER, M., COSTELLO, J.T., ACHTZEHN, S., *et al.* (2019) Whole-body cryotherapy (-110 °C) following high-intensity intermittent exercise does not alter hormonal, inflammatory or muscle damage biomarkers in trained males. *Cytokine* vol. 113, p. 277-284. [https://doi.org/10.1016/j.cyto.2018.07.018]
- KULIS, A., MISIOREK, A., MARCHEWKA, J., *et al.* (2017) Effect of whole-body cryotherapy on the rheological parameters of blood in older women with spondyloarthritis. *Clinical Hemorheology and Microcirculation* vol. 66, n° 3, p. 187-195. [https://doi.org/10.3233/CH-160230]
- LE SÉNAT (2019) Pratique de la cryothérapie. In *Journal Officiel du Sénat*. [https://www.senat.fr/questions/base/2019/qSEQ190309253.html] (consulté le 31/07/2022).
- LEBLANC, J., DULAC, S., CÔTÉ, J., *et al.* (1975) Autonomic nervous system and adaptation to cold in man. *Journal of Applied Physiology* vol. 39, n° 2, p. 181-186. [https://doi.org/10.1152/jappl.1975.39.2.181]
- LEGIFRANCE (2022) Arrêt de la cour de cassation-Chambre criminelle. [https://www.legifrance.gouv.fr/juri/id/JURITEXT000045802267?init=true&page=1&query=cryo%C3%A9rapie+corps+entier&searchField=ALL&tab_selection=all] (consulté le 31/07/2022).
- LEGRAND, C. (2014) Cryothérapie corps entier : coûts d'investissement, de fonctionnement et rentabilité. *Kinésithérapie, la Revue* vol. 14, n° 152, p. 69-75. [https://doi.org/10.1016/j.kine.2014.04.004]
- LEPPÄLUOTO, J., WESTERLUND, T., HUTTUNEN, P., *et al.* (2008) Effects of long-term whole-body cold exposures on plasma concentrations of ACTH, beta-endorphin, cortisol, catecholamines and cytokines in healthy females. *Scandinavian Journal of Clinical and Laboratory Investigation* vol. 68, n° 2, p. 145-153. [https://doi.org/10.1080/00365510701516350]
- LIFE BSE (2022) Cryotherapy | The Cryochamber for horses. In *Cryochamber*. [https://www.cryochamber.co.uk/en/cryotherapy/] (consulté le 26/10/2022).

- LIOT, J.P., GUEGUERE, E., LAGET, A., *et al.* (2022) Dossier technique: pratique de la physiothérapie et rééducation fonctionnelle vétérinaire. *In Ordre des vétérinaires*. [https://www.veterinaire.fr/system/files/files/2021-11/physiotherapie_actes_et_delegations_02072015.pdf] (consulté le 31/07/2022).
- LIPPI, G., SANCHIS-GOMAR, F. (2019) Epidemiological, biological and clinical update on exercise-induced hemolysis. *Annals of Translational Medicine* vol. 7, n° 12, p. 270. [<https://doi.org/10.21037/atm.2019.05.41>]
- LOMBARDI, G., COLOMBINI, A., PORCELLI, S., *et al.* (2014) Muscular Damage and Kidney Function in Rugby Players after Daily Whole Body Cryostimulation. *Physiology Journal* vol. 2014, p. e790540. [<https://doi.org/10.1155/2014/790540>]
- LOMBARDI, G., LANTERI, P., PORCELLI, S., *et al.* (2013) Hematological profile and martial status in rugby players during whole body cryostimulation. *PloS One* vol. 8, n° 2, p. e55803. [<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0055803>]
- LOMBARDI, G., ZIEMANN, E., BANFI, G. (2017) Whole-Body Cryotherapy in Athletes: From Therapy to Stimulation. An Updated Review of the Literature. *Frontiers in Physiology* vol. 8, p. 258. [<https://doi.org/10.3389/fphys.2017.00258>]
- LUBKOWSKA, A., BANFI, G., DOŁĘGOWSKA, B., *et al.* (2010a) Changes in lipid profile in response to three different protocols of whole-body cryostimulation treatments. *Cryobiology* vol. 61, n° 1, p. 22-26. [<https://doi.org/10.1016/j.cryobiol.2010.03.010>]
- 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* vol. 7, n° 10, p. e46352. [<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0046352>]
- LUBKOWSKA, A., DOŁĘGOWSKA, B., SZYGUŁA, Z., *et al.* (2009) Activity of selected enzymes in erythrocytes and level of plasma antioxidants in response to single whole-body cryostimulation in humans. *Scandinavian Journal of Clinical and Laboratory Investigation* vol. 69, n° 3, p. 387-394. [<https://doi.org/10.1080/00365510802699246>]
- LUBKOWSKA, A., DUDZIŃSKA, W., BRYCZKOWSKA, I., *et al.* (2015) Body Composition, Lipid Profile, Adipokine Concentration, and Antioxidant Capacity Changes during Interventions to Treat Overweight with Exercise Programme and Whole-Body Cryostimulation. *Oxidative Medicine and Cellular Longevity* vol. 2015, p. 803197. [<https://doi.org/10.1155/2015/803197>]
- LUBKOWSKA, A., SUSKA, M. (2011) The increase in systolic and diastolic blood pressure after exposure to cryogenic temperatures in normotensive men as a contraindication for whole-body cryostimulation. *Journal of Thermal Biology* vol. 36, n° 5, p. 264-268. [<https://doi.org/10.1016/j.jtherbio.2011.03.011>]
- 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* vol. 23, n° 4, p. 367-375. [<https://doi.org/10.2478/v10001-010-0037-0>]
- LUBKOWSKA, A., SZYGUŁA, Z., CHLUBEK, D., *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* vol. 71, n° 5, p. 419-425. [<https://doi.org/10.3109/00365513.2011.580859>]
- LUBKOWSKA, A., SZYGUŁA, Z., KLIMEK, A.J., *et al.* (2010b) 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* vol. 109, n° 1, p. 67-72. [<https://doi.org/10.1007/s00421-009-1207-2>]
- MEEUSEN, R., LIEVENS, P. (1986) The use of cryotherapy in sports injuries. *Sports Medicine (Auckland, N.Z.)* vol. 3, n° 6, p. 398-414. [<https://doi.org/10.2165/00007256-198603060-00002>]
- MILA-KIERZENKOWSKA, C., JURECKA, A., WOŹNIAK, A., *et al.* (2013) The effect of submaximal exercise preceded by single whole-body cryotherapy on the markers of oxidative stress and

