

Vers la caractérisation thermique d'une tenue de protection pour sapeur-pompier

DAHAMNI Salim^{a,b,*}, BENAROUS Abdallah^b

^a Université Hassiba Benbouali de Chlef, Département de Génie mécanique, Hay Essalem, Chlef, Algérie.

^b Laboratoire LCEMSM, Hay Esalem, Chlef, 02000, Algérie.

Résumé

Dans ce papier, une modélisation 1D instationnaire est utilisée pour la caractérisation d'une tenue de protection pour sapeur pompier, sujette à des transferts conductifs-radiatifs. Des conditions aux limites de type convection-rayonnement sont adoptées pour la face exposée à l'air externe, mais aussi pour le côté peau-organisme. La tenue de protection est modélisée comme un milieu solide comportant trois couches de tissus, séparées par des lames d'air. Une analyse paramétrique est conduite afin d'évaluer les effets de variation des propriétés conductives et radiatives des tissus, sur le niveau de température en première couche de peau. Les calculs sont entrepris en formulation éléments finis par le biais du solveur COMSOL Multiphysics®. Les résultats obtenus sont confrontés à des calculs stationnaires 2D, et comparés à des simulations instationnaires, basées sur la méthode des volumes finis. Une diminution relative de 50% de l'absorptivité de la peau traduisant un port de tricot fin, permet de ramener la température en première couche de peau à une valeur tolérable.

Mots-clés : Tenue de pompier, incendie, transfert thermique, éléments finis, COMSOL.

Abstract

In the present work, an unsteady analysis is carried out for the thermal characterisation of a fire-fighter protective clothing. Coupled radiative and conduction heat transfers are considered within the clothing with a focus on the first skin layer. The protective clothing is modelled as a 1D solid medium, featuring three layers of tissues, separated by several air-gaps. A parametric analysis is performed in the aim to predict the effect of conductive and radiative tissue properties fluctuation on the first skin's layer temperature. The obtained results using the finite element software COMSOL Multiphysics are compared with stationary 2-D calculations, and faced to unsteady simulations based on the finite volume method. A relative reduction of 50% in the absorptivity of the skin, (in the case of wearing a fine knitted fabric) makes it possible to reduce the temperature of the first skin's layer to a tolerable value.

Keywords: Firefighter garment, fire, heat transfer, finite elements, COMSOL.

1. Introduction

Le problème des incendies n'est certes pas nouveau ; il reste toujours d'actualité et des catastrophes humaines et structurelles dues au feu, sont là pour nous le rappeler périodiquement, Kada *et al.* [1]. Le risque d'être pris au piège par un embrasement généralisé ou une explosion de fumées au cours de la carrière d'un sapeur-pompier existe, même s'il est minime. C'est pourquoi les fabricants de vêtements et de tissus s'efforcent de concevoir et de fabriquer des vêtements offrant une protection contre ce risque. Toutefois, les vêtements de

protection conçus dans cette optique ont tendance à poser d'autres problèmes tels que le stress thermique, la respirabilité insuffisante ainsi que la faible résistance à l'abrasion, entraînant des coûts de confection plus importants et une détérioration plus rapide de l'aspect du vêtement, Larsen *et al.* [2]. De nombreuses études expérimentales se rencontrent dans la littérature sur la résistance des vêtements de protection au feu. Parmi ces œuvres, plusieurs tentatives visaient à améliorer le comportement des vêtements de protection dans des conditions extrêmes et suggéraient de nouvelles techniques de confection pour améliorer la sécurité du

