



Modélisation mathématique de la réponse thermique cutanée en cryothérapie corps entier (CCE) : une étude pilote

Mathematical modeling of skin thermal response in whole-body cryotherapy (WBC): A pilot study

Georges Noël Pichard^a
Hervé Quinart^a
Anthony Marreiro^{b,c}
Fabien Beaumont^c
Guillaume Polidori^c
Redha Taïar^c

^aIFMK, 51100 Reims, France

^bCentre de cryothérapie rémois, 51430 Bezannes, France

^cURCA/GRESPI, Moulin de la Housse, 51100 Reims, France

Reçu le 16 septembre 2016 ; reçu sous la forme révisée le 7 mars 2017 ; accepté le 8 mars 2017

RÉSUMÉ

Cet article pose les bases d'une modélisation théorique visant à déterminer une loi d'évolution de la température cutanée d'un sujet, au cours d'une séance de cryothérapie en corps entier (CCE). L'étude se focalise sur les quelques minutes pendant lesquelles le corps humain est soumis à un choc thermique. À notre connaissance, aucune donnée n'est documentée dans la littérature sur la température de la peau pendant la phase de refroidissement. La validation de cette démarche scientifique ouvre une voie large à des études de plus grande ampleur dans le but de proposer des protocoles de cryothérapie pouvant être à la fois individualisés mais également destinés à des populations cibles.

Niveau de preuve. – Non adapté.

© 2017 Elsevier Masson SAS. Tous droits réservés.

SUMMARY

This article lays out the basics of a theoretical model intended to determine the pattern of skin temperature change during a session of whole-body cryotherapy (WBC). The study focuses on the few minutes during which the human body is subject to thermal shock. To the best of our knowledge, no data on skin temperature during the cooling phase are documented in literature. The validation of this scientific approach opens many avenues for larger-scale studies with the aim of proposing personalized cryotherapy protocols and protocols intended for target populations.

Level of evidence. – NA.

© 2017 Elsevier Masson SAS. All rights reserved.

INTRODUCTION

La cryothérapie en corps entier (CCE) a fait son apparition dans les pays de l'Est et au Japon et prolonge des habitudes culturelles

dans les pays froids. D'abord représentée par des immersions froides plutôt traditionnelles, on lui prêtait des effets bénéfiques sur la santé. Depuis 1980, les vertus d'une brève exposition complète du corps au froid intense intéressent plusieurs champs pathologiques

MOTS CLÉS

Comportement
Cryothérapie
Modélisation mathématique
Physiothérapie

KEYWORDS

Human behavior
Cryotherapy
Mathematical modeling
Physiotherapy

Auteur correspondant :

R. Taïar,
URCA/GRESPI, Moulin de la
Housse, Reims, France.
Adresse e-mail :
redha.taïar@univ-reims.fr

de l'appareil locomoteur : la rhumatologie, la traumatologie, la neurologie, la récupération musculaire [1–4]. La différence entre les deux procédés existant de cryothérapie (corps entier et corps partiel) réside dans la stimulation du système nerveux sympathique pendant la séance et parasympathique directement après la séance. C'est cette stimulation qui va permettre d'installer un choc physiologique, base des effets positifs de la CCE [5,6]. On constate également une différence importante d'homogénéité de la température cutanée en fonction de la zone du corps dans le cas d'une séance avec un appareil en cryothérapie partiel [5].

Il est naturel que les kinésithérapeutes s'y intéressent. Les chambres cryogéniques en corps entier [5] ont montré leur intérêt sur la douleur [7,8], l'inflammation [9–11], la mobilité articulaire [12,13], la récupération musculaire [14,15] et la complémentarité avec la kinésithérapie [13,16].

La durée des protocoles utilisés varie de 120 s à 240 s en fonction des études [10,17–19]. Or, celle-ci influe significativement sur certains résultats. Il existe une corrélation entre la durée du protocole et la diminution de la température cutanée [20]. Cette diminution est à l'origine du choc thermique et de la stimulation du système nerveux autonome [5,6]. Cette stimulation va influencer positivement sur l'activité lysosomale, permettant ainsi d'éliminer les déchets plus efficacement (récupération musculaire) [21].

Elle va également stimuler les nocicepteurs, influençant ainsi la vitesse de conduction nerveuse, jouant un rôle majeur sur l'antalgie [22–24]. La température centrale quant à elle ne varie pas significativement. Une séance de 3 minutes va également augmenter l'hypoxie qui peut s'avérer intéressant sur les paramètres de l'entraînement [20]. L'activité des messagers de l'inflammation peut être modifiée positivement ou négativement en fonction du protocole utilisé et de la population ciblée mais cette affirmation mérite d'être étayée [10,11,20]. Enfin, la libération de béta-endorphine, jouant un rôle sur l'antalgie et l'anxiété, apparaît dès la stimulation du système nerveux parasympathique et ne semble pas être affecté par l'appareil utilisé [25,26]. La plus grande partie des études sont faites dans le milieu du sport de haut niveau avec des études sur le rugby [27,28], le jiu-jitsu [29], la natation synchronisée [30], le kayak [31,32] ou encore le tennis [32], ce qui a tendance à standardiser les populations testées autour d'un morphotype athlétique.

