



Vers la caractérisation thermique d'une tenue de protection des sapeurs-pompiers

S. DAHAMNI^{1,2}, A. BENAROUS^{*2}, M. CHEIKH BOUCHRAYE³

¹ Département de Mécanique, Faculté de Technologie, Université Hassiba Benbouali, Chlef, Algérie

² Laboratoire CEMSM, UHB Chlef, Algérie

s.dahamni@univhb-chlef.dz

³ Faculté des Sciences et Technologies, Université de Lorraine, Nancy, France

mrabih@yahoo.com

**a.benarous@univhb-chlef.dz*

Résumé : Dans ce papier une modélisation 1D instationnaire est utilisée pour la caractérisation d'une tenue de protection 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 (cas de port d'un tricot fin), permet de ramener la température en surface de la peau à une valeur tolérable.

Mots clés : Tenue de protection, Transferts thermiques, Matériaux multicouches, Sécurité incendie.

1. Introduction

La prédiction des performances des vêtements de protection des sapeurs-pompiers, en termes de temps d'exposition avant brûlures, mais aussi en matière de légèreté et manœuvrabilité, nécessite une parfaite compréhension et une fidèle modélisation des flux thermiques émanants des foyers d'incendie. La modélisation des transferts conductifs, convectifs et radiatifs, devrait aussi considérer la non linéarité qui pourrait provenir de possibles changements des propriétés thermophysiques de la tenue, ou de l'organisme, Torvi et Song [1,2]. L'isolation thermique de la peau du pompier peut être assurée par une augmentation de l'épaisseur des tissus des tenues de protection, mais l'aspect légèreté n'a pas été évoqué dans ces études, Li et Tian [3]. Quelques auteurs [4,5] proposent de faire varier non seulement l'épaisseur globale, mais aussi les espaces inter-couches, et ce, dans le but de favoriser un mode de transfert plus tôt qu'un autre. Mandal et al. [6] utilisent la technique des réseaux de neurones (ANN) pour arriver à optimiser la performance d'une tenue de protection, compte tenu des contraintes liées au poids et au nombre de couches. Quant à la quantification des modes de transfert thermique, des études [1,2] mettent en évidence, la convection entre les écoulements de fumées et la couche externe de la tenue. Le mode radiatif n'est pas à négliger en raison de la température élevée de la flamme d'incendie, et se situe principalement dans la région infrarouge du spectre [7,8]. Ghazy et al. [9] préconisent un changement de l'émissivité globale de la tenue de protection, car selon ces auteurs, les transferts radiatifs inter-couches sont très prononcés. En menant une campagne d'analyses sur les interactions entre les modes de transferts et les propriétés des couches, Mandal et al. [10] ont proposé des modèles empiriques, pour se substituer aux essais en laboratoires. Quelques auteurs s'intéressent au phénomène du stress thermique du pompier, causé principalement par une mauvaise évacuation de la chaleur accumulée, vers le milieu externe, Nayak [11]. Ce phénomène va à l'encontre de la voie, qui préconise une augmentation de l'épaisseur et le nombre de couches dans une tenue de protection. En conséquence, d'autres auteurs proposent des solutions qui devraient minimiser le stress thermique, Onofrei et al. [12]. Ce sont donc, deux phénomènes contradictoires, qui sont à considérer lors des avant-projets de conception et de fabrication des tenues. L'inclusion du transfert bio-thermique [13] dans la caractérisation des tenues de protection, commence à s'imposer depuis 1985, par les travaux de Weinbaum et Jiji [14]. En se basant sur les travaux de Pennes [13] conduits sur des tissus humaines et incluant les propriétés des couches de peau, du sang et de la sudation, des auteurs comme Chua et al. [15], ont pu modéliser le couplage thermique tissu-organisme, sans autant considérer l'architecture micro-vasculaire des tissus biologiques.

Le présent travail est une tentative numérique vers la caractérisation thermique d'une tenue de protection pour sapeur-pompier. Le modèle 1D, inclut une série de couches de tissu à laquelle toutes les couches biologiques de la peau, sont ajoutées.

