



Disponible en ligne sur

**ScienceDirect**  
www.sciencedirect.com

Elsevier Masson France

**EM|consulte**  
www.em-consulte.com



## NOTE BRÈVE

# Note sur la possibilité de modéliser analytiquement la température cutanée en cryothérapie corps entier (CCE)



## *Modelling of the skin temperature of whole-body cryotherapy*

A. Marreiro<sup>a,b</sup>, J.R. Filliard<sup>c</sup>, H. Pron<sup>b</sup>, F. Beaumont<sup>b</sup>,  
G. Polidori<sup>b</sup>, R. Taïar<sup>b,\*</sup>

<sup>a</sup> Pôle de cryothérapie rémois, 2, rue Jules-Méline, 51430 Bezannes, France

<sup>b</sup> GRESPI, université de Reims, moulin de la Housse, 51687 Reims cedex 2, France

<sup>c</sup> Institut national du sport, de l'expertise et de la performance, 11, avenue du Tremblay, 75012 Paris, France

Reçu le 16 novembre 2016 ; accepté le 28 juin 2017

Disponible sur Internet le 18 août 2017

### MOTS CLÉS

Cryothérapie corps entier ;  
Thermographie infrarouge ;  
Modélisation

### Résumé

**Objectifs.** – Poser 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. La validation de la démarche scientifique mise en place et l'obtention d'une loi d'évolution thermique temporelle sur la température cutanée au cours du choc thermique ouvre une voie large à une modélisation numérique de grande ampleur.

**Méthodes.** – L'étude s'est déroulée dans une préchambre de cryothérapie à  $-60^{\circ}\text{C}$ , sur une durée de trois minutes. Un sujet sportif masculin (1,75 m, 67 kg, IMG 11 %) a participé à cette étude de faisabilité. L'analyse des résultats montre que le corps humain, qui est considéré comme un système thermique complexe, est régi au cours d'un choc thermique par un ensemble de constantes de temps, pouvant être considérées comme des valeurs propres à chaque individu. Les lois de comportement obtenues seront utilisées comme conditions aux limites thermiques et implémentées dans un code numérique 3D convectif. L'ambition étant de permettre de donner en tout point du corps humain et à un instant désiré sa température cutanée, l'objectif à terme est la mise en place de protocoles de cryothérapie personnalisés.

© 2017 Elsevier Masson SAS. Tous droits réservés.

\* Auteur correspondant.

Adresse e-mail : [redha.taïar@univ-reims.fr](mailto:redha.taïar@univ-reims.fr) (R. Taïar).

**KEYWORDS**

Whole-body  
cryotherapy;  
Infrared  
Thermography;  
Modélisation

**Summary**

*Aims.* – This article lays out the basics of a theoretical modelling to obtain the constitutive law of the skin temperature for a subject during a session of whole-body cryotherapy. The validation of the scientific approach and the obtaining of temporal evolution of thermal laws on skin temperature during the thermal shock open a wide way to a large-scale numerical modelling.

*Methods.* – The study took place in a prechamber of cryotherapy at  $-60^{\circ}\text{C}$ , on duration of 3 minutes. A male sports subject (1.75 m, 67 kg, 11% BMI) participated in this feasibility study. The results showed that the human body considered here as a thermal complex system is governed during a thermal shock by time constants, being able to be considered as values appropriate to every individual. The obtained constitutive laws will serve as boundary thermal conditions to be implemented in a radiative-convective 3D numerical model. The ambition is to give the skin temperature in every location of the human body and at every time during the cooling process. The forward objective will be to facilitate the implementation of personalized protocols of cryotherapy.

© 2017 Elsevier Masson SAS. All rights reserved.

**1. Introduction**

La cryothérapie corps entier (CCE) est considérée comme un complément thérapeutique qui consiste à placer le corps humain dans une chambre hermétique, où la température varie entre  $-60$  et  $-180^{\circ}\text{C}$  pendant un court laps de temps. L'objectif est de stimuler le corps humain afin de provoquer des réflexes de lutte contre le froid. Cette température extrême provoque chez le bénéficiaire un choc thermique activant ainsi des réactions physiologiques et hormonales.