La résistance à la pénétration du froid ou la baisse de température est largement dépendante de la masse et de la composition corporelle et son évaluation est difficile dans les chambres cryogéniques [33,34].

Les vertus prêtées à la CCE dans la réduction de la douleur notamment rhumatismale et chronique [22,35,36] intéresseraient une partie importante de la patientèle des kinésithérapeutes. Mais celle-ci est plutôt caractérisée par la sédentarité que par l'activité physique. Afin de s'adapter au mieux à la grande variation des morphotypes d'une population qui dépasserait le monde du sport pour démocratiser, élargir et optimiser la technique il est indispensable de trouver un paramètre d'ajustement qui permette d'en cibler au mieux les modalités d'application pour chaque patient [33,34,37].

Se livrer à de multiples études couvrant tous les morphotypes (masse maigre/masse grasse) représente un travail considérable. La kinésithérapie souffre encore du peu de preuves scientifiques qui valident ses techniques et ses démarches qui sont qualifiées d'empiriques.

On peut par exemple se référer à un parallèle avec la météorologie qui après s'être appuyée essentiellement sur une

expérience empirique pour faire la synthèse d'un nombre croissant de variables (lieu, dates, milieu, géographie, etc.) a trouvé son essor grâce à des modèles mathématiques prédictifs.

La construction d'un modèle théorique mathématique permettant d'intégrer les variations de masse corporelles est-elle envisageable ? Si tel est le cas les kinésithérapeutes disposeraient d'un outil optimisé s'appuyant sur des bases scientifiques. Cet exemple d'apport des sciences exactes pourrait familiariser les kinésithérapeutes avec l'idée du bénéfice à tirer l'approche de recherche associant la clinique et les mathématiques ou la physique.

La présente étude a pour but d'établir les bases d'une modélisation mathématique en vue de proposer un modèle numérique original à des fins d'établissement de protocoles en cryothérapie. L'avantage d'une modélisation mathématique est qu'elle permet d'éviter la multiplication d'expérimentations. Ce faisant, une fois sa validation garantie sur un cas particulier, la modélisation peut s'étendre aisément à des populations autres que celle à laquelle appartient le sujet d'étude initial, comme par exemple des femmes, des sédentaires, etc. Les seuls paramètres qui varieront seront des constantes de temps thermiques dépendantes des résistances thermiques du corps de ces populations. Ces constantes, que l'on retrouve dans tout type de système thermique (le corps humain en est un puisqu'il obéit à des lois d'équilibre thermique entre production et déperditions de chaleur), peuvent se calculer à partir des lois usuelles de bio-transfert de chaleur sur la base de la connaissance de l'IMG (Indice de Masse Grasse) des populations et des propriétés thermo-physiques des tissus adipeux. Mais plus encore, ces protocoles de cryothérapie devraient fournir au thérapeute une information *a priori* sur la manière dont évolue la température cutanée d'une zone privilégiée du corps qu'ils souhaitent soigner. Outre le fait que la peau soit le plus grand organe du corps humain, elle possède la particularité d'être l'interface entre l'environnement extérieur et l'intérieur du corps. La connaissance de sa température est alors en lien direct avec celle des tissus adjacents [34] et doit permettre au thérapeute d'affiner son protocole de soins.

MATÉRIELS ET MÉTHODES

Même si l'étude est à dominante théorique, elle nécessite néanmoins un apport expérimental dans le but de fournir les conditions aux limites les plus réalistes du problème traité. La thermographie infrarouge, qui a été utilisée à ces fins, est une méthode d'analyse non intrusive permettant, en médecine, l'acquisition de cartographies de températures cutanées tant à l'échelle microscopique qu'à celle macroscopique [33,38]. Ce faisant, les données que peuvent fournir les thermographies et leur post-traitement pourront s'implanter dans le code numérique multi-échelle développé et focaliser l'attention du thérapeute sur des zones d'étendues variables (Fig. 1) du système musculo-squelettique.

La thermographie infrarouge est basée sur l'observation d'une cartographie thermique à la surface du spécimen scruté. En effet, tout corps ou objet émet naturellement, et en continu, un rayonnement infrarouge proportionnel à sa température. La quantité d'énergie émise par rayonnement infrarouge dépend ainsi des effets thermiques (déperditions surfaciques globales et/ou locales), engendrés par la séance de cryothérapie.

