



**HAL**  
open science

## Étude du transfert de chaleur au sein de tenues de protection de sapeurs-pompiers

A. Collin, Zoubir Acem, Jérémy Pageaux, Sébastien Pinson, Francis Magnolini, Hervé Charette

### ► To cite this version:

A. Collin, Zoubir Acem, Jérémy Pageaux, Sébastien Pinson, Francis Magnolini, et al.. Étude du transfert de chaleur au sein de tenues de protection de sapeurs-pompiers. CFM 2013 - 21ème Congrès Français de Mécanique, Aug 2013, Bordeaux, France. <hal-03441445>

**HAL Id: hal-03441445**

**<https://hal.science/hal-03441445v1>**

Submitted on 22 Nov 2021

**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.



HAL Authorization

# Étude du transfert de chaleur au sein de tenues de protection de sapeurs-pompiers

A. Collin<sup>a</sup>, Z. Acem<sup>a</sup>, S. Pinson<sup>a</sup>, J. Pageaux<sup>a</sup>, F. Magnolini<sup>b</sup>, H. Charette<sup>b</sup>

a. LEMTA, Université de Lorraine, CNRS, UMR 7563, Vandoeuvre-lès-Nancy

b. Service Départemental d'Incendie et de Secours de Meurthe et Moselle, SDIS 54, Ludres

## Résumé :

*Cette étude est le fruit d'une collaboration entre le SDIS 54 et le LEMTA de Nancy. L'objectif est d'évaluer l'efficacité des tenues de protection actuellement utilisées par les sapeurs-pompiers. Pour ce faire une modélisation complète des transferts de chaleur depuis la source de l'incendie jusqu'au pompier lui-même a été entreprise. Elle tient compte à la fois des spécificités des vestes (matériaux multi-couches, présence de couches d'air) et de la complexité liée à la régulation thermique de l'organisme (phénomène d'évaporation et métabolisme). A l'issue de cette modélisation, des durées maximales d'exposition du sapeur à un flux donné avant apparition des premières brûlures ont pu être déterminées. Elles permettent de bien évaluer le niveau de protection thermique des vestes actuelles.*

## Abstract :

*This work is a joint effort between the LEMTA laboratory and the SDIS-54 (firefighter service). It aims at assessing the thermal efficiency of the protective-clothing (especially the jacket) currently used by firefighters. To that end, a complete model of heat transfer from the fire up to the body (organism) of the fireman has been developed. Both the special feature of the protective-jacket (multi-layer material, air layer) and the complexity related to the thermal regulation of the organism (sweating, metabolism) are considered. Limiting durations of fireman exposure to a given flux before appearance of skin burns could be determined. This helps to properly assess the protective level of the currently used jackets.*

**Mots clefs : Protection incendie ; transferts thermiques ; matériaux multi-couches**

## 1 Introduction

Lors de leurs interventions (secours à la personne ou lutte contre un incendie), les sapeurs-pompiers sont vêtus d'Équipements de Protection Individuelle (EPI) qui assurent leur intégrité physique. La veste, élément important de ces EPI, a été pendant de nombreuses années confectionnée en cuir. Cependant, à la suite de deux événements tragiques en 2002, drames de Neuilly sur Seine (5 décès) et de Loriol sur Drôme (4 morts et 1 disparu), il a été décidé de remplacer les vestes en cuir par des vestes en matière textile assurant des niveaux élevés de protection thermique et une meilleure signalétique. Cette veste est un matériau multi-couches, 3 ou 4 couches (selon les fabricants) composées de coton et de fibres synthétiques (polymères) qui lui confèrent des propriétés mécaniques et thermiques particulières :

- très résistante mécaniquement aux déchirures,
- imper-respirante (elle permet d'évacuer la sueur mais est imperméable à l'humidité extérieure ou toutes autres agressions chimiques),
- auto-extinguible (en cas de combustion, celle-ci ne sera pas entretenue).

Cependant, en dépit de tous ces points positifs, on continue à recenser chaque année au sein du corps des sapeurs-pompiers des accidents occasionnant des brûlures ou des pertes de connaissance dues au

stress. Ces incidents sont potentiellement causés par des problèmes de transfert de chaleur à travers la tenue de protection. La littérature recense de nombreux travaux scientifiques, aussi bien expérimentaux que numériques, portant sur l'analyse de la résistance au feu de ces tenues de protection [1, 2, 3]. Il existe malheureusement peu d'études portant sur la quantification des différents modes de transferts thermiques pour ce type de matériaux multi-couches en situation d'approche ou d'attaque de feux.