C'est principalement l'impact de la CCE qui régit les réactions du corps humain [1]. L'objectif de cette étude est ainsi de déterminer une loi d'évolution de la température cutanée par modélisation théorique.

**1.1. La température cutanée**

Une étude récente démontre l'importance du protocole choisi sur l'évolution de la température cutanée au cours d'une séance de cryothérapie [2]. Cette étude pose la question de l'optimisation des modalités, température et durée optimale des sessions de la CCE. Une réponse à ces questions conduit à bien appréhender, puis prédire la réponse cutanée de la température corporelle qui devient le paramètre clé du choc thermique (CT).

**1.2. Individualisation des protocoles**

D'autres auteurs [3] émettent l'hypothèse que la modélisation mathématique serait le moyen le plus adapté pour connaître l'influence d'une séance de CCE sur la réponse thermique du corps humain. Qui plus est, construire un modèle mathématique théorique permettra de poser les bases d'une simulation numérique.

**2. Démarche scientifique**

Les seules données de la littérature traitant des phases de refroidissement l'ont été par le biais de l'emploi de

capteurs thermiques directement disposés sur le sujet, en des endroits choisis [4]. Notre nouvelle approche vise à obtenir une loi temporelle d'évolution thermique surfacique et non locale généralisée à l'ensemble du corps humain.

Le processus biophysique de refroidissement de la température cutanée étant un processus continu, les critères mathématiques que nous avons retenus et permettant de valider ce postulat seront doubles : d'une part, il s'agira de vérifier la continuité des tangentes en tout point de la courbe expérimentale  $\left(\left.\frac{\partial T_s}{\partial t}\right|_{t-dt} \cong \left.\frac{\partial T_s}{\partial t}\right|_{t+dt}\right)$  et, d'autre part, de vérifier l'absence de points d'inflexion sur l'intervalle d'étude  $\left(\frac{\partial^2 T_s}{\partial t^2} < 0\right)$ .

Ainsi, la température cutanée est le seul paramètre qui, à ce niveau, permettra de remonter à la connaissance de la densité de flux surfacique  $\varphi_{\text{tot}}$ .

Le sujet est soumis à un transfert thermique bimodal, convectif et radiatif.

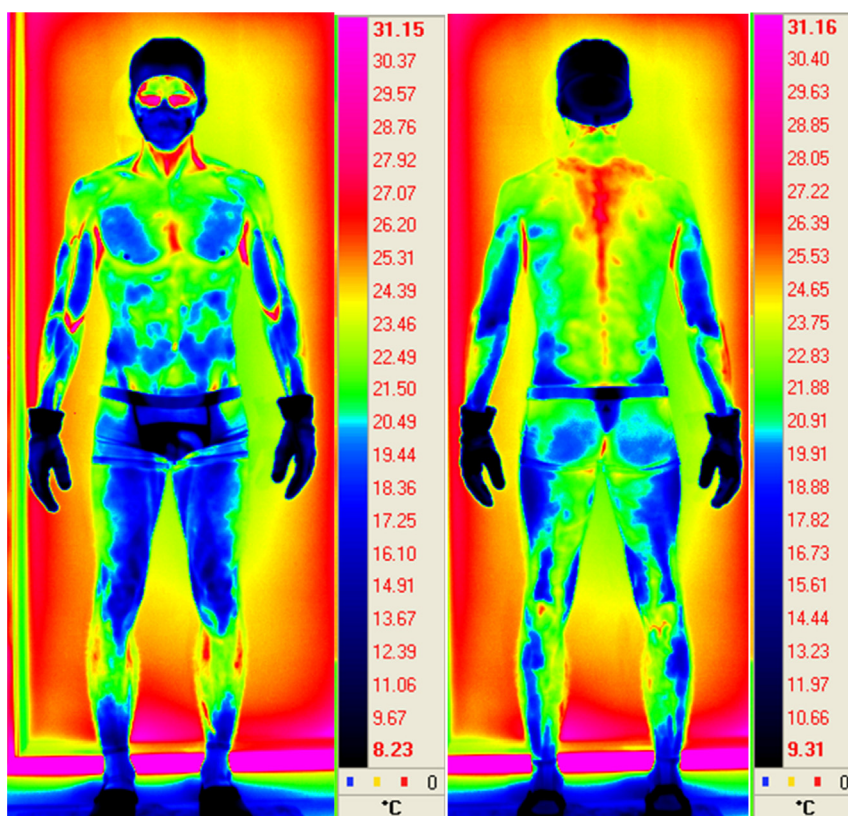
Sa déperdition de flux thermique total est alors la somme des densités des flux convectif et radiatif :