Protocole expérimental

Un étalonnage précis a été réalisé sur site, permettant un paramétrage adaptatif aux conditions réelles. Pour ce faire, il est nécessaire de renseigner l'émissivité du matériau à visualiser, la température apparente réfléchie du matériau, et la distance à laquelle est réalisée la prise de vues. Lors d'une mesure de température, la caméra infrarouge cible une zone plus ou moins large dans une zone de mesure qui peut comporter plusieurs types de matériau. C'est pourquoi nous avons corrigé le thermogramme obtenu en associant à chaque matériau son émissivité propre et en particulier l'émissivité de la peau ($\epsilon = 0,98$), ce qui nous permet d'obtenir des résultats conformes à la réalité [38]. La caméra que nous avons utilisée (CEDIP Titanium) se compose d'une matrice de 640×512 détecteurs InSb (rendement quantique $> 70\%$), avec une réponse spectrale de $1,5 \mu\text{m}$ à $5 \mu\text{m}$). Cette caméra, grâce au temps d'intégration variable de $3 \mu\text{s}$ à 1ms , permet de réaliser des mesures allant typiquement de -20°C à 3000°C à une cadence allant jusqu'à 100 images/s en mode pleine image. Dans notre étude, le temps d'intégration était de 1 ms pour un échantillonnage de 100 images. La caméra, située hors de la chambre de cryothérapie (optiques et électronique ne supporteraient des températures aussi basses), est pilotée via une interface qui permet de paramétrer l'acquisition des images thermiques (choix du répertoire cible, nom de fichier, nombre d'images ou durée de l'enregistrement, choix de la gamme de température, de l'émissivité, inclusion de points de mesures...). Le post-traitement des résultats est réalisé via une interface de traitement de données qui permet une discrimination appropriée des phénomènes thermiques à détecter. Le logiciel de post-traitement FLIR® Quick report [39], couplé à la caméra, permet d'obtenir de manière indirecte une cartographie bidimensionnelle et instantanée du champ de température observé. Les données ainsi obtenues permettent un suivi temporel de l'évolution thermique d'une zone ou d'un point et ainsi de réaliser une analyse statistique des mesures effectuées [39].

Les données expérimentales obtenues permettent d'alimenter la formulation semi-analytique des modes de transferts de chaleur globaux. En effet, celles-ci provenant d'une séance de cryothérapie d'une durée de 3 minutes à une ambiance de -110°C alimentent une partie des équations de bilan

(continuité, quantité de mouvement, énergie) et de transferts radiatifs [40]. Le sujet étudié (25 ans, 1 m 86, 75 kg, IMG 9 %) a suivi tout le protocole usuel qui fait référence au déroulement standard [38] d'une séance de cryothérapie corps entier (précautions d'usage, équipements de protection individuels, durée de la séance). Une séance se déroule de la façon suivante : avant le traitement, les patients doivent revêtir un maillot de bain, des chaussettes en coton chaudes et des gants, ainsi qu'une protection pour la tête et un masque médical. Les patients entrent tout d'abord dans la chambre préliminaire (-60°C), puis une fois le temps requis écoulé, dans la chambre principale (-110°C) dans laquelle ils séjournent de 2 à 4 minutes.

Les images thermiques déduites, acquises toutes les 30 secondes de la durée de la séance, ont permis de quantifier l'évolution temporelle de ses propres déperditions face à un froid extrême, pouvant être mesurées localement ou à l'échelle du corps entier, selon la nature des informations désirées. La reproductibilité des cartographies thermiques a été vérifiée sur la base de 5 expériences identiques, réalisées à un jour d'intervalle.

Simulation numérique par code CFD

La mécanique des fluides numérique ou *computational fluid dynamics* (CFD) consiste à résoudre dans une géométrie donnée les équations fondamentales de la mécanique des fluides, que l'on peut éventuellement coupler aux équations de transfert thermique. La procédure numérique nécessite la réalisation d'un modèle 3D du sujet étudié, la sélection des modèles physiques pertinents, des conditions aux frontières (conditions aux limites) ainsi que la discrétisation du domaine de calcul (maillage). Notre étude numérique simule un être humain se tenant debout au centre d'une chambre de cryothérapie corps entier et exposé à un air froid et sec de température -110°C . La procédure numérique consiste en premier lieu à scanner le sujet de l'étude (Fig. 2a) au moyen d'un scanner portable 3D ARTEC® EVA, puis à définir le domaine du calcul qui aura les dimensions de la chambre de cryothérapie. La procédure consiste à tourner autour de la personne à scanner en portant l'appareil, ce dernier utilise le principe de la déformation d'une lumière projetée qui permet ainsi de calculer la distance, et donc la position des points du corps.