- inflammation in blood of volleyball players. *Oxidative Medicine and Cellular Longevity* vol. 2013, p. 409567. [<https://doi.org/10.1155/2013/409567>]
- MILLER, E., KOSTKA, J., WŁODARCZYK, T., *et al.* (2016) Whole-body cryostimulation (cryotherapy) provides benefits for fatigue and functional status in multiple sclerosis patients. A case-control study. *Acta Neurologica Scandinavica* vol. 134, n° 6, p. 420-426. [<https://doi.org/10.1111/ane.12557>]
- MILLER, E., MROWICKA, M., MALINOWSKA, K., *et al.* (2010) Effects of the whole-body cryotherapy on a total antioxidative status and activities of some antioxidative enzymes in blood of patients with multiple sclerosis-preliminary study. *The journal of medical investigation* vol. 57, n° 1-2, p. 168-173. [<https://doi.org/10.2152/jmi.57.168>]
- MINISTÈRE DE LA SANTÉ PUBLIQUE ET DE LA POPULATION (1962) Arrêté du 6 janvier 1962 fixant liste des actes médicaux ne pouvant être pratiqués que par des médecins ou pouvant être pratiqués également par des auxiliaires médicaux ou par des directeurs de laboratoires d'analyses médicales non médecins. In *Légifrance*. [<https://www.legifrance.gouv.fr/loda/id/JORFTEXT000000802880/2009-10-16/>] (consulté le 31/07/2022).
- MORGAN, K. (1998) Thermoneutral zone and critical temperatures of horses. *Journal of Thermal Biology* vol. 23, n° 1, p. 59-61. [[https://doi.org/10.1016/S0306-4565\(97\)00047-8](https://doi.org/10.1016/S0306-4565(97)00047-8)]
- MORGAN, K. (1997) Thermal insulance of peripheral tissue and coat in sport horses. *Journal of Thermal Biology* vol. 3, n° 22, p. 169-175. [[https://doi.org/10.1016/S0306-4565\(97\)00009-0](https://doi.org/10.1016/S0306-4565(97)00009-0)]
- MOUTACHAKKIR, M., LAMRANI HANCHI, A., BARAOU, A., *et al.* (2017) Immunoanalytical characteristics of C-reactive protein and high sensitivity C-reactive protein. *Annales De Biologie Clinique* vol. 75, n° 2, p. 225-229. [<https://doi.org/10.1684/abc.2017.1232>]
- NUGRAHA, B., GÜNTHER, J.T., RAWERT, H., *et al.* (2015) Effects of whole body cryo-chamber therapy on pain in patients with chronic low back pain: a prospective double blind randomised controlled trial. *European Journal of Physical and Rehabilitation Medicine* vol. 51, n° 2, p. 143-148.
- O'DOHERTY, J., HENRICSON, J., ANDERSON, C., *et al.* (2007) Sub-epidermal imaging using polarized light spectroscopy for assessment of skin microcirculation. *Skin research and technology* vol. 13, n° 4, p. 472-484. [<https://doi.org/10.1111/j.1600-0846.2007.00253.x>]
- OPAL, S.M., DEPALO, V.A. (2000) Anti-inflammatory cytokines. *Chest* vol. 117, n° 4, p. 1162-1172. [<https://doi.org/10.1378/chest.117.4.1162>]
- PARTRIDGE, E.M., COOKE, J., MCKUNE, A., *et al.* (2019) Whole-Body Cryotherapy: Potential to Enhance Athlete Preparation for Competition? *Frontiers in Physiology* vol. 10, p. 1007. [<https://doi.org/10.3389/fphys.2019.01007>]
- PARTRIDGE, E.M., COOKE, J., MCKUNE, A.J., *et al.* (2022) Application of acute pre-exercise partial-body cryotherapy promotes jump performance, salivary α -amylase and athlete readiness. *Biology of Sport* vol. 39, n° 3, p. 563-569. [<https://doi.org/10.5114/biolsport.2022.107019>]
- PAWIK, M., KOWALSKA, J., RYMASZEWSKA, J. (2019) The effectiveness of whole-body cryotherapy and physical exercises on the psychological well-being of patients with multiple sclerosis: A comparative analysis. *Advances in Clinical and Experimental Medicine* vol. 28, n° 11, p. 1477-1483. [<https://doi.org/10.17219/acem/104529>]
- POURNOT, H., BIEUZEN, F., LOUIS, J., *et al.* (2011) Time-course of changes in inflammatory response after whole-body cryotherapy multi exposures following severe exercise. *PloS One* vol. 6, n° 7, p. e22748. [<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0022748>]
- QU, C., WU, Z., XU, M., *et al.* (2020) Cryotherapy Models and Timing-Sequence Recovery of Exercise-Induced Muscle Damage in Middle- and Long-Distance Runners. *Journal of Athletic Training* vol. 55, n° 4, p. 329-335. [<https://doi.org/10.4085/1062-6050-529-18>]
- REVIVE® (2022) Equestrian Cryotherapy Chambers - Equine Cryo Machine. In *REVIVE®*. [<https://revive-cryo.me/revive-eq>] (consulté le 26/10/2022).
- ROMANOVSKY, A.A. (2014) Skin temperature: its role in thermoregulation. *Acta Physiologica* vol. 210, n° 3, p. 498-507. [<https://doi.org/10.1111/apha.12231>]
- ROMANOWSKI, M.W., STRABURZYŃSKA-LUPA, A. (2020) Is the whole-body cryotherapy a beneficial supplement to exercise therapy for patients with ankylosing spondylitis? *Journal*