Les modes de transfert mixtes convecto-rayonnements et conductifs sont pris en compte dans la formulation mathématique des équations gouvernantes. Un calcul préliminaire sans couches biologiques est entrepris, dans le but d'ajuster les propriétés thermophysiques des couches de tissus, afin de reproduire une distribution stationnaire (2D) de la température, à travers l'épaisseur de la tenue. Un calcul stationnaire avec couches biologiques est effectué, dans le cas d'un flux radiatif externe moyennant des conditions aux limites convecto-rayonnantes sur la face de la tenue exposée aux fumées. Le calcul est complété par une situation instationnaire où les durées d'exposition avant brûlures, ainsi que les temps d'établissement du régime permanent, sont mis en relief. Le papier se termine par une analyse paramétrique dans laquelle, la variation de quelques propriétés thermophysiques relatives à la partie tenue et de l'environnement externe au pompier, est quantifiée par rapport au niveau de température sur l'épiderme et sur la couche externe de la tenue.

2. Modélisation des transferts couplés

Le modèle d'étude se compose d'un milieu tri-couches de tissus (C1, C2, C3), séparées par trois lames d'air (Figure.1). Les transferts bio-thermiques dans l'épaisseur de l'organisme peuvent également être divisés en cinq couches, qui sont l'épiderme (E), le derme (D), l'hypoderme (H), les muscles (M) et l'os (O).

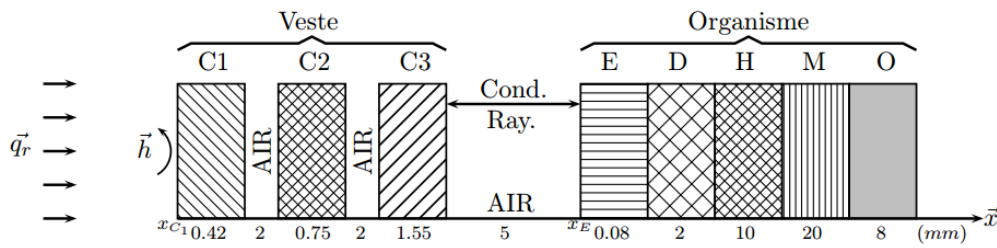


Figure 1 : Schématisation 1D du domaine

2.1. Le transfert de chaleur dans la veste

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

- 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,

$$-\lambda_{C1} \frac{\partial T_{C1}}{\partial x} \Big|_{x=C1} = (h_{C1} + h_r) [T_{ext} - T(x_{C1}, t)] + \alpha_{C1} q_r \quad (1)$$

où :

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

h_{C1}, h_r représentent respectivement le coefficient d'échange convectif avec le milieu ambiant, et le coefficient d'échange radiatif équivalent. ϵ_{C1} est le coefficient d'absorption de la couche C1. Le flux radiatif q_r incident vers la partie tenue est supposé représenter 90% du flux global provenant de la flamme [16],

- Un transfert conductif dans une couche (Ci) de tissu, est régi par l'équation de Fourier [17] :

$$\rho_{Ci} C_{pCi} \frac{\partial T_{Ci}(x, t)}{\partial t} = \lambda_{Ci} \frac{\partial^2 T_{Ci}(x, t)}{\partial x^2}; \quad i = \overline{1, 2, 3} \quad (3)$$

avec $\rho_{Ci}, C_{pCi}, \lambda_{Ci}$ désignant respectivement, la masse volumique, la chaleur massique et la conductivité thermique du matériau (tissu) de la couche. Ces propriétés sont considérées 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 [17] :

$$\frac{\partial T_{air_i}(x, t)}{\partial t} = D(T_{air_i}) \frac{\partial^2 T_{air_i}(x, t)}{\partial x^2}; \quad i = 1, 2, 3 \quad (4)$$

où

$D = \lambda_{air_i}(T_{air_i}) / \rho_{air_i}(T_{air_i}) \cdot C_p(T_{air_i})$ est la diffusivité thermique,

- Le flux radiatif échangé entre deux couches (C_i, C_j) de tissus est modélisé, comme [17] :

$$\Phi_{i-j} = \frac{\sigma}{(1/\varepsilon_i) + (1/\varepsilon_j) - 1} (T_i^4 - T_j^4) \quad (5)$$

où σ est la constante de Stefan-Boltzmann, ε est l'émissivité.