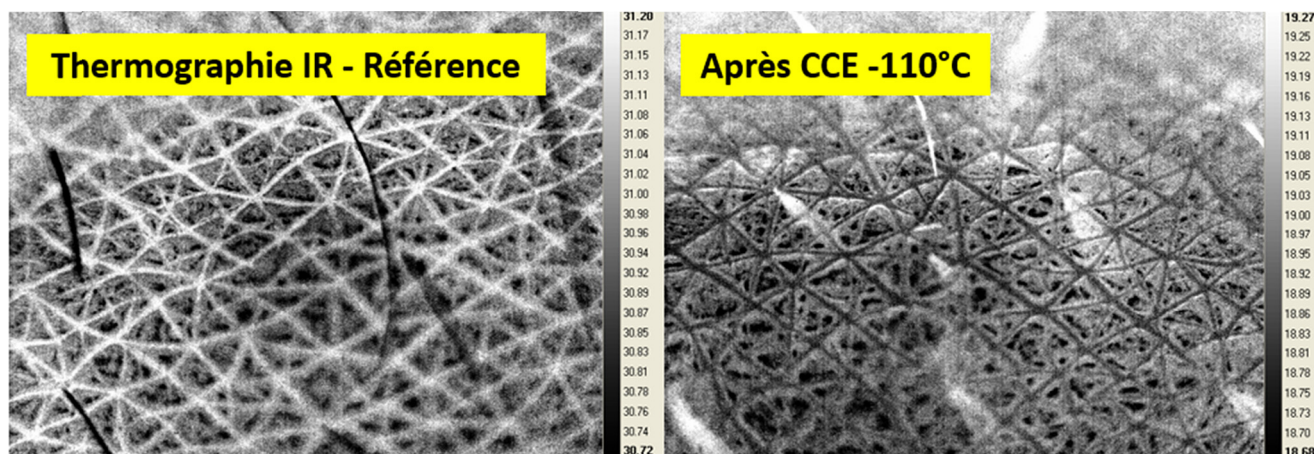


Figure 1. Exemples de thermographies microscopiques du derme de l'avant-bras (caméra Flir SC1000®).

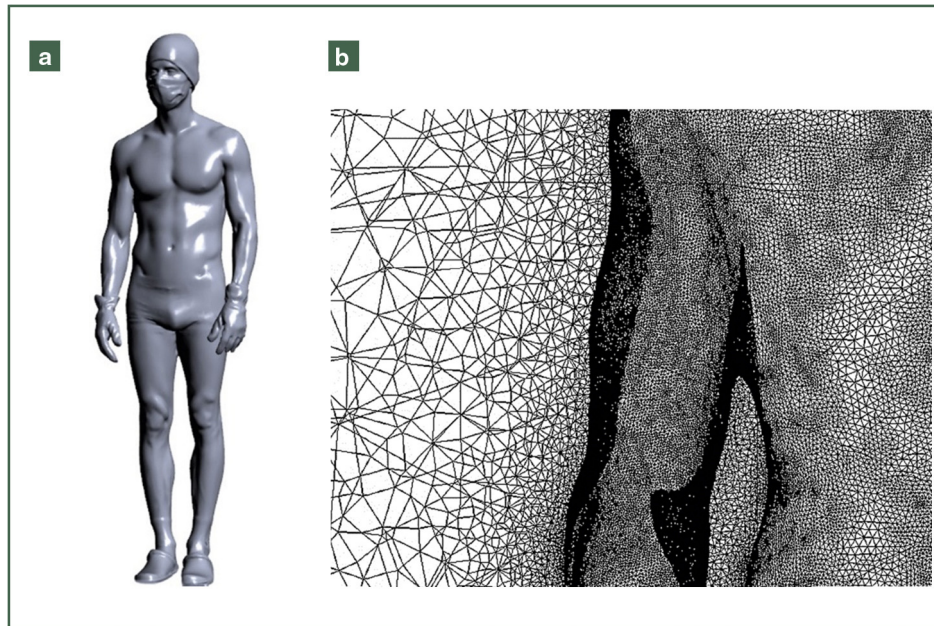


Figure 2. Scan du sujet (a) et détail du maillage hybride surfacique/volumique (b).

Maillage

Le maillage du domaine de calcul a été effectué avec le logiciel ANSYS Workbench Meshing® qui permet de réaliser des maillages surfaciques et/ou volumiques structurés ou non. Deux maillages seront réalisés comme le montre la Fig. 2b. Le premier concerne le scan du sujet étudié et est dit surfacique. Ce maillage est directement appliqué sur la surface du mannequin. Il permet d'obtenir aux nœuds de chaque maille la température cutanée du sujet à chaque pas de temps de calcul. Le second concerne l'environnement du sujet et est dit volumique. Ce maillage tétraédrique auto-adaptatif est utilisé pour modéliser la température au sein de la chambre de cryothérapie. En tout, de l'ordre de 15 millions de mailles (donc de points de calcul) sont nécessaires à chaque pas de temps utilisé.