pompier. Dans ce contexte, Collin *et al.* [3] ont caractérisé séparément les différents tissus des tenues de protection en utilisant des techniques de spectroscopie UV pour prédire les propriétés radiatives. Les auteurs ont noté des incertitudes sur la mesure de la capacité calorifique volumique des couches internes, en raison de la haute flexibilité. Jannot *et al.* [4] ont mesuré la conductivité thermique de chaque type de tissu, par une technique dite «du tri-couche» et ont montré que des méthodes classiques de type «plaque chaude» ne permettaient pas de caractériser individuellement chaque couche. Sur le volet de la modélisation, Fu *et al.* [5] ont développé une corrélation entre la température en chaque couche et le flux radiatif incident sur la première couche de la tenue. Les auteurs se sont appuyés sur un ensemble de scénarios dans lesquels, le flux de flamme variait avec le temps, afin de reproduire des situations d'embrasement ou d'extinction. Jiang *et al.* [6] ont développé un simulateur numérique sous forme d'un programme 1D, permettant de modéliser le transfert thermique par rayonnement et conduction à travers les tissus et la peau humaine. Dans leur investigation, la convection n'était pas considérée et les simulations ont permis de suivre en temps réel le développement des brûlures sur la première couche de peau. En utilisant une formulation en volumes finis 1D, Collin *et al.* [7] ont analysé les transferts conductifs-radiatifs dans un modèle de tenue tri-couches. Les auteurs ont mis en évidence la contribution de la thermorégulation de l'organisme (sudation, saturation,...) dans le bilan thermique des sous-couches internes de la peau. Le présent travail s'inscrit dans le cadre d'une tentative de prédiction du comportement des tenues de protection vis-à-vis des chargements thermiques. Pour ce faire, un modèle 1D a été adopté pour une tenue usuelle composée de trois couches de tissu. Un transfert conductif-radiatif a été considéré dans les espaces inter-couches et couche-lame d'air, en sus de deux conditions de convection sur les bords du domaine ; couche1-air externe et couche de peau-organisme interne (Figure1). Les calculs sont entrepris en formulation éléments finis par le biais du solveur commercial COMSOL Multiphysics®.

2. Modélisation des transferts thermiques couplés

Le modèle d'étude se compose d'un milieu tri-couches de tissus (C1, C2, C3), séparées par trois lames d'air (Figure1). Les transferts bio-thermiques dans l'épaisseur de l'organisme ne sont comptabilisés qu'avec la première couche de peau, où l'on adopte une condition de

convection interne, moyennant une température imposée pour l'organisme ($T_i = 36,8^\circ\text{C}$).

Le transfert conductif dans une couche (Ci) de tissu est régi par l'équation de Fourier, Bergman *et al.* [8]:

$$\rho_{Ci} \cdot Cp_{Ci} \cdot [\partial T_{Ci}(x, t) / \partial t] = \lambda_{Ci} \cdot \partial^2 T_{Ci}(x, t) / \partial x^2 \quad (1)$$

$$i = \overline{1,2,3}$$

avec ρ_{Ci} , Cp_{Ci} et λ_{Ci} désignant respectivement, la masse volumique, la chaleur massique et la conductivité thermique du matériau (tissu) de la couche. Ces propriétés sont considérées comme constantes à l'intérieur de chaque couche. Pour les lames d'air, la conduction est régie par la même loi, mais avec des propriétés physiques dépendantes de la température :

$$\partial T_{air_i}(x, t) / \partial t = D(T_{air_i}) \partial^2 T_{air_i}(x, t) / \partial x^2; \quad (2)$$

$$i = \overline{1,2,3}$$

ou $D = \lambda_{air_i}(T_{air_i}) / \rho_{air_i}(T_{air_i}) \cdot Cp(T_{air_i})$ est la diffusivité thermique. Le flux radiatif échangé entre deux couches (Ci, Cj) de tissus est modélisé, Bergman *et al.* [8] comme :

$$\Phi_{i-j} = \sigma(T_i^4 - T_j^4) / \left((1/\varepsilon_i) + (1/\varepsilon_j) - 1 \right) \quad (3)$$