Nous avons opté pour une approche numérique afin de quantifier les flux de chaleur échangés entre la source et le sapeur. On propose dans cette étude de développer un modèle numérique permettant de reproduire les transferts de chaleur depuis la source d'un incendie jusqu'à l'organisme du pompier.

Dans ce qui suit, nous présenterons dans un premier temps le modèle décrivant les transferts au sein du système source-veste-organisme. Ensuite, nous analyserons les résultats, et plus particulièrement les durées limites d'exposition du sapeur à un flux donné avant apparition de brûlures.

## 2 Présentation du modèle

La figure 1 présente un schéma descriptif du système que l'on cherche à modéliser dans sa version la plus complète (veste + organisme) :

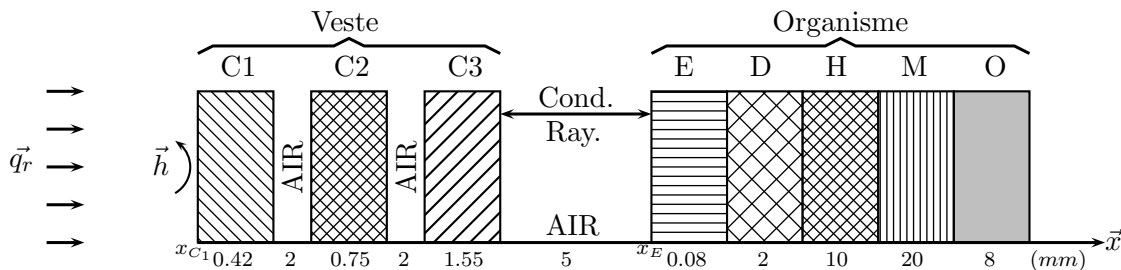


FIGURE 1 – Schéma de principe - Cas #3

Plusieurs configurations seront testées au cours de cette étude :

- Cas #1 : Organisme seul,
- Cas #2 : Organisme + tricot (monocouche),
- Cas #3 : Organisme + veste (tricotouche),

Le problème considéré est un transfert de chaleur unidimensionnel et instationnaire que l'on cherchera à résoudre par méthode des volumes finis avec une résolution implicite en temps.

### 2.1 Modélisation du transfert de chaleur au sein de la veste

La veste se présente comme un matériau multi-couches composé d'une couche d'aramide (C1), auto-extinguible et résistante mécaniquement, d'une couche imper-respirante (C2) et d'une couche de garniture (C3) assurant le confort. Ces couches sont séparées par des couches d'air. Le modèle implémenté pour le module veste comprend :

- un transfert thermique par rayonnement entre la source d'incendie et la couche C1 et par convection et rayonnement entre le milieu ambiant et cette même couche,

$$-\lambda_{C1} \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x_{C1}} = (h + h_r) (T_\infty - T_{x_{C1}}) + \alpha_{C1} q_r \quad (1)$$

avec  $\lambda_{C1}$  la conductivité thermique de la couche C1,  $h$  le coefficient d'échange convectif avec le milieu ambiant à la température  $T_\infty$ ,  $\alpha_{C1}$  le coefficient d'absorption de la couche C1,  $q_r$  la densité surfacique du flux radiatif reçu provenant de la source de chaleur (flamme) et  $h_r$  un coefficient d'échange radiatif équivalent défini par :

$$h_r = \sigma \alpha_{C1} (T_\infty^2 + T(x_{C1}, t)^2) (T_\infty + T(x_{C1}, t)) \quad (2)$$

où  $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-4}$  est la constante de Stefan-Boltzmann.

- une conduction mono-dimensionnelle de la chaleur dans chacune des couches (C1, C2 et C3),

$$\rho_{C_i} c_{pC_i} \frac{\partial T(x, t)}{\partial t} = \lambda_{C_i} \frac{\partial^2 T(x, t)}{\partial x^2} \quad (3)$$

- un échange de chaleur par rayonnement et conduction au sein de toutes les couches internes d'air. Ces couches sont considérées comme transparentes au rayonnement thermique et sont d'épaisseurs trop faibles pour permettre un échange convectif.
- aux interfaces de textile / air, on considérera des conditions de continuité de flux et de température.