Méthode numérique

Le code de calcul commercial Fluent® 17.2, code de mécanique des fluides traitant les transferts de chaleur convectif, a été utilisé pour la modélisation de la répartition de la température cutanée à la surface du corps et dans le fluide environnant [41,42]. Ce code de calcul est basé sur la méthode des volumes finis qui permet la résolution du système d'équations qui régissent l'écoulement du fluide. Dans notre étude, le problème à résoudre est tridimensionnel, dépendant du temps et non isotherme. En raison de la différence de température entre le corps humain (entre 8 et 31 °C) et le fluide environnant (l'air stagnant à -110 °C), l'écoulement d'air à proximité du corps est considéré comme un flux de convection naturelle. L'effet du rayonnement est pris en compte à l'aide du modèle de rayonnement S2S. La couche limite thermique ainsi que le flux d'air autour du corps humain sont considérés comme totalement turbulents. Dans cette étude, le modèle de turbulence k- ω a été choisi pour la fermeture des équations moyennées de Reynolds Navier-Stokes.

La mise en place d'un outil d'analyse prédictif passe par une phase de développement qui s'appuie sur l'application à un cas test des lois d'évolution déterminées de manière empirique (évolution temporelle des déperditions thermiques). Puis les résultats, basés sur l'utilisation de calculs itératifs composant l'outil d'estimation, serviront de validation du procédé algorithmique. Ensuite, le modèle sera affiné afin d'atteindre l'objectif visé, à savoir l'établissement de protocoles en cryothérapie adressés à des populations cibles.

Conditions aux limites

Dans ce problème, impliquant une grande différence de température entre le corps humain et son environnement, la température de surface de la peau et le flux de chaleur du corps humain évoluent en fonction du temps, c'est pourquoi nous avons réalisé un calcul instationnaire. En utilisant un mode de transfert de chaleur couplé entre rayonnement (chaleur rayonnée du corps humain vers les parois froides de la chambre) et convection naturelle (l'écart de température entre la peau et l'air environnant génère une variation de masse volumique de l'air qui va générer un panache thermique), on est en mesure de déterminer l'expression semi-analytique des déperditions thermiques corporelles au cours d'une séance de cryothérapie. Ces déperditions, évoluant en fonction du temps et exprimées en Watt par unité de surface (W/m^2) sont régies par la loi :

$$\varphi(W/m^2) = h_c \left(T_0 \left[\left(1 - e^{-\frac{t}{\tau_1}} \right) + e^{-\frac{t}{\tau_2}} \right] - T_\alpha \right) + \sigma \epsilon \left(T_0^4 \left[\left(1 - e^{-\frac{t}{\tau_1}} \right) + e^{-\frac{t}{\tau_2}} \right]^4 - T_\alpha^4 \right)$$

où ω est la densité surfacique de flux de chaleur de la zone étudiée, h_c est le coefficient d'échange convectif, T_α est la température de l'environnement, T_0 la température initiale

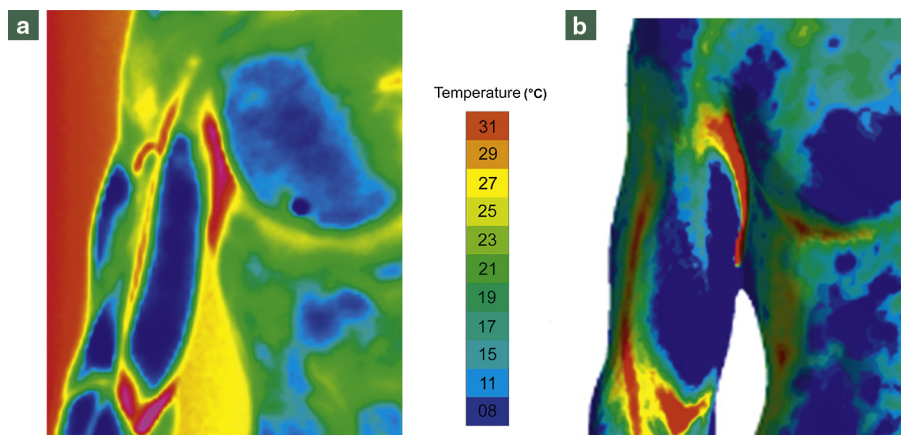


Figure 3. Focus sur le biceps : exemple de comparaison entre thermographie (a) et simulation numérique (b) après 1 min 30s de CCE à -110°C .

avant de pénétrer dans la chambre de cryothérapie, (est la constante de Boltzmann et (est l'émissivité de la peau. Cette formulation tient compte de l'apport de chaleur interne du corps par métabolisme et des pertes radiatives et convectives par thermolyse, à travers l'expression de constantes de temps thermiques τ_1 et τ_2 déterminées expérimentalement qui permettent d'intégrer les variations de masse corporelles. Une fois calculées les déperditions surfaciques globales et/ou locales, ces dernières sont implémentées comme conditions aux limites thermiques instationnaires appliquées sur la surface considérée.