avec $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-4}$ est la constante de Stefan-Boltzmann, ε est l'émissivité et $T_i = 36,8^\circ\text{C}$ est la température de l'organisme. En sus de la conduction, les lames d'air échangent de la chaleur par rayonnement, tandis qu'elles sont supposées ne pas permettre un transfert convectif en raison de leurs faibles épaisseurs. Une condition convective-radiative est appliquée à la couche externe (C1) en raison de son contact direct avec l'air ambiant et les fumées, Bergman *et al.* [8] :

$$\lambda_{C1} \cdot [\partial T_{C1} / \partial x]_{x=x_{C1}} = (h_{C1} + h_r) [T_\infty - T(x, t)] \cdot \alpha_{C1} q_f \quad (4)$$

avec :

$$h_r = \sigma \alpha_{C1} \cdot (T_\infty^2 - T^2(x_{C1}, t)) \cdot (T_\infty - T(x_{C1}, t)) \quad (5)$$

h_{C1} , h_r représentent respectivement le coefficient d'échange convectif avec le milieu ambiant, et le coefficient d'échange radiatif équivalent. α_{C1} est le coefficient d'absorption de la couche C1. Le flux radiatif

q_f incident vers la partie tenue est supposé représenter 90% du flux global provenant de la flamme, Collin *et al.* [7]. Du côté peau, une partie de la chaleur est transmise par convection vers les couches internes de l'organisme (supposé à une température fixée T_i) :

$$\partial T_{\text{peau}} / \partial x = h_{\text{peau}} (T_{\text{peau}} - T_i) \quad (6)$$

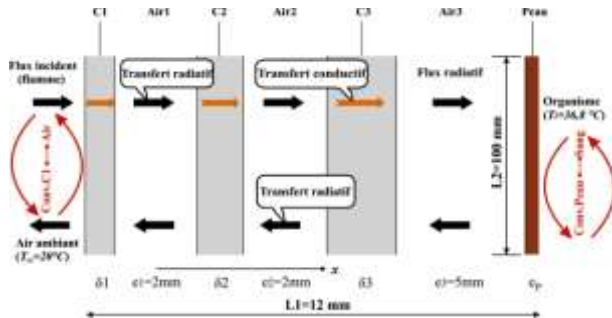


Figure 1 : Schématisation 1D des transferts thermiques couplés.

Pour les interfaces tissu-lame d'air, des conditions de continuité de flux et de température sont considérées.

3. Propriétés thermophysiques

Les données relatives aux transferts conductifs-radiatifs dans les différentes couches ont été extraites des travaux de caractérisation menés par Collin *et al.* [2], et sont dressées sur le tableau 1.

Tableau 1
Caractéristiques des couches de tissu [2]

	C1	C2	C3	P
δ (mm)	0,42	0,75	1,55	0,08
λ ($W \cdot m^{-1} \cdot ^\circ C^{-1}$)	0,081	0,041	0,038	0,37
ρ ($kg \cdot m^{-3}$)	605,0	212,0	112,0	3600,0
Cp ($J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$)	1118,5	1297,0	1219,0	1200,0
α/ε	0,65/0,60	0,65/0,60	0,65/0,60	0,98/0,60

Quant à la convection qui se manifeste de part et d'autres des trois couches, on adopte une valeur $h_{C1} = 8 \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}$ pour le coefficient de transfert convectif entre la première couche et l'air ambiant. Une valeur $h_{\text{peau}} = 4 \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}$ est prise pour quantifier la convection entre la peau et les couches internes de l'organisme. La valeur $q_f = 2,3 \text{ kW/m}^2$ du flux thermique provenant de la source d'incendie, correspond à une situation stationnaire pour l'incendie, Agred *et al.* [9].

4. Résultats et discussion

Le domaine de calcul est un rectangle (Figure2) dont les dimensions sont de 12mm×100mm. Une analyse préliminaire a montré que la diffusion de la température se fait essentiellement dans le sens de l'épaisseur (1D), avec une fluctuation selon Y ne dépassant pas 8%, Tayeballah [10]. Pour ce domaine d'étude, une grille structurée contenant 328 399 éléments quadrangulaires (Q4) a été retenue pour la suite des calculs (Figure2). Des maillages plus fins, allant à 700 000 éléments n'ont révélé que des écarts inférieurs à 0,5% sur la surface de la peau.