- Un échange de chaleur par rayonnement et conduction au sein des trois couches internes d'air. Ces couches sont considérées comme transparentes au rayonnement thermique et sont d'épaisseurs faibles, de façon que l'échange convectif peut être négligé,

$$-\lambda_{C1} \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x_{C1}} = -\lambda_{air} \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x_{air}} + \varepsilon_{app} \sigma [T^4(x_{C1}, t) - T^4(x_{C2}, t)] \quad (6)$$

où :

$$\varepsilon_{app} = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_{C1}} + \frac{1}{\varepsilon_{C2}} - 1}$$

- Aux interfaces de tissu/air, on considérera des conditions de continuité de flux et de température [16].

$$\rho_{air} C_p \frac{\partial T(x, t)}{\partial t} = \lambda_{air} \frac{\partial^2 T(x, t)}{\partial x^2} \quad (7)$$

- Condition entre la couche C2 /air (2^{ème} lame) :

$$-\lambda_{C2} \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x_{C2}} = -\lambda_{air} \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x_{air}} + \varepsilon_{app} \sigma [T^4(x_{C2}, t) - T^4(x_{C3}, t)] \quad (8)$$

où :

$$\varepsilon_{app} = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_{C2}} + \frac{1}{\varepsilon_{C3}} - 1}$$

2.2. Le transfert de chaleur au sein de l'organisme

Toutes les modélisations mathématiques qui cherchent à simuler les transferts thermiques dans la peau soumise à une agression thermique, considèrent que les travaux de Pennes en 1948 ont été précurseurs [13]. L'objectif de travail de Pennes est d'« évaluer l'applicabilité de la théorie des échanges de chaleur sur l'avant-bras, en se basant sur la production de chaleur interne au tissu et sur la circulation sanguine ». Il part du principe que le taux de transfert de chaleur entre le sang et le tissu est proportionnel au produit de la perfusion volumique et à la différence entre la température du sang artériel et celle du tissu au niveau local [13]. Ainsi, la distribution spatio-temporelle de la température se modélise comme [13] :

$$\rho C_p \frac{\partial T(x, t)}{\partial t} = \lambda \frac{\partial^2 T(x, t)}{\partial x^2} + q_{met} + w_s c_s \rho_s [T_{art} - T(x, t)] \quad (9)$$

où ρ , C_p , λ et q_{met} désignent respectivement, 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 ρ_s représentent le taux de perfusion correspondant à un débit massique par masse de chair, la capacité calorifique et la masse volumique du sang et $T_{art} = 36,8^\circ C$ la

température artérielle. Comme pour le module veste, on considérera des conditions de continuité de flux et de température aux interfaces de chaque couche.

- Condition entre la couche d'air 3 / épiderme :

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 [18] :

$$-\lambda_{C2} \frac{\partial T(x,t)}{\partial x} \Big|_{x=x_{E \text{ peau}}} = -(3.054 + 16.7 h_C w_p) + (P_{sat}(T_{x_E}) - HR_{air} \cdot P_{sat}(T_{air})) + Q_{ech} \quad (10)$$

avec :

$$Q_{ech} = -\lambda_{air} \frac{\partial T(x,t)}{\partial x} \Big|_{x=x_{E \text{ air}}} + \varepsilon_{app} \sigma (T^4(x_{F3}, t) - T^4(x_E, t))$$

- Condition sur la première couche de peau :

Une condition de type Dirichlet à $T_{art}=36,8^\circ C$ est assurée en face arrière de la couche (O) afin d'assurer une température constante dans le corps du pompier :

$$T(x_L, t) = T_{art} = 36,8^\circ C \quad (11)$$

3. Calcul par simulation

Le domaine d'étude de référence se compose d'un milieu tri-couches de tissus (C1, C2, C3), séparées par trois lames d'air (Figure 2). Les transferts bio-thermiques dans l'épaisseur de l'organisme ne sont comptabilisés que dans la deuxième simulation. Dans la première simulation, les transferts bio-thermiques dans l'organisme seront comptabilisés avec la première couche de peau, où une condition de convection interne est adoptée, moyennant une température imposée pour l'organisme ($T_{art}=36,8^\circ C$).