- of *Back and Musculoskeletal Rehabilitation* vol. 33, n° 2, p. 185-192. [https://doi.org/10.3233/BMR-170978]
- ROMET, T.T. (1988) Mechanism of afterdrop after cold water immersion. *Journal of Applied Physiology* vol. 65, n° 4, p. 1535-1538. [https://doi.org/10.1152/jappl.1988.65.4.1535]
- ROSE, C., EDWARDS, K.M., SIEGLER, J., *et al.* (2017) Whole-body Cryotherapy as a Recovery Technique after Exercise: A Review of the Literature. *International Journal of Sports Medicine* vol. 38, n° 14, p. 1049-1060. [https://doi.org/10.1055/s-0043-114861]
- ROSZKOWSKA, K., WITKOWSKA-PILASZEWICZ, O., PRZEWOZNY, M., *et al.* (2018) Whole body and partial body cryotherapies - lessons from human practice and possible application for horses. *BMC Veterinary Research* vol. 14, n° 1, p. 394. [https://doi.org/10.1186/s12917-018-1679-6]
- RYMASZEWSKA, J., TULCZYNSKI, A., ZAGROBELNY, Z., *et al.* (2003) Influence of whole body cryotherapy on depressive symptoms - preliminary report. *Acta Neuropsychiatrica* vol. 15, n° 3, p. 122-128. [https://doi.org/10.1034/j.1601-5215.2003.00023.x]
- RYMASZEWSKA, J., URBANSKA, K., SZCZEŚNIAK, D., *et al.* (2019) Whole-body cryotherapy - promising add-on treatment of depressive disorders. *Psychiatria Polska* vol. 53, n° 5, p. 1053-1067. [https://doi.org/10.12740/PP/OnlineFirst/91298]
- SADURA-SIEKLUCKA, T., SOŁTYSIUK, B., KARLICKA, A., *et al.* (2019) Effects of whole body cryotherapy in patients with rheumatoid arthritis considering immune parameters. *Reumatologia* vol. 57, n° 6, p. 320-325. [https://doi.org/10.5114/reum.2019.90825]
- SAVIC, M., FONDA, B., SARABON, N. (2013) Actual temperature during and thermal response after whole-body cryotherapy in cryo-cabin. *Journal of Thermal Biology* vol. 38, n° 4, p. 186-191. [https://doi.org/10.1016/j.jtherbio.2013.02.004]
- SCHAAL, K., LE MEUR, Y., BIEUZEN, F., *et al.* (2013) Effect of recovery mode on postexercise vagal reactivation in elite synchronized swimmers. *Applied Physiology, Nutrition, and Metabolism* vol. 38, n° 2, p. 126-133. [https://doi.org/10.1139/apnm-2012-0155]
- SELFE, J., ALEXANDER, J., COSTELLO, J.T., *et al.* (2014) The Effect of Three Different (-135°C) Whole Body Cryotherapy Exposure Durations on Elite Rugby League Players. *PLoS One* vol. 9, n° 1, p. e86420. [https://doi.org/10.1371/journal.pone.0086420]
- SMOLANDER, J., WESTERLUND, T., UUSITALO, A., *et al.* (2006) Lung function after acute and repeated exposures to extremely cold air (-110 degrees C) during whole-body cryotherapy. *Clinical Physiology and Functional Imaging* vol. 26, n° 4, p. 232-234. [https://doi.org/10.1111/j.1475-097X.2006.00675.x]
- SOCIÉTÉ D'ENCOURAGEMENT À L'ÉLEVAGE DU CHEVAL FRANÇAIS (2022) Contrôle de l'absence de substances prohibées dans les prélèvements biologiques effectués sur un cheval. In *Code des courses au trot*. [https://www.letrot.com/fr/documentation-code-des-courses] (consulté le 31/07/2022).
- SPACE CABIN (2022) The Space Cabin horse Cryosauna for racehorses recovery. In *Space Cabin*. [https://space-cabin.com/products/cryosauna-space-cabin-horse/] (consulté le 26/10/2022).
- STANEK, A., CHOLEWKA, A., GADULA, J., *et al.* (2015) Can Whole-Body Cryotherapy with Subsequent Kinesiotherapy Procedures in Closed Type Cryogenic Chamber Improve BASDAI, BASFI, and Some Spine Mobility Parameters and Decrease Pain Intensity in Patients with Ankylosing Spondylitis? *BioMed Research International* vol. 2015, p. 404259. [https://doi.org/10.1155/2015/404259]
- STANEK, A., CHOLEWKA, A., WIELKOSZYŃSKI, T., *et al.* (2018a) Decreased Oxidative Stress in Male Patients with Active Phase Ankylosing Spondylitis Who Underwent Whole-Body Cryotherapy in Closed Cryochamber. *Oxidative Medicine and Cellular Longevity* vol. 2018, p. 7365490. [https://doi.org/10.1155/2018/7365490]
- STANEK, A., CHOLEWKA, A., WIELKOSZYŃSKI, T., *et al.* (2018b) Whole-Body Cryotherapy Decreases the Levels of Inflammatory, Oxidative Stress, and Atherosclerosis Plaque Markers in Male Patients with Active-Phase Ankylosing Spondylitis in the Absence of Classical Cardiovascular Risk Factors. *Mediators of Inflammation* vol. 2018, p. 8592532. [https://doi.org/10.1155/2018/8592532]