RÉSULTATS

À titre d'illustration de ce que le modèle permet à ce jour, nous avons choisi de représenter sur la Fig. 3, d'une part, une

thermographie d'une partie du tronc et biceps droit du sujet (Fig. 3a) et, d'autre part, le résultat numérique issu de la modélisation mathématique de la même zone (Fig. 3b), après 1 min et 30 s de CCE à -110°C . Au cours du post-traitement, nous avons déterminé la température moyenne adimensionnée de la peau T_s/T_0 au cours du temps et comparé ces résultats avec les résultats de nos simulations numériques (Fig. 4). T_s représente la température de la peau moyennée sur la surface d'étude (en $^{\circ}\text{C}$ ou K).

La fidélité du modèle théorique est estimée en vérifiant que les résultats numériques se situent bien dans la marge d'erreur des résultats expérimentaux. La comparaison des résultats montre que la démarche retenue est parfaitement adaptée à l'objectif initialement visé, à savoir la réalisation de protocoles théoriques de cryothérapie basés sur des critères scientifiquement objectifs. Le modèle reste néanmoins en cours d'affinement, notamment sur les temps de calcul.

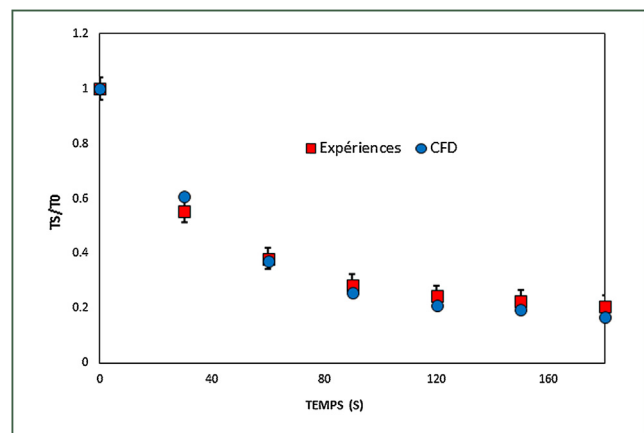


Figure 4. Évolution au cours du temps de la température cutanée au niveau du biceps (la zone de mesure est mise en évidence sur la Fig. 3), comparaison des résultats expérimentaux avec les simulations numériques obtenues par méthode CFD (*computational fluid dynamics*). T_s est la température de la peau moyennée sur la surface d'étude (en $^{\circ}\text{C}$ ou K), et T_0 , la température initiale, avant de pénétrer dans la chambre de cryothérapie.

DISCUSSION – CONCLUSION

La cryothérapie corps entier apparaît de plus en plus dans le domaine médical et paramédical comme une thérapie complémentaire permettant de soulager bon nombre de pathologies. Dans le domaine sportif, cette technique apparaît de plus en plus comme incontournable dans la récupération. À ce jour, les protocoles cryothérapeutiques utilisés restent empiriques, voire subjectifs. Dans le contexte actuel de nécessité de pratiques fondées sur les preuves, les techniques en kinésithérapie ne doivent pas se priver de ce soutien scientifique qui ne les rendra que plus efficaces.

Ce travail présente les fondements d'une démarche scientifique théorique permettant de proposer aux kinésithérapeutes s'intéressant à la CCE un outil prédictif du comportement au froid extrême d'une population ciblée, sur la base de cartographies numériques de température cutanée. L'objectif à terme est de permettre d'obtenir des cartographies prédictives complètes des températures cutanées ainsi qu'une cinétique de refroidissement surfacique qui diffère d'une zone corporelle à une autre, le corps humain étant un milieu thermiquement hétérogène.

Dans ce but, nous avons utilisé des approches expérimentales pour la validation et la définition des conditions aux limites des approches analytique et numérique. La première étape de la démarche montre que les résultats numériques sont en adéquation avec le but recherché qui est de prédire une température cutanée à partir de lois d'évolutions théoriques. Une étude paramétrique statistique d'une population ciblée sera prochainement dédiée à l'étude de la robustesse de ce modèle qui demeure à ce jour perfectible sur le temps CPU de calcul, nécessitant divers affinements successifs en cours d'étude.

Déclaration de liens d'intérêts

Les auteurs déclarent ne pas avoir de liens d'intérêts.