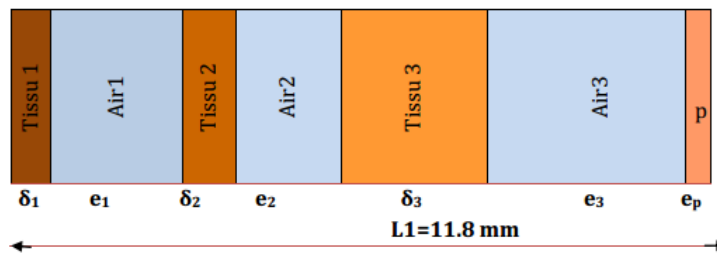


Figure 2 : Domaine de calcul (sans transfert biothermique)

Les données relatives aux transferts conductifs-radiatifs dans les différentes couches ont été extraites des travaux de caractérisation menés par S. Dahamni et al. [19] et Collin et al.[8], et sont visibles sur le tableau 1.

Tableau 1 : Caractéristiques des couches de tissu [8]

	δ (mm)	λ (W/m.K)	ρ (kg/m ³)	C_p (J/kg.K)
C1	0,42	0,081	605,0	1187,5
C2	0,75	0,041	212,0	1297,0
C3	1,55	0,038	112,0	1219,0
P	0,08	0,37	3600,0	1200,0

Le tableau 2, donne certaines propriétés thermophysiques des trois couches de la peau humaine :

Tableau 2 : Epaisseurs moyennes et propriétés des couches de la peau [21]

	δ (mm)	λ (W/m.K)	ρ (kg/m ³)	C_p (J/kg.K)	w_s (taux de perfusion) (s ⁻¹)
Epiderme	0,08.10 ⁻³	0,24	1200,0	3590,0	0
Derme	0,001	0,45	1200,0	3300,0	0,00125
Sang	0,0013	0,45	1060,0	3770,0	0
Hypoderme	0,003	0,19	1000,0	2500,0	0,00125

Quant à la convection qui se manifeste de part et d'autres des trois couches, on adopte une valeur de 8 W/m².K, pour le coefficient de transfert convectif entre la première couche et l'air ambiant. Une valeur moyenne de 4 W/m² est prise pour quantifier la convection entre la peau et les couches internes de l'organisme. La valeur 2,3 kW/m² du flux thermique provenant de la source d'incendie, correspond à une situation stationnaire pour l'incendie. Cette valeur correspond au niveau d'exposition moyen des pompiers lors d'une intervention [16].

4. Résultats et discussions

Les résultats sont présentés pour deux situations. La première représente un calcul stationnaire sans couches biologiques (limitée à l'épiderme) pour le comparer avec le calcul 2D de Dahamni et al. [19], et le calcul bio-thermique pour le comparer avec le calcul 1D de Collin et al. [16]. Les calculs entrepris sont formulés en éléments finis, par utilisation du solveur commercial COMSOL Multiphysics®.

4.1. Etude sans couches biothermiques

Il est remarqué que malgré l'importance des échanges par convection et la faible absorptivité de la couche C1, la surface de la veste se trouve à une température assez élevée (126°C). Une décroissance importante de la température est notée à l'intérieur de l'ensemble C1-Air1, où le niveau thermique avoisine les 107°C (Figure 3).

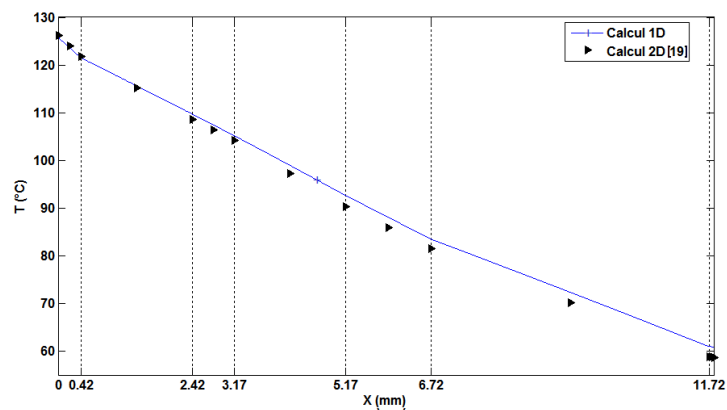


Figure 3 : Profil de la température à travers l'épaisseur de la tenue

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 (Figure 3). La température continue à diminuer jusqu'à un niveau $T_p = 60^\circ\text{C}$ qui correspond à celle de la première couche de la peau. Cette valeur est en accord avec les calculs effectués par Dahamni et al. en 2D [19]. Les expressions de la température à travers l'épaisseur (x) sont indiquées sur la figure 4. Une pente importante au niveau des lames d'air est remarquée, ce qui explique les épaisseurs de ces lames et leurs faibles conductivités par rapport aux couches de la veste. Ces expressions représentent des polynômes par morceaux, obtenus par la méthode des moindres carrés.