- STANEK, A., ROMUK, E., WIELKOSZYŃSKI, T., *et al.* (2019) Decreased Lipid Profile and Oxidative Stress in Healthy Subjects Who Underwent Whole-Body Cryotherapy in Closed Cryochamber with Subsequent Kinesiotherapy. *Oxidative Medicine and Cellular Longevity* vol. 2019, p. 7524878. [<https://doi.org/10.1155/2019/7524878>]
- STANEK, A., SIERON, A., CIEŚLAR, G., *et al.* (2005) The impact of whole-body cryotherapy on parameters of spinal mobility in patients with ankylosing spondylitis. *Ortopedia, Traumatologia, Rehabilitacja* vol. 7, n° 5, p. 549-554.
- STRABURZYŃSKA-LUPA, A., KASPRZAK, M.P., ROMANOWSKI, M.W., *et al.* (2018) The Effect of Whole-Body Cryotherapy at Different Temperatures on Proinflammatory Cytokines, Oxidative Stress Parameters, and Disease Activity in Patients with Ankylosing Spondylitis. *Oxidative Medicine and Cellular Longevity* vol. 2018, p. 2157496. [<https://doi.org/10.1155/2018/2157496>]
- STRAUB, R.H., PONGRATZ, G., HIRVONEN, H., *et al.* (2009) Acute cold stress in rheumatoid arthritis inadequately activates stress responses and induces an increase of interleukin 6. *Annals of the Rheumatic Diseases* vol. 68, n° 4, p. 572-578. [<https://doi.org/10.1136/ard.2008.089458>]
- SUTKOWY, P., AUGUSTYŃSKA, B., WOŹNIAK, A., *et al.* (2014) Physical exercise combined with whole-body cryotherapy in evaluating the level of lipid peroxidation products and other oxidant stress indicators in kayakers. *Oxidative Medicine and Cellular Longevity* vol. 2014, p. 402631. [<https://doi.org/10.1155/2014/402631>]
- SWENSON, C., SWÄRD, L., KARLSSON, J. (1996) Cryotherapy in sports medicine. *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports* vol. 6, n° 4, p. 193-200. [<https://doi.org/10.1111/j.1600-0838.1996.tb00090.x>]
- SZPOTOWICZ-CZECH, B., WIECEK, M., SZYMURA, J., *et al.* (2018) Changes in chosen immune system indicators and the level of HSP-70 after single whole-body cryostimulation in healthy men. *Central-European Journal of Immunology* vol. 43, n° 2, p. 186-193. [<https://doi.org/10.5114/ceji.2018.77389>]
- SZYGULA, Z., LUBKOWSKA, A., GIEMZA, C., *et al.* (2014) Hematological parameters, and hematopoietic growth factors: EPO and IL-3 in response to whole-body cryostimulation (WBC) in military academy students. *PLoS One* vol. 9, n° 4, p. e93096. [<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0093096>]
- TANSEY, E.A., JOHNSON, C.D. (2015) Recent advances in thermoregulation. *Advances in Physiology Education* vol. 39, n° 3, p. 139-148. [<https://doi.org/10.1152/advan.00126.2014>]
- VITENET, M., TUBEZ, F., MARREIRO, A., *et al.* (2018) Effect of whole body cryotherapy interventions on health-related quality of life in fibromyalgia patients: A randomized controlled trial. *Complementary Therapies in Medicine* vol. 36, p. 6-8. [<https://doi.org/10.1016/j.ctim.2017.10.011>]
- WESTERLUND, T., OKSA, J., SMOLANDER, J., *et al.* (2003) Thermal responses during and after whole-body cryotherapy (-110°C). *Journal of Thermal Biology* vol. 28, n° 8, p. 601-608. [<https://doi.org/10.1016/j.jtherbio.2003.08.006>]
- WESTERLUND, T., SMOLANDER, J., UUSITALO-KOSKINEN, A., *et al.* (2004) The blood pressure responses to an acute and long-term whole-body cryotherapy (-110°C) in men and women. *Journal of Thermal Biology* vol. 29, n° 6, p. 285-290. [<https://doi.org/10.1016/j.jtherbio.2004.05.004>]
- WESTERLUND, T., UUSITALO, A., SMOLANDER, J., *et al.* (2006) Heart rate variability in women exposed to very cold air (-110°C) during whole-body cryotherapy. *Journal of Thermal Biology* vol. 31, n° 4, p. 342-346. [<https://doi.org/10.1016/j.jtherbio.2006.01.004>]
- WILSON, L.J., COCKBURN, E., PAICE, K., *et al.* (2018) Recovery following a marathon: a comparison of cold water immersion, whole body cryotherapy and a placebo control. *European Journal of Applied Physiology* vol. 118, n° 1, p. 153-163. [<https://doi.org/10.1007/s00421-017-3757-z>]
- WOZNIAK, A., MILA-KIERZENKOWSKA, C., SZPINDA, M., *et al.* (2013) Whole-body cryostimulation and oxidative stress in rowers: the preliminary results. *Archives of Medical Science* vol. 9, n° 2, p. 303-308. [<https://doi.org/10.5114/aoms.2012.30835>]