RÉFÉRENCES

- [1] Fricke R. Ganzkörperkältetherapie in einer kältekammer mit temperaturen um -110°C . *Z Phys Med Baln Med Klin* 1989;18:1–10.
- [2] Metzger D, Zwingmann C, Protz W, Jackel WH. Whole-body cryotherapy in rehabilitation of patients with rheumatoid diseases: pilot study. *Rehabilitation* 2000;39:93–100.
- [3] Yamauchi T. Whole-body cryotherapy is a method of extreme cold -175°C treatment initially used for rheumatoid arthritis. *Z Phys Med Baln Med Klin* 1989;15:311.
- [4] Mesure S, Catherin-Marcel B, Bertrand D. La cryothérapie corps entier : littérature et perspectives de recherche. *Kinesither Rev* 2014;14:56–60.
- [5] Hausswirth C, Schaal K, Le Meur Y, Bieuzen F, Filliard JR, Volondat M, et al. Parasympathetic activity and blood catecholamine responses following a single partial-body cryostimulation and a whole-body cryostimulation. *PLoS ONE* 2013;8:e27658.
- [6] Louis J, Schaal K, Bieuzen F, Le Meur Y, Filliard JR, Volondat M, et al. Head exposure to cold during whole-body cryostimulation: influence on thermal response autonomic modulation. *PLoS ONE* 2015;10:e0124776.
- [7] Thomas DA, Maslin B, Legler A, Springer E, Asgerally A, Vadivelu N. Role of alternative therapies for chronic pain syndromes. *Curr Pain Headache Rep* 2016;20:29.
- [8] Giemza C, Matczak-Giemza M, De Nardi M, Ostrowska B, Czech P. Effect of frequent WBC treatments on the back pain therapy in elderly men. *Aging Male* 2015;18:135–42.
- [9] Banfi G, Melegati G, Barassi A, Dogliotti G, Melzi d'Eril G, et al. Effects of whole-body cryotherapy on serum mediators of inflammation and serum muscle enzymes in athletes. *J Therm Biol* 2009;34:55–9.
- [10] Stanek A, Cieslar G, Strzelczyk J, Kasperczyk S, Sieroń-Stoltny K, Wiczowski A, et al. Influence of cryogenic temperatures on inflammatory markers in patients with ankylosing spondylitis. *Polish J Environ Stud* 2010;19:167–75.
- [11] Lubkowska A, Szygula Z, Chlubek D, Banfi G. The effect of prolonged whole-body cryostimulation treatment with different amounts of sessions on chosen pro- and anti-inflammatory cytokines levels in healthy men. *Scand J Clin Lab Invest* 2011;71: 419–25.
- [12] Stanek A, Sieroń A, Cieślak G, Matyszkiewicz B, Rozmus-Kuczia I. The impact of whole-body cryotherapy on parameters of spinal mobility in patients with ankylosing spondylitis. *Ortopedia, Traumatologia. Rehabilitacja* 2005;7:549–54.
- [13] Książkowska-Orłowska K, Pacholec A, Jędryka-Góral A, Bugajska J, Sadura-Sieklucka T, Kowalik K, et al. Complex rehabilitation and the clinical condition of working rheumatoid arthritis patients: does cryotherapy always overtop traditional rehabilitation? *Disabil Rehabil* 2016;38:1034–40.
- [14] Hausswirth C, Louis J, Bieuzen F, Pournot H, Fournier J, Filliard JR, et al. Effects of whole-body cryotherapy vs far-infrared vs. passive modalities on recovery from exercise-induced muscle damage in highly-trained runners. *PLoS ONE* 2011;6:e27749.
- [15] Pournot H, Bieuzen F, Louis J, Mounier R, Fillard JR, Barbiche E, et al. Time-course of changes in inflammatory response after whole-body cryotherapy multi exposures following severe exercise. *PLoS ONE* 2011;6:e22748.
- [16] Gizińska M, Rutkowski R, Romanowski W, Lewandowski J, Straburzyńska-Lupa A. Effects of whole-body cryotherapy in comparison with other physical modalities used with kinesiotherapy in rheumatoid arthritis. *Bio Med Res Int* 2015;2015:409174.
- [17] Burke DG, Macneil SA, Holt LE, Mackinnon NC, Rasmussen RL. The effect of hot or cold water immersion on isometric strength training. *J Strength Cond Res* 2000;14:21–5.
- [18] Fonda B, De Nardi M, Sarabon N. Effects of whole-body cryotherapy duration on thermal and cardio-vascular response. *J Ther Biol* 2014;42:52–5.
- [19] Romanowski MW, Romanowski W, Keczer P, Majchrzycki M, Samborski W, Straburzyńska-Lupa A. Whole body cryotherapy in rehabilitation of patients with ankylosing spondylitis. A randomised controlled study. *Physiotherapy* 2015;101:e1294.
- [20] Selfe J, Alexander J, Costello JT, May K, Garratt N, Atkins S, et al. The effect of three different (-135°C) whole body cryotherapy exposure durations on elite rugby league players. *PLoS ONE* 2014;9:e86420.
- [21] Wozniak A, Wozniak B, Drewa G, Mila-Kierzenkowska C. The effect of whole-body cryostimulation on the prooxidant-antioxidant balance in blood of elite kayakers after training. *Eur J Appl Physiol* 2007;101:533–7.
- [22] Savalli L, Olave P, Hernandez Sendin MI, Laboute E, Trouvé P, Puig PL. Cryothérapie corps entiers à -110°C . Mesure des températures cutanée et centrale chez le sportif. *Sci Sports* 2006;21:36–8.
- [23] Westerlund T, Oksa J, Smolander J, Mikkelsen M. Thermal responses during and after whole-body cryotherapy (-110°C). *J Ther Biol* 2003;28:601–8.
- [24] Ciolek JJ. Cryotherapy. Review of physiological effects and clinical application. *Cleve Clin Q* 1985;52:193–201.
- [25] Leppälüoto J, Westerlund T, Huttunen P, Oksa J, Smolander J, Dugué B, et al. Effects of long-term whole-body cold exposures on plasma concentrations of ACTH, beta-endorphin, cortisol, catecholamines and cytokines in healthy females. *Scand J Clin Lab Invest* 2008;68:145–53.
- [26] Rymaszewska J, Ramsey D, Chłodzińska-Kiejna S. Whole-body cryotherapy as adjunct treatment of depressive and anxiety disorders. *Arch Immunol Ther Exp* 2008;56:63–8.
- [27] Galliera E, Dogliotti G, Melegati G, Corsi Romanelli MM, Cabitza P, Banfi G. Bone remodelling biomarkers after whole body cryotherapy (WBC) in elite rugby players. *Injury* 2013;44:1117–21.
- [28] Lombardi G, Colombini A, Porcelli S, Mauri C, Zani V, Bonomi FG, et al. Muscular damage and kidney function in rugby players after daily whole body cryostimulation. *Physiol J* 2014;1–7.
- [29] Pinho Júnior EA, Brito CJ, Costa Santos WO, Nardelli Valido C, Lacerda Mendes E, Franchini E. Influence of cryotherapy on muscle damage markers in jiu-jitsu fighters after competition: a cross-over study. *Revista Andaluza de Medicina del Deporte* 2014;7:7–12.