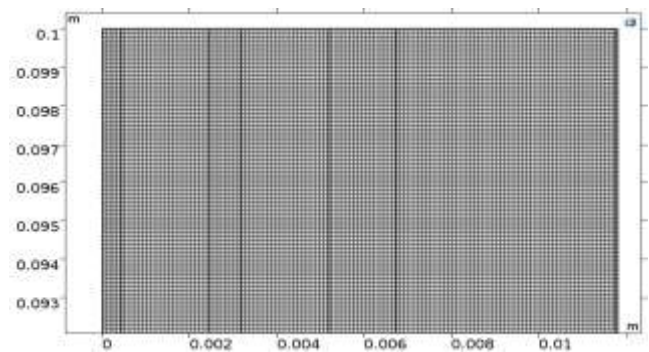


Figure 2 : Maillage structuré du domaine de calcul.

Le contour spatial de la température est visible sur la figure 3.a. Il est remarqué que malgré l'importance des échanges par convection (h_{C1}) et la faible absorptivité de la couche C1, la surface de la tenue se trouve à une température assez élevée ($\sim 126^\circ C$). Une décroissance importante de la température est notée à l'intérieur de l'ensemble C1-Air1, où le niveau thermique avoisine $108^\circ C$. Plus spécifiquement, la lame d'air adjacente à la première couche de tissu, semble offrir une bonne résistance thermique, se traduisant par une décroissance à forte pente (Figure3.b). La température continue à diminuer jusqu'à un niveau $T_p = 58,73^\circ C$ qui correspond à celle de la première couche de la peau. Cette valeur est assez proche (-3%) des calculs effectués par Collin *et al.* [7] lors d'une situation au repos. Ce résultat était prévisible puisqu'en régime stationnaire, les effets du stockage thermique inter-couches ne sont pas modélisés.

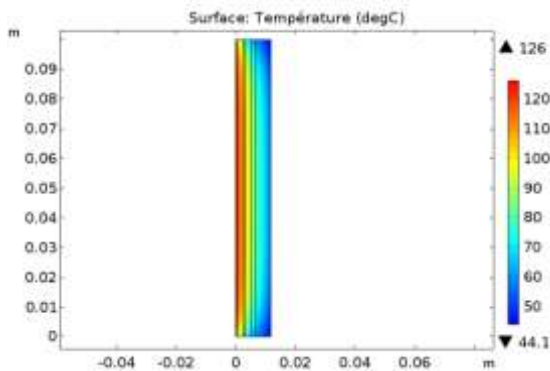


Figure 3.a. Contour spatial de la température.

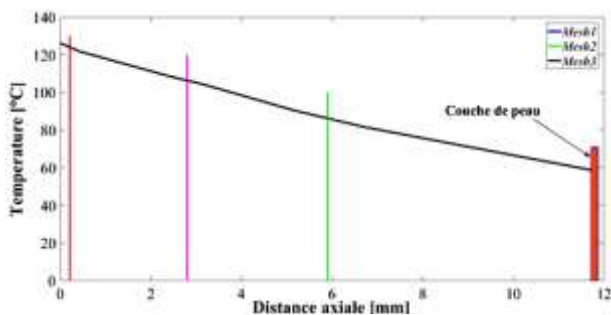


Figure 3.b. Profil de température à travers l'épaisseur de la tenue.

