

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE



UNIVERSITE SAAD DAHLAB DE BLIDA 1
FACULTE DE TECHNOLOGIE
DEPARTEMENT DE MECANIQUE

Projet de Fin d'Etudes
Pour l'obtention du Diplôme de Master en
Génie mécanique
Option Energétique

Thème

*Contribution à l'élaboration d'un modèle algébrique pour la
prédiction de la distribution spatiale de la température au sein
d'une tenue de sapeur-pompier*

Proposé et encadré par :
A. Benarous

Réalisé par :
MEDJADJ Chahrazed
CHOUAL Imène

Année universitaire 2018/2019

Dédicace

A ceux qui n'ont jamais cessé de nous encourager

Et de nos soutenir,

A ceux qui leur aide n'avons donné la volonté

D'aller toujours de l'avant,

A nous très chers parents, que Dieu les protège,

A nous merveilleuses familles,

A ceux qui nous donnent de l'amour et de la vivacité

A nous amis,

Nous dédions ce travail.

Remerciements

Louanges au bon Dieu qui nous donné la foi et le courage de mener

À bien ce modeste travail.

Nous adresse notre profonde reconnaissance et nous sincères

remerciements à notre promoteur, Monsieur

*BENARROUS Abdallah, pour son aide, sa
disponibilité, sans lui le travail accompli et Le savoir acquis n'aurait
jamais été possible.*

Il nous fait bénéficier de ces expériences et de ses compétences.

*Merci aux membres du jury, D'avoir pris le temps et le soin de lire ce
rapport.*

*Nous remercions les enseignants du département de génie Mécanique
qui ont participé à développer le niveau de nos d'études.*

*Nous souhaite aussi remercier ici notre famille et notre parents, qui ont
toujours cru en nous et nous ont toujours soutenu et poussé pour que nous
arrivons jusque là*

Imène & Thahrazed

المساهمة في إعداد نموذج جبري للتنبؤ بالتوزيع المكاني لدرجة الحرارة في زي رجال الإطفاء

ملخص

تقترح هذه الورقة نموذجًا لنقل الحرارة في ملابس الحماية لرجال الإطفاء عند التعرض للهب ، في وضع استقراري. الغرض من هذه الدراسة هو التنبؤ بتأثير الحرارة على النسيج السطحي للجلد من خلال حسابات جبرية لمختلف درجات حرارة طبقات لباس رجل الإطفاء. باستعمال برنامج MATLAB، سيتم حل جملة غير خطية من المعادلات الجبرية ، و تقديم تحليلات عن دراسة وسيطية تخص تأثير العوامل الفيزيائية الحرارية للبشرة و للهواء العازل، على حدود تعرض سطح البشرة للاحتراق.

الكلمات المفاتيح: ملابس الحماية لرجال الإطفاء، النقل الحراري، حدود احتراق البشرة، نموذج رياضي جبري.

Contribution à l'élaboration d'un modèle algébrique pour la prédiction de la distribution spatiale de la température au sein d'une tenue de sapeur-pompier

Résumé

Cette contribution propose d'élaborer un modèle pour le transfert de chaleur dans les tenues de protection des pompiers en situation d'incendie stationnaire.

L'objectif principal est la prédiction des effets thermiques sur la surface de la peau, via des calculs algébriques de température sur les différentes couches de tissus.

Des analyses paramétriques sont conduites quant aux effets des propriétés thermophysiques de la peau et des couches d'air aux interfaces, sur le seuil de brûlure en surface de peau.

Mots-clés : Tenue de protection pour pompiers ; Transfert thermique ; Seuil de brûlure en surface de peau ; Modèle algébrique.

Contribution to the elaboration of an algebraic model for spatial distribution of the temperature in a firefighter's garment

Abstract

This contribution aims to provide a model for the heat transfers within a firefighter garment, subjected to a stationary heat release rate. The main objective is the prediction of the thermal injury limits, using algebraic calculations within several tissues layers. Parametric analyses are performed to deal with thermo-physical properties on the burning threshold.