- WOZNIAK, A., WOZNIAK, B., DREWA, G., *et al.* (2007) The effect of whole-body cryostimulation on lysosomal enzyme activity in kayakers during training. *European Journal of Applied Physiology* vol. 100, n° 2, p. 137-142. [<https://doi.org/10.1007/s00421-007-0404-0>]
- WYROSTEK, J., PIOTROWSKA, A., CZERWIŃSKA-LEDWIG, O., *et al.* (2021) Complex effects of whole body cryostimulation on hematological markers in patients with obesity. *PloS One* vol. 16, n° 4, p. e0249812. [<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0249812>]
- ZALEWSKI, P., BITNER, A., SŁOMKO, J., *et al.* (2014) Whole-body cryostimulation increases parasympathetic outflow and decreases core body temperature. *Journal of Thermal Biology* vol. 45, p. 75-80. [<https://doi.org/10.1016/j.jtherbio.2014.08.001>]
- ZALEWSKI, P., KLAWE, J.J., PAWLAK, J., *et al.* (2013) Thermal and hemodynamic response to whole-body cryostimulation in healthy subjects. *Cryobiology* vol. 66, n° 3, p. 295-302. [<https://doi.org/10.1016/j.cryobiol.2013.03.006>]
- ZIEMANN, E., OLEK, R.A., GRZYWACZ, T., *et al.* (2014) Whole-body cryostimulation as an effective way of reducing exercise-induced inflammation and blood cholesterol in young men. *European Cytokine Network* vol. 25, n° 1, p. 14-23. [<https://doi.org/10.1684/ecn.2014.0349>]
- ZIEMANN, E., OLEK, R.A., GRZYWACZ, T., *et al.* (2013) Whole-body cryostimulation as an effective method of reducing low-grade inflammation in obese men. *The Journal of Physiological Sciences* vol. 63, n° 5, p. 333-343. [<https://doi.org/10.1007/s12576-013-0269-4>]
- ZIEMANN, E., OLEK, R.A., KUJACH, S., *et al.* (2012) Five-day whole-body cryostimulation, blood inflammatory markers, and performance in high-ranking professional tennis players. *Journal of Athletic Training* vol. 47, n° 6, p. 664-672. [<https://doi.org/10.4085/1062-6050-47.6.13>]
-

Annexe 1 : Récapitulatif des résultats des études sur l'effet de la cryothérapie corps entier sur la population érythrocytaire, version complète

Paramètre	Effets	Sujets	Protocole	Présence d'un groupe contrôle (non soumis à la CCE)	Etude
Numération globulaire	Diminution	27 joueurs de rugby professionnels	2 sessions par jour pendant 7 jours 3min, -140°C	Non	Lombardi <i>et al.</i> , 2013
		15 femmes et 15 hommes, sportifs non professionnels	10 sessions (1 par jour) 3 minutes, -130°C	Non	Klimek <i>et al.</i> , 2010
		24 hommes (répartis en deux groupes : obèse, non obèse)	20 sessions (1 par jour) 2 à 3 min, -120°C	Non	Wyrostek <i>et al.</i> , 2021
	Diminution après 10 et 20 sessions Retour à la valeur de référence à 30 sessions	30 hommes, militaires	30 sessions (1 par jour) 3 min, -130°C	Oui	Szygula <i>et al.</i> , 2014
	Pas de différence	16 kayakistes professionnels	20 sessions (2 par jour pendant 10 jours)	Non	Sutkowy <i>et al.</i> , 2014

			3 min, -120°C à -145°C en fin de séance		
		12 joueurs de tennis professionnels	10 sessions (2 par jour pendant 5 jours) 3min, -120°C	Non	Ziemann <i>et al.</i> , 2012
		46 femmes âgées (moy = 66,6 ans) atteinte de spondylarthrite réparties en plusieurs groupes (+/- kinésithérapie)	10 sessions (1 par jour) 3 min, -120°C	Oui	Kulis <i>et al.</i> , 2017
Hématocrite	Diminution	27 joueurs de rugby professionnels	2 sessions par jour pendant 7 jours 3min, -140°C	Non	Lombardi <i>et al.</i> , 2013
		15 femmes et 15 hommes, sportifs non professionnels	10 sessions (1 par jour) 3 minutes, - 130°C	Non	Klimek <i>et al.</i> , 2010
		24 hommes (répartis en deux groupes : obèse, non obèse)	20 sessions (1 par jour) 2 à 3 min, - 120°C	Non	Wyrostek <i>et al.</i> , 2021
	Diminution après 10 et 20 sessions Retour à la valeur de référence à 30 sessions	30 hommes, militaires	30 sessions (1 par jour) 3 min, -130°C	Oui	Szygula <i>et al.</i> , 2014
	Pas de différence	46 femmes âgées (moy = 66,6 ans) atteinte de spondylarthrite	10 sessions (1 par jour) 3 min, -120°C	Oui	Kulis <i>et al.</i> , 2017