Dans une optique visant à assurer l'intégrité physique du sapeur pompier, mais aussi en vue de contribuer au développement de la confection de nouvelles tenues, il est important de mener une analyse paramétrique quant à de possibles changements des propriétés thermophysiques de l'ensemble tissus-organisme. Ces variations peuvent émaner du développement de situations instationnaires lors de l'intervention ou comme conséquences d'incertitudes sur la mesure de ces propriétés, Jannot *et al.* [4]. Dans ce contexte, on commence par mesurer l'influence d'une variation de l'absorptivité (α) de la couche de tissu (C1) sur la température de la première couche de peau.

En effet, la couche C1 se trouve en direct exposition au flux radiatif des flammes ou des fumées et pourrait voir son absorptivité augmenter en raison d'une perte de teinture ou d'un dépôt de poussières. L'augmentation du facteur d'absorptivité (α) de sa valeur de référence $\alpha_{C1}=0,65$ à une valeur extrême $\alpha_{C1}=0,95$ ne semble pas trop affecter la distribution interne de la température. En effet, le profil thermique est quasi identique (Figure 4.a) pour la plage investie de l'absorptivité. Cependant, la température de peau observe une augmentation relative de +0,65% par rapport à sa valeur de référence (58 °C). Ce résultat traduit une isolation thermique assez bonne pour

la configuration tri-couches, vis-à-vis des sollicitations radiatives externes.

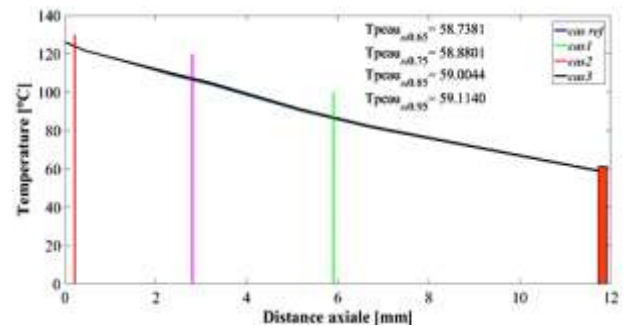


Figure 4.a. Profils de température pour différents paramètres radiatifs (C1).

Quant aux pertes convectives entre l'air ambiant et la première couche de tissu, on note une très faible dépendance (-1,5% d'écart) de la température de peau à une augmentation de la température ambiante, de sa valeur de référence à $T_{\infty} = 60^{\circ}\text{C}$ puis à $T_{\infty} = 80^{\circ}\text{C}$ selon les travaux de Tayeballah [10]. Dans le même contexte, la température de peau paraît assez sensible à une éventuelle fluctuation de la convection entre la couche C1 et l'air ambiant. En effet, une possible diminution de 50% du coefficient de transfert convectif h_{C1} , pourrait induire un dépassement du seuil thermique toléré à la surface de peau. La température de peau révèle dans ce cas, une augmentation relative avoisinant les 10% (Figure 4.b).

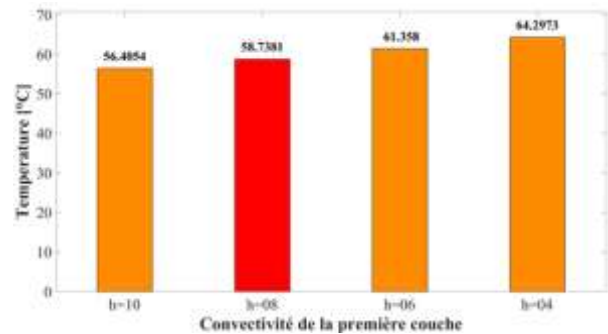


Figure 4.b. Température en première couche de peau pour diverses valeurs de h (C1-air).

Il est aussi important de noter que la fatigue et le stress contribuent à favoriser les échanges peau-organisme, en augmentant la valeur du coefficient de transfert convectif h_{peau} . En l'occurrence, une augmentation du coefficient de sa valeur de référence à une valeur $h_{peau}=8 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}}$, qui correspondrait à une situation de stress thermique extrême pour le pompier, induira un abaissement relatif de 9,5% sur la température en surface de peau (Figure 5.a). Ce taux

de diminution est à prendre avec précaution, car le stress favorise la sudation, mais limite en même temps les pertes convectives via le phénomène de saturation de la vapeur d'eau sur la surface de la peau.