- [30] Schaal K, Le Meur Y, Louis J, Filliard JR, Hellard P, Casazza G, et al. Whole-body cryostimulation limits overreaching in elite synchronized swimmers. *Med Sci Sports Exerc* 2015;47:1416–25.
- [31] Woźniak A, Drewa G, Woźniak B, Drewa T, Mila-Kierzenkowska C, Czajkowski R, et al. Effect of cryogenic temperatures and exercise on lipid peroxidation in kayakers. *Biol Sport* 2005;22:247–60.
- [32] Ziemann E, Olek RA, Kujach S, Grzywacz T, Antosiewicz J, Garszka T, et al. Five-day whole-body cryostimulation, blood inflammatory markers, and performance in high-ranking professional tennis players. *J Athl Train* 2012;47:664–72.
- [33] Dębiec-Bąk A, Gruszka K, Sobiech KA, Skrzek A. Age dependence of thermal imaging analysis of body surface temperature in women after cryostimulation. *Hum Mov* 2014;14:299–304.
- [34] Jutte LS, Merrick MA, Ingersoll CD, Edwards JE. The relationship between intramuscular temperature, skin temperature, and adipose thickness during cryotherapy and rewarming. *Arch Phys Med Rehabil* 2001;82:845–50.
- [35] Hirvonen HE, Mikkelsen MK, Kautiainen H, Pohjolainen TH, Leirisalo-Repo M. Effectiveness of different cryotherapies on pain and disease activity in active rheumatoid arthritis. A randomised single blinded controlled trial. *Clin Exp Rheumatol* 2006;24:295–301.
- [36] Stanek A, Cholewka A, Gadula J, Drzazga Z, Sieron A, Sieron-Stoltny K. Can whole-body cryotherapy with subsequent kinesiotherapy procedures in closed type cryogenic chamber improve basdai, basfi, and some spine mobility parameters and decrease pain intensity in patients with ankylosing spondylitis? *BioMed Res Int* 2015;2015:1–12.
- [37] Nelson LD, Guskiewicz KM, Barr WB, Hammeke TA, Randolph C, Ahn KW, et al. Age differences in recovery after sport-related concussion: a comparison of high school and collegiate athletes. *J Athl Train* 2016;51:142–52.
- [38] Costello JT, McInerney CD, Bleakley CM, Selfe J, Donnelly AE. The use of thermal imaging in assessing skin temperature following cryotherapy: a review. *J Ther Biol* 2012;37:103–10.
- [39] Zaïdi H, Taïar R, Fohanno S, Polidori G. The influence of swimming type on the skin-temperature maps of a competitive swimmer from infrared thermography. *Acta Bioeng Biomech* 2007;9:47–51.
- [40] Liu Y, Liu Z, Luo J. Numerical investigation of the unsteady thermal plume around human body in closed space. *Proc Eng* 2015;121:1919–26.
- [41] Hemmer C, Convert F, Popa C, Polidori G. 3-D simulations of indoor airflow and temperature field with a radiative and convective heater. *Applied Fluid Mechanics* 2016;9:189–95.
- [42] Beaumont F, Popa C, Belair GL, Polidori G. Numerical modeling of bubble-induced flow patterns in champagne glasses. *Int J Num Methods Heat Fluid Flow* 2014;24:563–78.