Keywords: Firefighters protective clothing, Heat transfer, Burning threshold, Algebraic model

Sommaire

La liste des figures

La liste des tableaux

Nomenclature

Introduction générale	4
Chapitre 1 : Etude technologique sur les équipements	4
1.1-Introduction.....	4
1.2- Description générale de l'incendie et de ses effets thermique.....	4
1.2.1- Effets du feu et stades de développement.....	4
1.2.1.a- Les feux sans flammes.....	5
1.2.1.b- Les feux en cours de développement.....	5
1.2.1.c- Les feux mal ventilés.....	6
1.2.1.d-Les feux post-Flashover.....	6
1.2.2-Effets thermiques du feu sur les personnes.....	7
Effets du flux thermique radiatif	8
1.3- Aspect technique liés à la confection des EPI.....	8
-Le rythme cardiaque.....	8
- La température de l'interface Homme-environnement.....	8
- La posture, l'activité.....	9
1.4-Propriétés des tissus.....	9
1.5-Seuils de vulnérabilité de brulure	14
1.5.1- Pompiers.....	14
1.5.2- Physiopathologie.....	14
1.5.3- Mécanismes.....	15
1.5.3.1-Les brûlures thermiques.....	15
a) Par contact.....	15
b) Par flamme.....	15
c) Par rayonnement.....	15
1.5.3.2-Les brûlures chimiques.....	15
1. 5.3.3- Les brûlures électriques.....	15
1.5.4-Profondeur.....	16
1) premier degré.....	16

2) deuxième degré.....	16
3) troisième degré.....	17
Conclusion	18
Chapitre 2 : Etude bibliographique et formulation numérique	19
2.1 Introduction.....	19
2.2 Etude bibliographique sur les transferts thermiques peau-tenue.....	19
2.2.1 L'étude de Pennes.....	20
2.2.2 Les étude de Collin.....	21
2.2.3 Les autres études.....	22
2.3 Formulation des bilans thermiques.....	24
2.3.1 Modélisation mathématique en absence de conduction dans les lames d'air.....	24
2.3.1.1 Bilan thermique sur la couche (1).....	25
2.3.1.2 Bilan thermique sur la couche (2).....	26
2.3.1.3 Bilan thermique sur la couche (3).....	27
2.3.1.4 Equation de bilan thermique sur la couche de peau.....	29
Récapitulatif des équations de Bilan: (cas sans conduction dans les lames d'air)	30
2.3.2 Modèle mathématique en présence de conduction dans les lames d'air	31
2.3.2.1 Bilan thermique sur la couche (1)	31
2.3.2.2 Bilan thermique sur la couche (2).....	32
2.3.2.3 Bilan thermique sur la couche (3)	34
2.3.2.4 Equation de bilan thermique sur la couche de peau.....	35
Récapitulatif des équations de bilan.....	36
Conclusion	37
Chapitre 3 : application à un spécimen de tenue à trois couches de tissu	38
3.1 Introduction	
3.2 Modèle géométrique et conditions aux limites.....	38
3.3 Les cas de référence (Baseline).....	40
3.3.1 Modèle sans réflectivité, sans conduction dans les lames d'air.....	40
3.3.2 Modèle sans réflectivité, avec conduction dans les lames d'air.....	52