		réparties en plusieurs groupes (+/- kinésithérapie)			
Taux d'hémoglobine	Diminution	27 joueurs de rugby professionnels	2 sessions par jour pendant 7 jours 3min, -140°C	Non	Lombardi <i>et al.</i> , 2013
		15 femmes et 15 hommes, sportifs non professionnels	10 sessions (1 par jour) 3 minutes, -130°C	Non	Klimek <i>et al.</i> , 2010
	Diminution après 10 et 20 sessions Retour à la valeur de référence à 30 sessions	30 hommes, militaires	30 sessions (1 par jour) 3 min, -130°C	Oui	Szygula <i>et al.</i> , 2014
	Pas de différence	46 femmes âgées (moy = 66,6 ans) atteinte de spondylarthrite réparties en plusieurs groupes (+/- kinésithérapie)	10 sessions (1 par jour) 3 min, -120°C	Oui	Kulis <i>et al.</i> , 2017
		12 joueurs de tennis professionnels	10 sessions (2 par jour pendant 5 jours) 3min, -120°C	Non	Ziemann <i>et al.</i> , 2012
		24 hommes (répartis en deux groupes : obèse, non obèse)	20 sessions (1 par jour) 2 à 3 min, -120°C	Non	Wyrostek <i>et al.</i> , 2021
Volume globulaire moyen	Augmentation	27 joueurs de rugby professionnels	2 sessions par jour pendant 7 jours	Non	Lombardi <i>et al.</i> , 2013

			3min, -140°C		
		24 hommes (répartis en deux groupes : obèse, non obèse)	20 sessions (1 par jour) 2 à 3 min, -120°C	Non	Wyrostek <i>et al.</i> , 2021
	Pas de différence	30 hommes, militaires	30 sessions (1 par jour) 3 min, -130°C	Oui	Szygula <i>et al.</i> , 2014
		46 femmes âgées (moy = 6,6 ans) atteinte de spondylarthrite réparties en plusieurs groupes (+/- kinésithérapie)	10 sessions (1 par jour) 3 min, -120°C	Oui	Kulis <i>et al.</i> , 2017
Teneur globulaire moyenne en hémoglobine	Pas de différence	27 joueurs de rugby professionnels	2 sessions par jour pendant 7 jours 3min, -140°C	Non	Lombardi <i>et al.</i> , 2013
		24 hommes (répartis en deux groupes : obèse, non obèse)	20 sessions (1 par jour) 2 à 3 min, -120°C	Non	Wyrostek <i>et al.</i> , 2021
		30 hommes, militaires	30 sessions (1 par jour) 3 min, -130°C	Oui	Szygula <i>et al.</i> , 2014
Concentration corpusculaire moyenne en hémoglobine	Diminution	27 joueurs de rugby professionnels	2 sessions par jour pendant 7 jours 3min, -140°C	Non	Lombardi <i>et al.</i> , 2013
	Pas de différence	30 hommes, militaires	30 sessions (1 par jour) 3 min, -130°C	Oui	Szygula <i>et al.</i> , 2014
	Augmentation	24 hommes (répartis en deux groupes : obèse,	20 sessions (1 par jour)	Non	Wyrostek <i>et al.</i> , 2021

		non obèse)	2 à 3 min, -120°C		
Taux de réticulocytes	Pas de différence	46 femmes âgées (moy = 66,6 ans) atteinte de spondylarthrite réparties en plusieurs groupes (+/- kinésithérapie)	10 sessions (1 par jour) 3 min, -120°C	Oui	Kulis <i>et al.</i> , 2017
Indice de distribution des globules rouges	Augmentation	30 hommes, militaires	30 sessions (1 par jour) 3 min, -130°C	Oui	Szygula <i>et al.</i> , 2014
		27 joueurs de rugby professionnels	2 sessions par jour pendant 7 jours 3min, -140°C	Non	Lombardi <i>et al.</i> , 2013
	Pas de différence	24 hommes (répartis en deux groupes : obèse, non obèse)	20 sessions (1 par jour) 2 à 3 min, -120°C	Non	Wyrostek <i>et al.</i> , 2021

Annexe 2 : Récapitulatif des résultats des études sur l'effet de la CCE sur la population leucocytaire, version complète

Paramètre	Effets	Sujets	Protocole	Présence d'un groupe contrôle (non soumis à la CCE)	Etude
Numération leucocytaire	Augmentation	30 hommes, militaires	30 sessions (1 par jour) 3 min, - 130°C	Oui	Szygula <i>et al.</i> , 2014
		12 joueurs de tennis professionnels	10 sessions (2 par jour pendant 5 jours) 3min, - 120°C	Non	Ziemann <i>et al.</i> , 2012
		15 hommes, 21 ans, en bonne santé	10 sessions (1 par jour pendant 10 jours) 3min, - 130°C	Non	Lubkowska <i>et al.</i> , 2010b
	Pas de différence	27 joueurs de rugby professionnels	2 sessions par jour pendant 7 jours 3min, - 140°C	Non	Lombardi <i>et al.</i> , 2013
		16 kayakistes professionnels	20 sessions (2 par jour)	Non	Sutkowy <i>et al.</i> , 2014