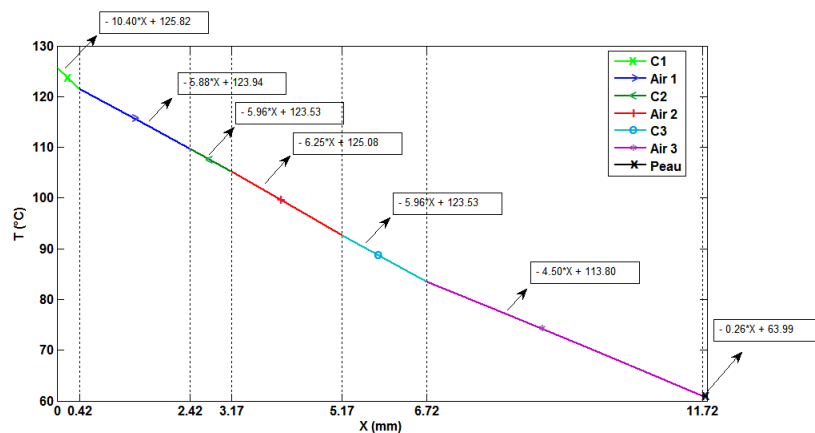


Figure 4 : Profil de température à travers la tenue

4.2. Etude biothermique stationnaire

Pour le cas biothermique, ce domaine de calcul s'étend jusqu'à la partie os ($x \sim 51$ mm). Les calculs éléments finis entrepris sous un régime stationnaire, avec un flux radiatif nominal ($\approx 2,3 \text{ kW/m}^2$), sont assez proches (moins 4% d'erreur relative) des calculs en volumes finis, développés par Collin et al. [8].

La figure ci-dessous (figure 5) représente l'allure de la température dans la veste et à travers les couches de la peau.

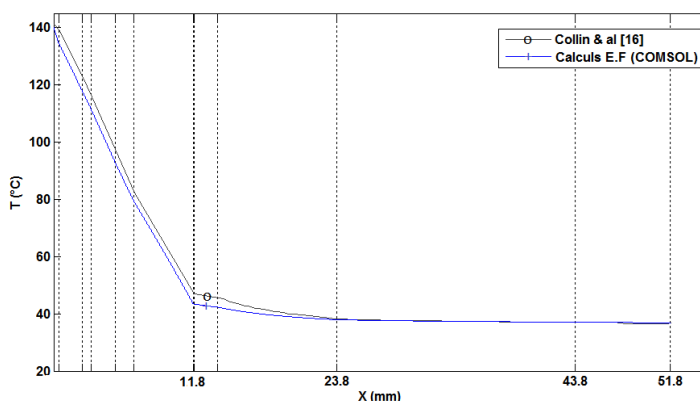


Figure 5 : Distribution stationnaire de la température dans le cas biothermique

Les résultats de la figure 5 seront utilisés par la suite comme condition initiale pour la résolution numérique en régime instationnaire lorsque l'individu est soumis à un flux de $2,3 \text{ kW.m}^{-2}$. Ces résultats permettent en premier lieu de déceler que la capacité de protection de la veste est appréciée. En effet, en régime établi, la température à la surface de la peau atteint $43,42^\circ\text{C}$ (Figure 6) en présence de la veste, tandis qu'elle avoisine les 65°C pour l'organisme seul [16].