$$\Phi_{\text{tot}}(t) = \Phi_{\text{conv}}(t) + \Phi_{\text{rad}}(t) \quad (1)$$

Nous postulons que la loi de refroidissement de la température cutanée peut obéir à une somme d'exponentielles décroissantes temporelles, traduisant à la fois les déperditions thermiques par convection et rayonnement et l'apport de chaleur transféré à l'épiderme du sujet par le métabolisme propre du sujet :

$$\frac{T_s}{T_0} = \left[ \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau_1}}\right) + e^{-\frac{t}{\tau_2}} \right] \quad (2)$$

Où  $T_s$  est la température temporelle cutanée du champ local ou global étudié,  $T_0$  est la température de référence (avant séance de cryothérapie) du même champ d'étude. Par ailleurs,  $\left(1 - e^{-\frac{t}{\tau_1}}\right)$  traduit la production de chaleur interne par le métabolisme en atmosphère extrême et  $e^{-\frac{t}{\tau_2}}$  est relatif aux déperditions de chaleur convectoradiatives. La comparaison des constantes de temps  $\tau_{1,2}$  permettra d'établir une pondération de ces actions durant le choc



**Figure 1** Thermogramme obtenu par imagerie thermique infrarouge 90 s après le début de la séance de cryothérapie à  $-60^{\circ}\text{C}$ .

thermique. Cette constante de temps est dépendante de paramètres physiologiques propres à chaque individu et dont le principal paramètre devrait être l'indice de masse grasse (IMG) puisque les tissus adipeux agissent comme une résistance thermique au sein de l'organisme.

Le dépouillement et l'analyse des thermographies nous permettront alors de confirmer ou d'infirmer la validité de cette formulation théorique.

### 3. Matériels et méthodes

La séance de cryothérapie s'est déroulée dans une machine à air sec de marque Mecotec (Mannheim, Allemagne)<sup>®</sup>. Cette étude étant préliminaire, nous nous sommes volontairement limités au comportement thermique d'un seul sujet. L'objectif est de montrer la cohérence de notre approche, dans le but de l'étendre par la suite à un échantillonnage représentatif d'une population donnée. Le sujet retenu est un sportif masculin de 26 ans, de taille 1,75 m, de poids 67 kg et d'IMG 11 %.

#### 3.1. Démarche expérimentale

L'étude a eu lieu dans une préchambre de cryothérapie à  $-60^{\circ}\text{C}$ , sur une durée de 3 minutes. Pour s'assurer d'une bonne reproductibilité des manipulations, trois séries de mesures ont été réalisées à trois jours d'intervalle donnant une parfaite similarité thermique.