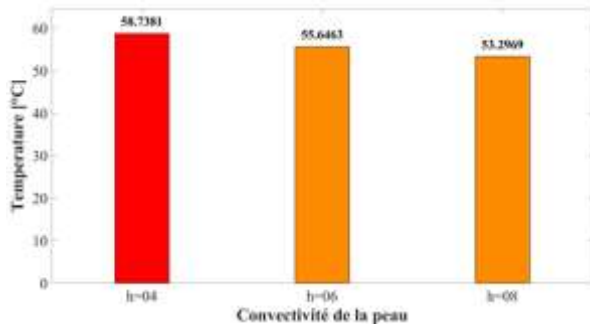


Figure 5.a : Température de la peau pour diverses valeurs de h_{peau} .

Pour ce qui est d'une diminution de l'absorptivité de la peau α_{peau} qui serait possible grâce à un port d'un fin tricot sous la tenue, une insensibilité (-1,4%) de la température en surface de la peau a été notée (Figure 5.b). Ce résultat révèle une bonne isolation de la surface de peau en raison de la grande résistance thermique offerte par les trois couches de tissus.

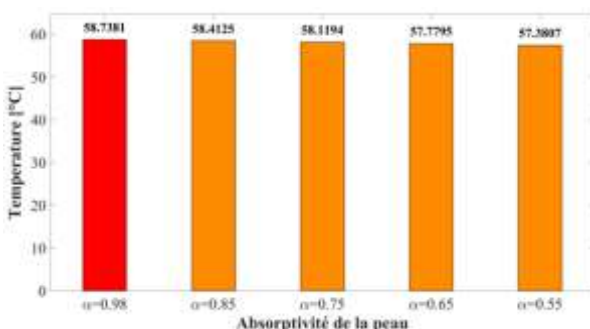


Figure 5.b : Température de peau pour diverses valeurs de α_{peau} .

Pour analyser l'effet d'un possible changement des matériaux des tissus pour les deux couches (C1, C2), on tente de faire diminuer leurs conductivités thermiques à des valeurs $\lambda_{C1} = 0,06 \text{ W/m.K}$, $\lambda_{C2}=0,035 \text{ W/m.K}$ pour le premier cas (cas1), puis à $\lambda_{C1}=0,035 \text{ W/m.K}$, $\lambda_{C2}=0,035 \text{ W/m.K}$ pour le second cas (cas2). La limite $\lambda = 0,035 \text{ W/m.K}$ est dictée par des considérations de ductilité du tissu, Onofrei *et al.* [11].

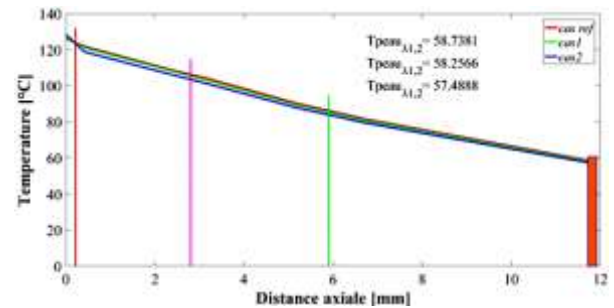


Figure 6 : Profils de température pour différentes valeurs de conductivité des tissus.

On remarque une faible sensibilité de la température de peau à la conduction de la première couche (λ_{C1}). Ce comportement favorise une augmentation du transfert conductif vers les couches internes pour une diminution de la résistance thermique. On note une diminution relative de 2,12 % sur la température de peau pour le cas limite $\lambda = 0,035 \text{ W/m.K}$ (Figure 6).