## 2.2 Modélisation du transfert de chaleur au sein de l'organisme

L'organisme se subdivise en plusieurs couches anatomiques. On distingue dans l'ordre :

- l'épiderme (E) qui constitue la partie extérieure des tissus de la peau. Il est formé de cellules mortes et n'est donc pas vascularisé,
- le derme (D), se présentant sous forme de tissu conjonctif irrigué par le sang,
- l'hypoderme (H) qui représente la couche la plus profonde de la peau. Il s'agit également d'un tissu conjonctif assurant une fonction de protection contre les coups et garantissant également une protection thermique pour l'organisme,
- les muscles (M) constitués de fibres fortement vascularisées,
- les os (O) assurant, entre autre, une fonction de protection des organes internes.

Le transfert de chaleur au sein de l'organisme peut être décrit par l'équation "bio-thermique" de Pennes [5]. Ce modèle permet de prendre en compte les phénomènes de thermorégulation au sein de l'organisme : à savoir le métabolisme, la circulation sanguine ainsi que la sudation au niveau de l'épiderme. Pour chaque couche de l'organisme, l'équation "bio-thermique" s'écrit comme suit :

$$\rho_{c_p} \frac{\partial T(x, t)}{\partial t} = \lambda \frac{\partial^2 T(x, t)}{\partial x^2} + q_{met} + w_s c_s \rho_s (T_{art} - T(x, t)) \quad (4)$$

avec respectivement  $\rho$ ,  $c_p$ ,  $\lambda$  et  $q_{met}$  la masse volumique, la capacité calorifique, la conductivité thermique et l'énergie volumique créée par le métabolisme de chaque couche de peau considérée ;  $w_s$ ,  $c_s$  et  $\rho_s$  le taux de perfusion (correspondant à un débit massique par masse de chair), la capacité calorifique et la masse volumique du sang et  $T_{art}=36,8^\circ\text{C}$  la température artérielle. Comme pour le module veste, on considérera des conditions de continuité de flux et de température aux interfaces de chaque couche. Afin de prendre en compte les phénomènes de sudation au niveau de l'épiderme, nous avons choisi d'appliquer la condition au limite convecto-évaporatoire suivante [6] :

$$-\lambda_E \left. \frac{\partial T(x, t)}{\partial x} \right|_{x=x_E} = - (3,054 + 16,7h_c w_p) (P_{sat}(T_{x_E}) - HR_{air} * P_{sat}(T_{air})) + Q_{ech} \quad (5)$$

où  $w_p$  désigne le taux d'humidité de la peau,  $h_c$  le coefficient de transfert convectif avec l'humidité ( $h_c=4 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$  pour un individu en activité) et  $P_{sat}(T)$  la pression de vapeur saturante en kPa à la température  $T$ ,  $HR_{air}$  l'humidité relative de l'air et  $Q_{ech}$  le flux net échangé entre l'épiderme et la face arrière de la couche C3. Dans le cas où l'on étudie l'organisme seul,  $Q_{ech}$  correspondra au terme de droite de l'équation 1 en utilisant la température et le coefficient d'absorption à la surface de la peau. Enfin, une condition de Dirichlet  $T=36,8^\circ\text{C}$  est assurée en face arrière de la couche (O) afin de maintenir une température constante dans le corps.

## 3 Résolution et premiers résultats

Pour chacune des configurations, on calcule dans un premier temps les champs de température en régime permanent obtenus en considérant l'individu placé dans un environnement à température ambiante ( $T_\infty=20^\circ\text{C}$ ,  $h=4 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$ ). Ces champs constituent ensuite la condition initiale dans la

détermination en régime instationnaire des profils de température lorsque l'individu reçoit une densité de flux  $q_r$  provenant d'une source d'incendie. Les propriétés thermophysiques de la veste ont été caractérisées expérimentalement dans une étude précédente [7]. L'épaisseur de la couche d'air qui est adjacente à l'épiderme est de 5 mm (cas pour la veste et le tricot) alors que celles des couches interstitielles d'air présentes entre les couches de textiles sont de 2 mm. Le tricot est supposé être un vêtement en coton dont la masse volumique est de  $160 \text{ kg.m}^{-3}$ , la capacité calorifique de  $3125 \text{ J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$  et le coefficient d'absorptivité de 0,8.