			pendant 10 jours) 3 min, - 120°C à - 145°C en fin de séance		
		46 femmes âgées (moy = 66,6 ans) atteinte de spondylarthrite réparties en plusieurs groupes (+/- kinésithérapie)	10 sessions (1 par jour) 3 min, - 120°C	Oui	Kulis <i>et al.</i> , 2017
		11 coureurs de longues distances amateurs	4 séances (post-effort, 24h, 48h et 72h post-effort) 3 min, - 110°C	Oui	Pournot <i>et al.</i> , 2011
		24 hommes (répartis en deux groupes : obèse, non obèse)	20 sessions (1 par jour) 2 à 3 min, -120°C	Non	Wyrostek <i>et al.</i> , 2021
Numération lymphocytaire	Augmentation	15 hommes, 21 ans, en bonne santé	10 sessions (1 par jour pendant 10 jours) 3min, - 130°C	Non	Lubkowska <i>et al.</i> , 2010b
	Pas de différence	27 joueurs de rugby professionnels	2 sessions par jour pendant 7 jours 3min, - 140°C	Non	Lombardi <i>et al.</i> , 2013

		11 coureurs de longues distances amateurs	4 séances (post-effort, 24h, 48h et 72h post-effort) 3 min, - 110°C	Oui	Pournot <i>et al.</i> , 2011
		24 hommes (répartis en deux groupes : obèse, non obèse)	20 sessions (1 par jour) 2 à 3 min, -120°C	Non	Wyrostek <i>et al.</i> , 2021
% de lymphocytes	Augmentation	30 hommes, militaires	30 sessions (1 par jour) 3 min, - 130°C	Oui	Szygula <i>et al.</i> , 2014
	Pas de différence	12 joueurs de tennis professionnels	10 sessions (2 par jour pendant 5 jours) 3min, - 120°C	Non	Ziemann <i>et al.</i> , 2012
		27 joueurs de rugby professionnels	2 sessions par jour pendant 7 jours 3min, - 140°C	Non	Lombardi <i>et al.</i> , 2013
		16 kayakistes professionnels	20 sessions (2 par jour pendant 10 jours) 3 min, - 120°C à - 145°C en fin de	Non	Sutkowy <i>et al.</i> , 2014

			séance		
Numération monocytaire	Augmentation	15 hommes, 21 ans, en bonne santé	10 sessions (1 par jour pendant 10 jours) 3min, - 130°C	Non	Lubkowska <i>et al.</i> , 2010b
	Pas de différence	27 joueurs de rugby professionnels	2 sessions par jour pendant 7 jours 3min, - 140°C	Non	Lombardi <i>et al.</i> , 2013
		11 coureurs de longues distances amateurs	4 séances (post-effort, 24h, 48h et 72h post-effort) 3 min, - 110°C	Oui	Pournot <i>et al.</i> , 2011
		24 hommes (répartis en deux groupes : obèse, non obèse)	20 sessions (1 par jour) 2 à 3 min, -120°C	Non	Wyrostek <i>et al.</i> , 2021
% de monocytes	Augmentation	30 hommes, militaires	30 sessions (1 par jour) 3 min, - 130°C	Oui	Szygula <i>et al.</i> , 2014
	Pas de différence	27 joueurs de rugby professionnels	2 sessions par jour pendant 7 jours 3min, - 140°C	Non	Lombardi <i>et al.</i> , 2013

Numération granulocytaire	Eosinophiles	Augmentation	15 hommes, 21 ans, en bonne santé	10 sessions (1 par jour pendant 10 jours) 3min, -130°C	Non	Lubkowska <i>et al.</i> , 2010b
		Pas de différence	27 joueurs de rugby professionnels	2 sessions par jour pendant 7 jours 3min, -140°C	Non	Lombardi <i>et al.</i> , 2013
			24 hommes (répartis en deux groupes : obèse, non obèse)	20 sessions (1 par jour) 2 à 3 min, -120°C	Non	Wyrostek <i>et al.</i> , 2021
	% d'éosinophiles	Pas de différence	27 joueurs de rugby professionnels	2 sessions par jour pendant 7 jours 3min, -140°C	Non	Lombardi <i>et al.</i> , 2013
	Basophiles	Pas de différence	15 hommes, 21 ans, en bonne santé	10 sessions (1 par jour pendant 10 jours) 3min, -130°C	Non	Lubkowska <i>et al.</i> , 2010b
			27 joueurs de rugby professionnels	2 sessions par jours pendant 7 jours 3min, -140°C	Non	Lombardi <i>et al.</i> , 2013
			24 hommes (répartis en	20 sessions	Non	Wyrostek

			deux groupes : obèse, non obèse)	(1 par jour) 2 à 3 min, -120°C		<i>et al.</i> , 2021
% de basophiles	Augmentation	12 joueurs de tennis professionnels	10 sessions (2 par jour pendant 5 jours) 3min, - 120°C	Non	Ziemann <i>et al.</i> , 2012	
	Pas de différence	27 joueurs de rugby professionnels	2 sessions par jour pendant 7 jours 3min, - 140°C	Non	Lombardi <i>et al.</i> , 2013	
Neutrophiles	Augmentation	15 hommes, 21 ans, en bonne santé	10 sessions (1 par jour pendant 10 jours) 3min, - 130°C	Non	Lubkowska <i>et al.</i> , 2010b	
		11 coureurs de longues distances amateurs	4 séances (post- effort, 24h, 48h et 72h post- effort) 3 min, - 110°C	Oui	Pournot <i>et al.</i> , 2011	
	Pas de différence	27 joueurs de rugby professionnels	2 sessions par jour pendant 7 jours 3min, - 140°C	Non	Lombardi <i>et al.</i> , 2013	
		24 hommes (répartis en deux groupes :	20 sessions (1 par	Non	Wyrostek <i>et al.</i> , 2021	

			obèse, non obèse)	jour) 2 à 3 min, -120°C		
	% de neutrophiles	Pas de différence	16 kayakistes professionnels	20 sessions (2 par jour pendant 10 jours) 3 min, -120°C à -145°C en fin de séance	Non	Sutkowy <i>et al.</i> , 2014
			12 joueurs de tennis professionnels	10 sessions (2 par jour pendant 5 jours) 3min, -120°C	Non	Ziemann <i>et al.</i> , 2012
	% de granulocytes	Augmentation	30 hommes, militaires	30 sessions (1 par jour) 3 min, -130°C	Oui	Szygula <i>et al.</i> , 2014