En vue d'une éventuelle amélioration du confort, on propose d'utiliser un modèle de tenue à deux couches de tissus (Figure 7). Cette configuration est sensée permettre un allègement de la tenue tout en améliorant la dynamique d'intervention du pompier. De plus, cette variante de veste ne serait efficace que si elle aurait à garantir une isolation thermique au moins identique à celle utilisée dans la configuration à trois couches. En l'occurrence, on propose de garder la couche C1 avec les caractéristiques de référence (Tableau 1) et de confectionner le tissu 3 au niveau de la couche C2 ($\lambda_{C2} = 0,038 \text{ W/m.K}$).

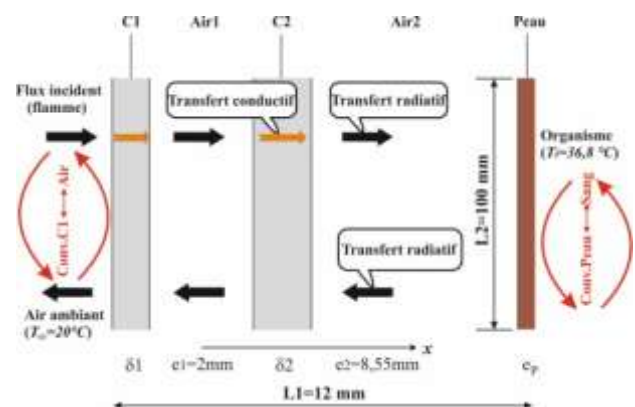


Figure 7 : Le modèle proposé pour la tenue bicouches.

Bien que dans la présente configuration, la lame d'air (air 2) est plus épaisse (~8,5 mm), la résistance thermique actuelle ne permet pas d'assurer une bonne isolation contre le flux émanant du foyer de l'incendie. En effet, la

température en surface de peau dépasse de 9,2% sa valeur obtenue pour le cas d'une veste à trois couches (Figure 8.a).

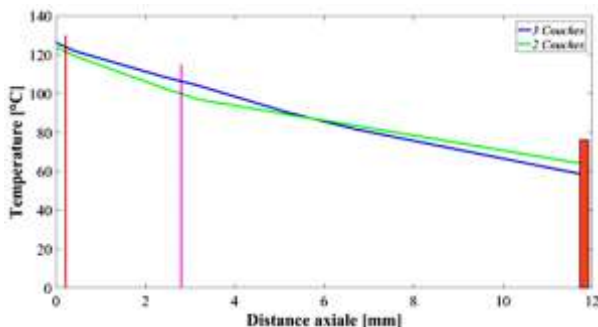


Figure 8.a : Évolution de la température dans le modèle de tenue bicouches.

En préservant les valeurs de référence pour les propriétés thermophysiques de la veste bicouches, une solution alternative consiste à faire diminuer le coefficient d'absorptivité, en suggérant un port de tricot très fin (conduction négligeable) collé à la surface de la peau. L'examen de la figure 8.b montre que, contrairement à la configuration trois couches où la température en surface de peau est quasi-insensible ($< -2\%$, Figure 5.b) à la diminution de l'absorptivité, une décroissance relative de 6,1 % serait possible dans ce cas. Ainsi, une diminution de 50 % du facteur d'absorptivité, devrait permettre d'atteindre un seuil thermique tolérable ($\sim 60^\circ\text{C}$) en surface de peau.

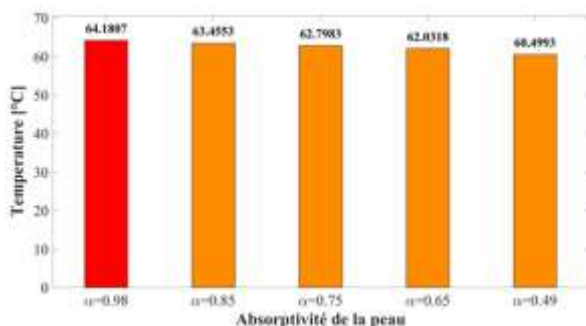


Figure 8.b : Température de peau pour diverses valeurs de l'absorptivité (modèle bicouches).