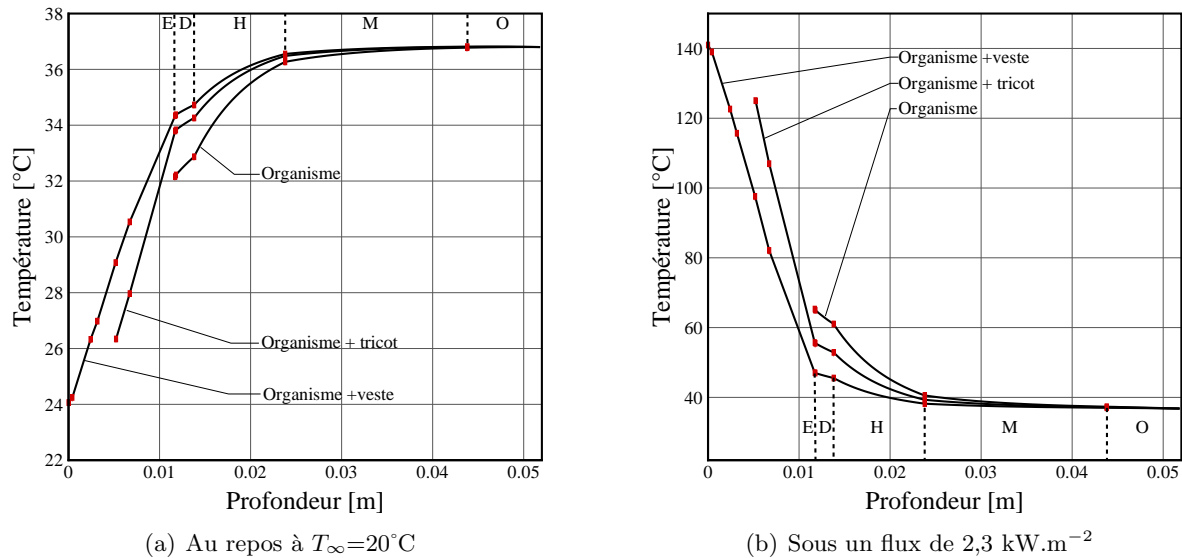


FIGURE 2 – Champs de température obtenus en régime permanent

La figure 2-a donne les champs de température en régime permanent lorsque le système étudié est placé dans l'air ambiant à  $20^\circ\text{C}$ . On constate, qu'avec la prise en compte de la thermorégulation de l'organisme, on obtient une température d'équilibre à la surface de la peau de l'ordre de  $32^\circ\text{C}$ . Ce résultat est conforme à nos attentes et a pu être vérifié à l'aide d'un thermocouple placé à la surface de la peau. Lorsque l'organisme est revêtu d'un simple tricot ou de la veste de protection, on observe également une augmentation de cette température. On atteint  $34^\circ\text{C}$  pour le système organisme + veste. Cette augmentation a bien entendu très peu d'influence sur la thermorégulation du sapeur avant intervention mais contribuerait par la suite à réduire la durée de son exposition. On rappelle que la thermorégulation contribue à maintenir la température corporelle d'un individu autour de  $37^\circ\text{C}$ . Une température corporelle limite de  $39^\circ\text{C}$  marque le début de la perte des capacités physiques. Elle devient fatale lorsqu'elle atteint les  $43^\circ\text{C}$  [8]. Afin d'éviter toute confusion par la suite, il convient de bien différencier la température corporelle (interne) et la température à la surface de la peau.

Les données de la figure 2-a sont utilisées par la suite comme condition initiale pour la résolution numérique en régime instationnaire lorsque l'individu est soumis à une densité de flux de  $2,3 \text{ kW.m}^{-2}$ . Cette valeur correspond au niveau d'exposition moyen des pompiers lors d'intervention. Les résultats sont présentés sur la figure 2-b et permettent en premier lieu d'apprécier la capacité de protection de la veste. En effet, en régime établi, la température à la surface de la peau atteint  $47^\circ\text{C}$  en présence de la veste tandis qu'elle avoisine les  $65^\circ\text{C}$  pour l'organisme seul. Afin d'évaluer la dangerosité de ces niveaux de température pour l'organisme, il convient de raisonner en terme de degré de brûlure.