Conclusion..... 72

Conclusion générale..... 73

Annexe

Références bibliographique

- [1] 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* Vol. 276 (2014) 383–392.
- [2] Benaros A., "Analyse des transferts thermiques dans une tenue de sapeur-pompier" conférence Nationale sur la CFD, COMENA, Alger, mai 2016.
- [3] Collin A., Acem Z. et al, "Etude du transfert de chaleur au sein de tenues de protection de sapeurs-pompier " (2013), 21ème Congrès Français de Mécanique (CFM), Bordeaux, France.
- [4] Collin, A, Acem, Z., Pinson, S., Pageaux, J., Jannot, Y., Magnolini, F., Charette, H. 2013 "Caractérisation thermique des tenues de sapeurs-pompier". Congrès Français de Thermique Gérardmer, 28-31 mai 2013.
- [5] Collin A. et al. "Study on visible-IR radiative properties of personal protective clothing for firefighting", *Fire Safety Journal*, Vol.71, (2015), 9-19.
- [6] Jannot Y., Degiovanni A., Payet G., "Thermal conductivity measurement of insulating materials with a three layers device", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol.52 (2009) 1105-1111
- [7] Y. Jiang , E. Yanai, “ An integrated numerical simulator for thermal performance assessments of firefighter’s protective clothing,” *Fire Safety Journal* 45 (2010) 314–326.
- [8] E. Guillaum, "Effets du feu sur les personnes", synthèse bibliographique, Laboratoire National de métrologie et d'Essais (LNE) de Trappes, juillet 2006.
- [9] Tayeballah F., "Simulation des transferts thermiques au sein des tenues de protection des sapeurs-pompier", Mémoire de Master en génie mécanique (2015), Université Hassiba Benbouali de Chlef.
- [10] Conception et développement de capteurs et vêtements intelligents pour le suivi et la protection des pompiers : mesures thermiques non-invasives ambulatoires
- [11] (<http://www.gtwm.gatech.edu/index/figure1.html>) développé par l’université Geogia Tech, au centre le SmartShirt de Sensatex™ et a droite le systèmeLifeShirt.]
- [12] Nicolas Petitpierre, Pierre Allemann, Léonard Mossaz, Nicolas Buchs.2002
Les Brûlés : une approche pluridisciplinaire.
- [13] Pennes, H.H. 1948 Analysis of tissue and arterial blood temperatures in resting human forearm. *J. of Applied Physiology* 1 93-122.
- [14] N. Museux, "Expertise biothermique de matériaux soumis à des rayonnements infrarouges

intenses : De l'identification paramétrique à l'évaluation des risques de brûlure", Thèse de Doctorat, Ecole doctorale :Sciences et Technologies de l'Information et Mathématiques, mars 2011.

[15] Stoll & Chianta, (1971) heat transfert through fabrics as related to termal injury transsactions of the new york academy of sciences.33(4).649-669, The textile institute book series

[16] Huck, J 1987 Evaluation of heat stress imposed by protective clothing. First annual Conference on protective clothing, Clemson University

[17] M'Rabih R. Simulation numérique des transferts thermiques dans un modèle de tenue pour sapeurs-pompiers, Rapport de stage M2 Mécanique et Energétique (2016),), Université Hassiba Benbouali de Chlef.

[18] Powell, M. J. D., «Un sous-programme de Fortran pour la résolution de systèmes d'équations algébriques non linéaires», Numerical methods for nonlinear algebraic equations, Editions., P. Rabinowitz, Ch.7, NY, USA, 1970