#### 3.2. Matériels et méthodes utilisées

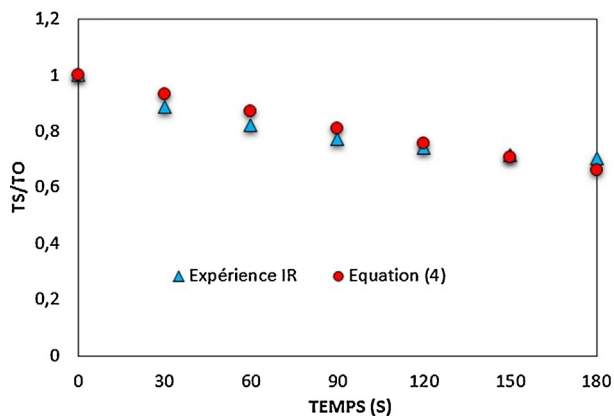
L'outil de mesure utilisé était une caméra Flir SC1000<sup>®</sup>. L'image thermique a été prise toutes les 30 s au cours de la séance de cryothérapie. Le sujet devait alors sortir de la chambre de cryothérapie pour prendre un cliché thermique. Le temps nécessaire à cette opération était cumulé aux 30 s suivantes afin de contrer la cinétique de réchauffement du corps lors du changement d'ambiance. Cette manipulation a été répétée jusqu'à atteindre les 3 minutes théoriques.

### 4. Résultats

La Fig. 1 représente un thermogramme du sujet à  $t = 1 \text{ min } 30 \text{ s}$  et permet de mettre en évidence le refroidissement de la peau et son caractère hétérogène.

Le post-traitement a permis d'obtenir l'évolution de la température moyenne de la peau (Fig. 2), comparée au modèle mathématique. On observe une concordance entre l'expérience et la modélisation. Ceci montre qu'il est possible de modéliser l'évolution des températures cutanées au cours d'une séance de CCE.

L'approche analytique permet, à la fois, de comprendre et de prévoir le comportement thermique de la peau mais également de modéliser la somme des deux fonctions de transfert de chaleur par convection et rayonnement lors d'une session de CCE. L'acquisition pseudocontinue de la température cutanée met en évidence une loi mathématique de type exponentielle décroissante faisant intervenir



**Figure 2** Évolution temporelle des températures cutanées expérimentale et théorique.

deux constantes de temps relatives respectivement aux processus métabolique et de thermolyse.

## 5. Discussion

La méthodologie adoptée dans cet article est commune à de nombreuses études d'ingénierie thermique dans lesquelles sont décrites des méthodes analytiques pour décrire l'évolution temporelle d'un flux de chaleur à partir de mesures de température. Polidori et al. [3] ont développé un modèle mathématique destiné à quantifier les pertes thermiques du corps humain en CCE. Dans cette étude appliquée à la CCE, le flux de chaleur dépensé par le corps humain au cours de la séance de cryothérapie est issu de la formulation analytique de la température cutanée. La connaissance de

ce paramètre est fondamentale car il constituera la condition à la limite thermique de la simulation numérique et dont l'évolution temporelle sera implémentée dans le code numérique.

## 6. Conclusion

La validation de la démarche scientifique et l'obtention d'une loi d'évolution temporelle de la température cutanée permettent d'envisager l'obtention de simulations mathématiques fiables en CCE. Par ailleurs, il est envisageable d'étendre l'étude numérique à des populations ciblées ayant des paramètres morphologiques statistiques. Le but final est la mise en place de protocoles de cryothérapie ciblés.

## Déclaration de liens d'intérêts

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

## Références

- [1] Adam J. Cryothérapie corps entier : histoire, concept et matériel. *Kinesithe Rev* 2014;14:41–4.
- [2] Costello J, Donnelly A, Karki A, Selfe J. Effects of whole body cryotherapy and cold water immersion on knee skin temperature. *Int J Sports Med* 2014;35:35–40.
- [3] Polidori G, Marreiro A, Pron H, Lestriez P, Boyer FC, Quinart H, et al. Theoretical modeling of time-dependent skin temperature and heat losses during whole-body cryotherapy: a pilot study. *Med Hypotheses* 2016;96:11–5.
- [4] Costello JT, Culligan K, Selfe J, Donnelly AE. Muscle, skin and core temperature after  $-110^{\circ}\text{C}$  cold air and  $8^{\circ}\text{C}$  water treatment. *Plos One* 2012;7(11):e48190.