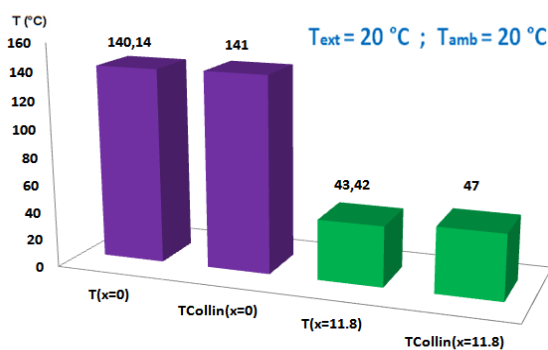


Figure 6 : Histogramme de la température de la couche externe ($x = 0$ mm) et de l'interface épiderme/derme ($T_{E/D}$) ($x = 11,8$ mm)

4.3. Etude biothermique instationnaire

Bien que le flux incident émanant du foyer de l'incendie est quantifié dans sa moyenne, l'accumulation thermique fait qu'une instationnarité existe à l'interface E/D (Figure 7). En effet, les calculs éléments finis révèlent une importante augmentation de la température avant 50 minutes d'exposition aux fumées, et qui franchit le seuil de la brûlure de 1 degré ($\approx 44^\circ\text{C}$) avant 25 minutes. La tendance retrouvée par Collin et al. [16] via des calculs volumes finis est quasiment la même dans l'intervalle [0-15mn]. Les calculs en volumes finis prédisent un régime stationnaire pour la température $T_{E/D}$ après 50 minutes d'exposition, bien que le seuil de brûlure de 1^{er} degré n'est quasiment jamais atteint.

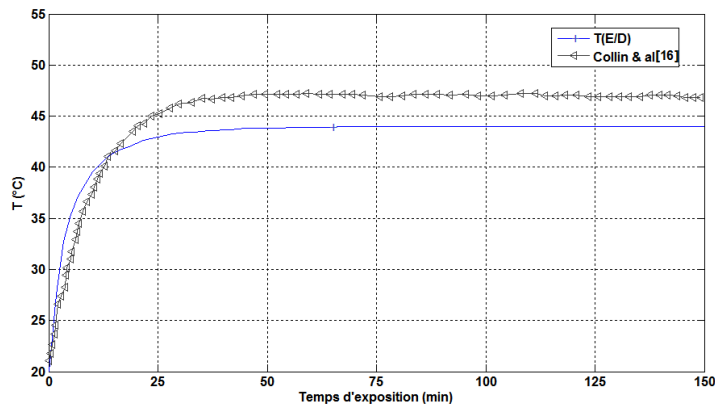


Figure 7 : Evolution temporelle de $T_{E/D}$

4.4 Analyse paramétrique

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 des propriétés thermophysiques.

Dans ce contexte, on commence par analyser l'influence d'une variation de l'absorptivité (ϵ) de la couche de tissu (C1) sur la température de la première couche de peau. En effet, la couche C1 se trouve en directe exposition au flux radiatif des flammes ou des fumées et pourrait voir son absorptivité augmenter en raison d'une perte de teinture ou un dépôt de poussières. Par rapport à la configuration standard ($\epsilon = 0,6$) l'augmentation de l'absorptivité a pour effet, d'abord de faire diminuer la température au niveau (Figure 8) de l'épiderme T_E à moins de 60°C (au lieu de 64°C) puis la température de la couche externe T_{C1} à 120°C (au lieu de 128°C). Cette variation de l'absorptivité n'a pas un grand effet sur le taux de diminution ($\partial T / \partial x$) à travers les couches de tissus, sauf pour la première couche C1, où on note un important changement de pente, par rapport à la configuration standard.