Tableau 1.1: Principaux éléments intégrés dans l'équipement ProeTEX [10]	12
Tableau 1.2: Eléments intégrés dans le prototype ProeTEX 3de tee-shirt [10]	13
Tableau3.1 : les valeurs de l'épaisseur de tissu.....	39
Tableau3.2 : les valeurs de l'épaisseur des lames d'air Condition aux limites.....	39
Tableau3.3 : Les propriétés Des tissus, la peau, l'ambiance extérieure (∞).....	40
Tableau3.4 : la variation de température de la première couche de tissu vers la peau et l'Absorptivité et la Transmissivité des couches de tissu et de la peau	40
Tableau3.5 : la variation de température de la première couche de tissu vers la peau et l'Absorptivité et la Transmissivité des couches de tissu et de la peau	42
Tableau3.6 : la variation de température de la première couche de tissu vers la peau et l'Absorptivité et la Transmissivité des couches de tissu et de la peau	43
Tableau3.7 : la variation de température de la première couche de tissu vers la peau et l'Absorptivité et la Transmissivité des couches de tissu et de la peau.....	44
Tableau3.8 : la variation de température de la première couche de tissu vers la peau et l'Absorptivité et la Transmissivité des couches de tissu et de la peau	46
Tableau3.9 : la variation de température de la première couche de tissu vers la peau et l'Absorptivité et la Transmissivité des couches de tissu et de la peau	50
Tableau3.10: l'Absorptivité et la Transmissivité des couches de tissu et de la peau.....	52
Tableau3.11 : la variation de température de la première couche de tissu vers la peau.....	53
Tableau3.12 : la variation de température de la première couche de tissu vers la peau.....	53
Tableau3.13 : la variation de température de la première couche de tissu vers la peau.....	54
Tableau3.14 : la variation de température de la première couche de tissu vers la peau.....	55
Tableau3.15 : la variation de température de la première couche de tissu vers la peau.....	57
Tableau3.16 : la variation de température de la première couche de tissu vers la peau.....	58
Tableau3.17 : la variation de température de la première couche de tissu vers la peau.....	59
Tableau3.18 : la variation de température de la première couche de tissu vers la peau.....	59
Tableau3.19 : la variation de température de la première couche de tissu vers la peau.....	61
Tableau3.20 : la variation de température de la première couche de tissu vers la peau.....	62
Tableau3.21 : la variation de température de la première couche de tissu vers la peau.....	62
Tableau3.22 : la variation de température de la première couche de tissu	

vers la peau.....	63
Tableau3.23 : la variation de température de la première couche de tissu vers la peau.....	65
Tableau3.24 : la variation de température de la première couche de tissu vers la peau.....	66
Tableau3.25 : la variation de température de la première couche de tissu vers la peau.....	66
Tableau3.26 : la variation de température de la première couche de tissu vers la peau.....	67
Tableau3.27 : la variation de température de la première couche de tissu vers la peau.....	69
Tableau3.28 : la variation de température de la première couche de tissu vers la peau.....	69
Tableau3.29 : la variation de température de la première couche de tissu vers la peau.....	70
Tableau3.30 : la variation de température de la première couche de tissu vers la peau.....	71

La liste des figures

Figure 1.1 Courbes de développement du feu [9].....	6
Figure 1.2 : Vêtements intelligents destinés au monitoring des fonctions vitales, à gauche le Wearable Motherboard[11].....	9
Figure 1.3 : Prototype développé dans le cadre du projet européen WEALTHY, à gauche[a] et tee-shirt instrumenté du projet VTAMNà droite[b][11].....	9
Figure 1.4 : Vue d'ensemble du projet ProeTEX. Les capteurs (fluxmètres, électrodes pour l'ECG, capteurs de gaz, etc.), batteries et module d'acquisition et de communication sont intégrés dans les vêtements : veste, tee-shirt et bottes [10].....	10
Figure 1.5 : Prototype ProeTEX 3 de tee-shirt. A gauche le tee-shirt de la sécurité civile, conçu en fibres Synthétiques élastiques. A droite, le tee-shirt des pompiers, confectionné en coton. Seule la partie Intégrant les électrodes est élastique pour améliorer les contacts entrés électrodes et la peau [11].....	12
Figure 1.6 :(à gauche) Prototype ProeTEX 3 de veste3 de veste.le modèle sécurité civile...	13
Figure 1.6 :(à droite), Prototype ProeTEX le modèle pompier.....	13
Figure 1.7 : Coupe cutanée montrant les différents niveaux de profondeur, à noter le 4e degré anglo-saxon (tirée de Grabb and Smith Plastic Surgery)[12].....	15
Figure 1.8 : Brûlures du deuxième degré : superficielles sur le bras;et profondes sur l'avant-bras et sur l'image de droite[12].....	16
Figure 1.9 : Brûlure du troisième degré avec zones de bourgeonnement [12].....	17
Figure2.1 : Schéma de la veste et des différents échanges thermiques lors d'un flux imposé [12]	19
Figure2.2 : Schéma de la veste, de la peau et de leurs différents échanges thermiques lors d'un flux imposé [9], [13].....	20
Figure2.3 : Résultats expérimentaux [3].....	23
Figure.2.4 : Résultats numériques [7].....	24
Figure.2.5 : Schéma de la veste.....	29
Figure.2.6 : Schéma de la veste.....	35
Figure.3.1 : Les échanges thermiques entre les différentes couches de la veste à 2couches [4]	38
Figure3.2 : domaine de calcul.....	39
Figure3.3 : courbe de la température (°C) en fonction de la distance axiale (mm).....	41