5. Conclusion

Le présent papier représente une investigation numérique du comportement thermique de l'ensemble tenue-organisme pour un sapeur-pompier. Les modèles de transferts conductif, convectif et radiatifs ont été utilisés

pour une configuration stationnaire et unidimensionnelle. Les analyses paramétriques menées sur les paramètres thermophysiques d'une tenue tri-couches ont révélé une grande sensibilité de la température en surface de peau aux coefficients de transfert convectif. En effet, un niveau thermique en première couche de peau proche de 53°C était possible si la valeur du coefficient h_{peau} pouvait être doublée. De même, un dépassement du seuil de 60°C pouvait survenir si un déficit de 50% sur les échanges convectifs entre la couche externe de la tenue et l'air ambiant, se produisait. Un modèle de tenue, plus légère et moins encombrante, composée de deux couches de tissu, a été suggéré. Pour cette configuration, c'est le transfert radiatif vers la peau et plus spécifiquement, le coefficient d'absorptivité, qui semble influencer le niveau thermique. En effet, une réduction de la moitié de la valeur de référence pour α_{peau} , permettrait de ramener la température en surface de peau au seuil de 60°C .

Remerciements

Les auteurs expriment leurs remerciements à la Direction Générale de la Recherche Scientifique et du Développement Technologique (DGRSDT) pour le financement du présent travail, sous le projet-contrat N°: A11N01UN020120150001.

Références

- [1] Kada A., Lamri B., Benlakehal N., Bouchair H., Achour B., Analyse non-linéaire de poutres métalliques PRS de longues travées sous l'effet de hautes températures dues à l'incendie, *Revue Nature & Technologie. A- Sciences fondamentales et Engineering*, 8 (2013) 27–34.
- [2] Larsen B., Snow R. and Aisbett B., Effect of heat on firefighters' work performance and physiology, *Journal of Thermal Biology* 53 (2015) 1–8.
- [3] Collin A. *et al.*, Study on visible-IR radiative properties of personal protective clothing for firefighting, *Fire Safety Journal*, 71, (2015), 9–19.
- [4] Jannot Y., Degiovanni A., Payet G., Thermal conductivity measurement of insulating materials with a three layers device, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 52 (2009) 1105–1111.
- [5] Fu M., Weng W.G., *et al.*, Quantitative assessment of the relationship between radiant heat exposure and protective performance of multilayer thermal protective clothing during dry and wet conditions, *Journal of Hazardous Materials*, 276 (2014) 383–392.
- [6] Jiang Y.Y., Yanai E., An integrated numerical simulator for thermal performance assessments of firefighter's protective clothing, *Fire Safety Journal*, 45 (2010) 314–326.
- [7] Collin A., Acem Z. *et al.*, Etude du transfert de chaleur au sein de tenues de protection de sapeurs-pompier, (2013), 21^{ème} Congrès Français de Mécanique (CFM), Bordeaux, France.
- [8] Bergman T.L., Lavine A.S., Incropera F.P., Dewit D.P., *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*, (2011), Wiley & Sons Publishing, 7^{ème} Edition, NJ, USA.
- [9] Agred S., Benarous A., Loukarfi L., Naji H., Un progiciel pour l'analyse de la couche de fumées lors d'un incendie de compartiment, *Revue « Nature & Technologie »*. C- Sciences de l'Environnement, 13 (2015) 23–27.

-
- [10] Tayeballah F., "*Simulation des transferts thermiques au sein des tenues de protection des sapeurs pompiers*", Mémoire de Master en génie mécanique (2015), Université Hassiba Benbouali de Chlef.
- [11] Onofrei E., Dupont D., Soulat D., Modeling heat transfer through multilayer firefighter protective clothing, *Industria Textila*, 65 (5) (2014), 277-282.