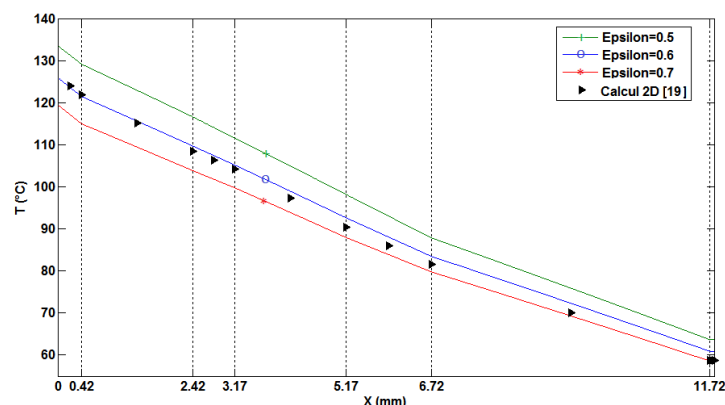


Figure 8 : Profils de température pour différentes absorptivités

Il est à noter que dans la configuration standard, les températures utilisées pour désigner l'air adjacent à la couche C1 (T_{amb}) et le milieu extérieur composé de fumées (T_{ext}) sont toutes prises égales, $T_{amb} = T_{ext} = 20^\circ\text{C}$; cette valeur a été choisie pour pouvoir se comparer aux calculs volumes finis menés par Collin et al. [16]. En situation de flash-over, l'air entourant le pompier peut devenir très chaud, atteignant un seuil $T_{amb} = 200^\circ\text{C}$; alors que l'atmosphère lointaine au pompier peut s'échauffer légèrement en raison de la diffusion des fumées et l'entraînement de l'air frais ($T_{ext} = 60^\circ\text{C}$). Ces deux situations sont schématisées sur la figure 9.

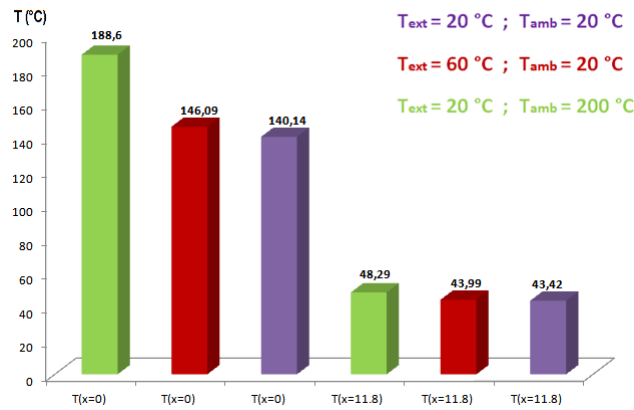


Figure 9 : Histogramme pour le niveau de température ($T_{E/D}$, T_{C1})

5. Conclusion

Cette étude est une investigation numérique de l'ambiance thermique dans l'ensemble tenue-organisme pour un sapeur-pompier. Les modes de transferts conductifs, convectifs et radiatifs ont été utilisés, pour une configuration unidimensionnelle. Le chargement thermique comptabilise le flux radiatif et convectif de la source d'incendie, ainsi que la régulation biothermique imposée par l'organisme. Deux variantes de tenues ont été analysées. La première est constituée de trois couches de textiles et d'une seule couche d'épiderme, sur laquelle on impose une condition de convection. La deuxième variante est constituée de trois couches de textiles, suivies de toutes les couches de l'organisme.

Des tentatives orientées vers l'allègement de la tenue et l'amélioration de la manœuvrabilité d'un pompier sont envisagées, via des calculs numériques qui sont sensés se faire sur des modèles de tenues bicouches, avec des propriétés thermiques, judicieusement choisies.

Nomenclature

Symbole Nom, unité

C_p	capacité calorifique à pression constante, $J/kg.K$
h	coefficient d'échange convectif avec le milieu ambiant, $W/m^2.K$
h_c	coefficient de transfert convectif avec l'humidité, $W/m^2.K$
h_r	coefficient d'échange radiatif équivalent, $W/m^2.K$
HR_{air}	humidité relative de l'air, %
P_{sat}	pression de vapeur saturante, kPa
Q_{ech}	flux net échangé entre l'épiderme et la face arrière de la couche C3, W/m^2
q_r	densité surfacique du flux radiatif reçu provenant du foyer de l'incendie, W/m^2
T	Température, K
W	débit massique, kg/s
W_p	taux d'humidité sur la peau, %
w_s	taux de perfusion, s^{-1}

Symboles grecs

ϵ_{C1}	coefficient d'absorption de la couche C1
δ	épaisseur, mm
λ	conductivité thermique, $W/m.K$
ρ	masse volumique, kg/m^3

Exposant, Indices

amb	ambiante
art	artérielle
C1	première couche de la veste
E	épiderme
ext	quantité relative au ciel
met	métabolisme
mn	minute
p	peau

r radiatif
s sang
sat saturation

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 A11N01UN020120150001.