#### 4 Critère de brûlure et durées d'exposition

Le modèle de quantification des brûlures le plus couramment utilisé dans la littérature correspond à celui de Henriques et Morritz [9]. Il fait intervenir un paramètre de blessure  $\Omega$  dont la variation

Brûlure :	Organisme seul	Organisme + tricot	Organisme + veste
1 <sup>er</sup> degré	0	448	1278
2 <sup>nd</sup> degré	15	839	3273
3 <sup>ème</sup> degré	27	882	4306
4 <sup>ème</sup> degré	3022	<i>jamais</i>	<i>jamais</i>

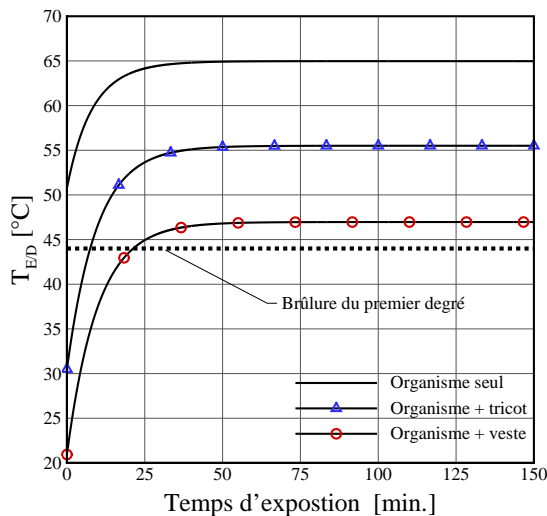
TABLE 1 – Durées maximales d'exposition [s] avant brûlure sous un flux de 2,3 kW.m<sup>-2</sup>.

temporelle peut être régie par une loi d'Arrhénius de la forme :

$$\frac{\partial \Omega}{\partial t} = P \exp\left(-\frac{\Delta E}{RT_{E/D}}\right), \text{ quand } T_{E/D} \geq 44^\circ\text{C} \quad (6)$$

où  $P$  désigne le préfacteur,  $\Delta E$  l'énergie d'activation,  $R$  la constante des gaz parfaits et  $T_{E/D}$  la température à l'interface épiderme/derme. Selon Henriques et Morritz [9], une brûlure au premier degré intervient lorsque  $T_{E/D}$  atteint 44°C. A partir de cet instant, on procède au calcul de  $\Omega$  dont les valeurs permettent d'évaluer les différents degrés de brûlure. Une valeur  $\Omega=0,53$  indique le début d'une brûlure du second degré,  $\Omega \geq 1$  correspond à une brûlure du troisième degré et enfin le quatrième degré est atteint pour  $\Omega \geq 4 \cdot 10^4$ . Les valeurs de  $P$  et  $\Delta E$  sont extraites de [10].

La figure 3 décrit l'évolution temporelle de la température à l'interface épiderme/derme lorsque le système est soumis à un flux de 2,3 kW.m<sup>-2</sup>. On constate que la brûlure au premier degré est obtenue instantanément pour l'organisme seul, au bout de 7 minutes lorsque l'organisme est revêtu d'un tricot et après 21 minutes lorsque ce dernier est protégé par la veste.

FIGURE 3 – Évolution de  $T_{E/D}$  pour 2,3 kW.m<sup>-2</sup>

Dans le tableau 1 sont regroupées, pour chaque configuration, les durées maximales d'exposition à un flux moyen de 2,3 kW.m<sup>-2</sup> avant apparition des différents niveaux de brûlure. Ces données permettent de bien apprécier la qualité de protection des vestes de pompiers actuelles. En effet, on remarque qu'une brûlure du second degré surviendra après presque une heure d'intervention. Signalons toutefois qu'une victime sera brûlée au second degré après seulement 15 minutes (839 s).

On cherche à présent à quantifier les durées maximales d'exposition avant apparition d'une brûlure du second degré lorsque le système 'organisme + veste' est soumis à différentes densités de flux comprises entre 2,3 et 10 kW.m<sup>-2</sup>. Les résultats sont donnés dans le tableau 2.

La littérature fait état de nombreux résultats expérimentaux auxquels il est difficile de se confronter tant les configurations d'étude et la qualité des textiles diffèrent. A titre d'exemple, Braun et al. [11] ont

Densité de flux [kW.m <sup>-2</sup> ]	2,3	6,3	7	8,4	10
Brûlure du 2 <sup>nd</sup> degré	3273	280	175	8	0

TABLE 2 – Durées maximales d'exposition [s] avant obtention d'une brûlure du second degré pour différentes densités de flux reçues

estimé une durée maximale de 90 s avant apparition d'une brûlure du second degré pour un pompier équipé de vêtement en Nomex (équivalent à la couche d'aramide C1) et soumis à un flux incident de  $7 \text{ kW.m}^{-2}$  (comparées aux 175 s obtenues dans cette étude). L'écart entre ces deux résultats peut s'expliquer par l'amélioration constante de ces équipements de protection depuis les années 80. D'une manière générale, on constate que la durée de protection diminue rapidement lorsque le flux augmente. Pour un flux au-delà de  $10 \text{ kW.m}^{-2}$  la veste devient inefficace.