CRYOTHÉRAPIE CORPS ENTIER : UTILISATION EN MÉDECINE HUMAINE ET PERSPECTIVES D'UTILISATION CHEZ LE CHEVAL

AUTEUR : Anaëlle LE LAN

RÉSUMÉ :

La cryothérapie corps entier est un mode de cryothérapie consistant à exposer un patient à des températures extrêmement froides, autour de -110°C , pendant 2 à 3 minutes. La cryothérapie corps entier se distingue de la cryothérapie corps partiel, dans laquelle la tête n'est pas refroidie. La séance a lieu dans une cryochambre ou une cryocabine. L'objectif de cette thèse est d'analyser à partir d'une revue bibliographique, les effets physiologiques de la cryothérapie corps entier et les utilisations de cette technique chez l'homme et d'envisager ses perspectives d'applications chez le cheval.

Le refroidissement a plusieurs conséquences sur l'organisme. La première, et la plus évidente, est une diminution de la température cutanée, et dans une moindre mesure de la température musculaire voire selon les études de la température centrale. Les effets de la cryothérapie corps entier sur les paramètres biochimiques sont plus discutés et dépendent du nombre d'expositions. Il semblerait que la cryothérapie corps entier induise une légère anémie, une diminution des marqueurs des dommages musculaires et de l'inflammation.

Les applications de la cryothérapie corps entier en médecine humaine sont variées. Cette technique a montré un intérêt dans la gestion d'affections inflammatoires, des phénomènes douloureux, de la sclérose en plaques et de certaines maladies psychiatriques. L'utilisation principale reste cependant le domaine de la médecine du sport pour améliorer la récupération et la performance.

L'usage sur les chevaux n'a, pour l'instant, pas fait preuve de son efficacité. Les protocoles habituellement utilisés sont ceux qui ont montré un effet en médecine humaine. Ils se montrent inadaptés pour obtenir un refroidissement suffisant chez le cheval notamment en raison du caractère ouvert des équipements. De futures recherches sont nécessaires pour établir des protocoles efficaces. La solution pourrait être d'augmenter le temps d'exposition, de diminuer la température ou d'utiliser des chambres à convection forcée.

La cryothérapie corps entier est une technologie récente. Des améliorations techniques dans les années à venir pourraient faciliter une utilisation plus large, notamment en médecine équine.

MOTS CLÉS :

CRYOTHERAPIE CORPS ENTIER, CRYOSTIMULATION, MEDECINE HUMAINE, CHEVAL, RECUPERATION, FROID, PHYSIOTHERAPIE

JURY :

Présidente : Pr Céline ROBERT

Directeur de thèse : Pr Fabrice AUDIGIÉ

Examinatrice : Dr Céline MESPOULHÈS-RIVIÈRE

Invitée : Dr Claire MOIROUD

WHOLE-BODY CRYOTHERAPY: USE IN HUMAN MEDECINE AND PERSPECTIVE IN EQUINE MEDECINE

AUTHOR: Anaëlle LE LAN

SUMMARY:

The whole-body cryotherapy is a cryotherapy method in which the patient is exposed to extremely cold temperature for a short amount of time, around two to three minutes. Two types of techniques can be distinguished: whole-body cryotherapy and partial body cryotherapy. In the latter, the head of the patient remains outside. The objective of this work was to analyse the physiological effects of whole-body cryotherapy and the uses of this technique in humans, based on a literature review, and to consider its potential applications in horses.

The exposition to cold has consequences on the organism. First, the skin temperature is lowered. The decrease of the muscle and core temperature are less significant. Effects of whole-body cryotherapy on blood parameters are more questionable. It seems to induce a slight transient anemia, reduce muscle damage parameters and inflammatory markers.

Several applications of whole-body cryotherapy in human medicine exist. Evidences suggest that it can have an interest in the management of inflammatory diseases, pain, multiple sclerosis and some psychiatric diseases. The main application is in sport medicine, to improve recovery and performance.

Its use on horses has not been proven to be effective yet. Protocols used in horses are usually close to the human ones. They fail to induce a significant reduction of the skin temperature on horses especially because of the open nature of the equipments. Further researches are needed to establish efficient protocols. A solution could be an increase of exposure time, a decrease of the temperature or the use of a chamber based on forced convection.

Whole-body cryotherapy is a recent technology. Technical progress in years to come may facilitate a wider use, in particular in equine medicine.

KEYWORDS:

WHOLE-BODY CRYOTHERAPY, CRYOSTIMULATION, HUMAN, HORSE, RECOVERY, COLD, PHYSIOTHERAPY

JURY:

Chairperson: Pr Céline ROBERT

Thesis Director: : Pr Fabrice AUDIGIÉ

Reviewer : Dr Céline MESPOULHÈS-RIVIÈRE

Guest: Dr Claire MOIROUD