Références

- [1] D. A. Torvi, Heat transfer in thin fibrous materials under high heat flux conditions, *Ph.D. Thesis, University of Alberta*, Edmonton, Alberta, Canada, 1997.
- [2] G.W. Song, Modeling Thermal Protection Outfits for Fire Exposures, North Carolina State University, USA, 2002.
- [3] J. Li, M. Tian, Personal thermal protection simulation under diverse wind speeds based on life-size manikin exposed to flash fire, *Applied Thermal Engineering*, 103, 1381–1389, 2016.
- [4] Z. Wang, J. Li, M. Tian, CFD Simulation of Flame Manikin Test for Fire Proof Garment during Flash Fire Exposures and Cooling Phase, *5th International Conference on Education, Management, Information and Medicine (EMIM)*, 2015.
- [5] Y. Wang, Z. Wang, X. Zhang, M. Wang, J. Li, CFD simulation of naked flame manikin tests of fire proof garments, *Fire Safety Journal*, 71, 187–193, 2015.
- [6] S. Mandal, G. Song, Modeling of thermal protective performance of commercial woven fabric using artificial neural network. Paper presented at: *9th International Meeting for Manikins and Modeling*. (9I3M); Tokyo, Japan, 21–24 August 2012.
- [7] A.G. Gaydon, *The Spectroscopy of Flames*, Second ed., Chapman and Hall, London, 1974.
- [8] Collin A. et al., Study on visible-IR radiative properties of personal protective clothing for firefighting, *Fire Safety Journal*, Vol.71, 9-19, 2015.
- [9] A. Ghazy, J.B. Donald, Influence of the air gap between protective clothing and skin on clothing performance during flash fire exposure, *Heat Mass Transfer* 47 (10), 1275–1288, 2011.
- [10] S. Mandal, G. Song, Characterization of protective textile material for thermal hazard. Paper presented at: *Fiber Society Spring Conference*, Kowloon, Hong Kong, 23–25 May 2011.
- [11] R. Nayak, S. Houshyar, R. Padhye, Recent trends and future scope in the protection and comfort of fire-fighters' personal protective clothing, *Fire Science Reviews*, 2014.
- [12] E. Onofrei, S. Petrusic, G. Bedek, D. Dupont, and D. Soulat, Study of Heat Transfer Through Multilayer Textile Structure Used in Firefighter Protective Clothing, *13th Autex World Textile Conference*, Dresden, Germany, May 22nd to 24th 2013.
- [13] H.H. Pennes, Analysis of tissue and arterial blood temperatures in resting human forearm. *Journal of Applied Physiology*, Vol. 1: 93–122, 1948.
- [14] S. Weinbaum, L. Jiji, A new simplified bioheat equation for the effect of blood flow on local average tissue temperature. *ASME Trans. J. Biomech. Eng.*, 107:131–141, 1985.
- [15] E. Y. K. Ng & L. T. Chua, Prediction of skin burn injury. Part 1: numerical modelling, *Proc.Inst. Mech. Eng. Part H: J. Eng. Med.* 216, 157–170, 2002.
- [16] A. Collin, Z. Acem et al., Etude du transfert de chaleur au sein de tenues de protection de sapeurs-pompiers, *21^{ème} Congrès Français de Mécanique (CFM)*, Bordeaux, 2013.
- [17] T.L. Bergman, A.S. Lavine et al., *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*, Wiley & Sons Publishing, 7^{ème} Edition, NJ, USA, 2011.
- [18] Y. G. Lv, J. Liu, Effect of transient temperature on thermoreceptor response and thermal sensation, *Building and Environment*, Vol.42, 656-664, 2007.
- [19] S. Dahamni, A. Benarous, M. Merzouk, Analyse des transferts thermiques dans une tenue de sapeur-pompier, *Conférence Nationale sur la CFD*, COMENA, Alger, 2016.
- [20] T. Gowrishankar, D. Stewart, G. Martin, J.Weaver, Transport lattice models of heat transport in skin with spatially heterogeneous, temperature-dependent perfusion, *BioMedical Engineering OnLine*, 3, p. 3:42. , 2004.
- [21] J. Huck, Evaluation of heat stress imposed by protective clothing, *First Annual Conference on Protective Clothing*, Clemson University, South Carolina, USA, 1987.