## 5 Conclusions

Dans ce travail, nous avons cherché à évaluer l'efficacité des vestes de protection utilisées par les sapeurs-pompiers du SDIS 54. Dans un premier temps, un modèle complet décrivant le transfert de chaleur depuis la source d'un incendie jusqu'à l'organisme a été établi. Une des particularités du modèle est la prise en compte de la thermorégulation de l'organisme. En effet, le recours à l'équation "bio-thermique" de Pennes couplée à une condition aux limites adaptée a permis de considérer à la fois les échanges liés au métabolisme, à la circulation sanguine ainsi qu'à la sudation. Les premiers résultats obtenus en régime stationnaire permettent de bien se rendre compte de l'impact de la thermorégulation, sur la température à la surface de la peau notamment qui s'est avérée très réaliste. Par la suite, nous avons estimé les durées maximales d'exposition avant brûlure dans différentes configurations (organisme seul, organisme+tricot, organisme+veste). Cela a permis d'apprécier la capacité de protection des vestes actuelles qui deviennent inefficaces au delà d'une densité de flux de  $10 \text{ kW.m}^{-2}$ .

Les premiers résultats de cette étude laissent entrevoir de nombreuses perspectives. Dans un premier temps, les efforts porteraient sur le développement du modèle. En effet, bien que déjà très complet, le présent modèle pourrait être amélioré en prenant en compte les variations temporelles du taux d'humidité ( $w_p$ ) de la peau et surtout celles de la température corporelle. On pourrait également s'intéresser à l'évacuation de la transpiration à travers de la veste et vérifier l'impact sur les durées d'exposition. La seconde perspective serait de mettre en place de nouvelles expérimentations permettant la validation du modèle. Enfin, une analyse de sensibilité locale permettrait d'identifier les principaux paramètres (propriétés radiatives de la veste, capacité thermique, épaisseurs des couches d'air interstitielles, ...) influençant les performances de la veste de protection. Cela fournirait aux confectionneurs des pistes à explorer en vue d'améliorer la protection thermique des vestes des sapeurs-pompiers.

## Références

- [1] Chitrphiromsri, P., Kuznetsov, A.V. 2005 Modeling heat and moisture transport in firefighter protective clothing during flash fire exposure. *Heat Mass Trans.* **41** 206-215.
- [2] Raimundo, A.M., Figueiredo, A.R. 2009 Personal protective clothing and safety of firefighters near a high intensity fire front. *Fire Safety J.* **44** 514-521.
- [3] McCarthy, L.K., Di Marzo, M. 2011 The application of phase change material in fire fighter protective clothing. *Fire Technol.* **48** 841-864.
- [4] Quintiere, J. 1974 Radiative characteristics of fire fighters' coat fabrics. *Fire Technol.* **10** 153-161.
- [5] Pennes, H.H. 1948 Analysis of tissue and arterial blood temperatures in resting human forearm. *J. of Applied Physiology* **1** 93-122.
- [6] Lv, Y-G., Liu, J. 2007 Effect of transient temperature on thermoreceptor response and thermal sensation. *Building and Environment* **42** 656-664.
- [7] Collin, A., Acem, Z., Pinson, S., Pageaux, J., Jannot, Y., Magnolini, F., Charette, H. 2013 Caractérisation thermique des tenues de sapeurs-pompiers. *Congrès Français de Thermique Gérardmer*, 28-31 mai 2013.
- [8] Huck, J 1987 Evaluation of heat stress imposed by protective clothing. *First annual Conference on protective clothing, Clemson University.*
- [9] Henriques, F., Moritz, A. 1947 Studies of thermal injury I. The conduction of heat to and through skin and the temperatures attained therein. A theoretical and an experimental investigation. *Archives of Pathology* **23** 531-549.
- [10] Weaver, J., Stoll, A. 1969 Mathematical model of skin exposed to thermal radiation. *Aerospace Medicine* **40** 24-30.
- [11] Braun, E., Cobb, D., Cobble, V., Krasny, J., Peacock, R. 1980 Measurement of protective value of apparel fabrics in a fire environment. *J. of Consumer Product Flammability* **7** 15-25