Figure 3.4: courbe de la température (°C) en fonction de la distance axiale (mm).....	45
Figure 3.5 : histogram represente la variation de la temperature en (°C) entre TC1 et Tpeau et la temperature de bruleur premier degre.....	45
Figure 3.6: courbe de la température (°C) en fonction de la distance axiale (mm).....	47
Figure 3.7: histogram represente la variation de la temperature en (°C) entre TC1 et Tpeau et la temperature de bruleur premier degre.....	47
Figure 3.8: courbe de la température (°C) en fonction de la distance axiale (mm).....	51
Figure 3.9 : histogram represente la variation de la temperature en (°C) entre TC1 et Tpeau et la temperature de bruleur premier degre.....	51
Figure 3.10: courbe de la température (°C) en fonction de la distance axiale (mm).....	53
Figure 3.11: courbe de la température (°C) en fonction de la distance axiale (mm).....	54
Figure 3.12: courbe de la température (°C) en fonction de la distance axiale (mm).....	54
Figure 3.13: courbe de la température (°C) en fonction de la distance axiale (mm).....	55
Figure 3.14: Histogrammes reprisent la variation de la température de peau (°C) en fonction de lambda (W/m K) avec la zone de brûleur de premier degre.....	57
Figure 3.15: courbe de la température (°C) en fonction de la distance axiale (mm).....	58
Figure 3.16: courbe de la température (°C) en fonction de la distance axiale (mm).....	59
Figure 3.17: courbe de la température (°C) en fonction de la distance axiale (mm).....	59
Figure 3.18: courbe de la température (°C) en fonction de la distance axiale (mm).....	60
Figure 3.19: Histogrammes reprisent la variation de la température de peau (°C) en fonction de lambda (W/m K) avec la zone de brûleur de premier degre.....	60
Figure 3.20: courbe de la température (°C) en fonction de la distance axiale (mm).....	61
Figure 3.21: courbe de la température (°C) en fonction de la distance axiale (mm).....	62
Figure 3.22: courbe de la température (°C) en fonction de la distance axiale (mm).....	63
Figure 3.23: courbe de la température (°C) en fonction de la distance axiale (mm).....	64

Figure 3.24: Histogrammes reprisent la variation de la température de peau (°C) en fonction de lambda (W/m K) avec la zone de brûleur de premier degré.....	64
Figure 3.25: courbe de la température (°C) en fonction de la distance axiale (mm).....	65
Figure 3.26: courbe de la température (°C) en fonction de la distance axiale (mm).....	67
Figure 3.27: courbe de la température (°C) en fonction de la distance axiale (mm).....	67
Figure 3.28: courbe de la température (°C) en fonction de la distance axiale (mm).....	67
Figure 3.29: Histogrammes reprisent la variation de la température de peau (°C) en fonction de lambda (W/m K) avec la zone de brûleur de premier degré.....	68
Figure 3.30: courbe de la température (°C) en fonction de la distance axiale (mm).....	69
Figure 3.31: courbe de la température (°C) en fonction de la distance axiale (mm).....	70
Figure 3.32: courbe de la température (°C) en fonction de la distance axiale (mm).....	70
Figure 3.33: courbe de la température (°C) en fonction de la distance axiale (mm).....	71
Figure 3.34: Histogrammes reprisent la variation de la température de peau (°C) en fonction de lambda (W/m K) avec la zone de brûleur de premier degré.....	72

Conclusion générale

Ce projet de fin d'étude, s'intéressait à la prédiction de la distribution stationnaire de la température, à travers un modèle de tenue de protection (E.P.I) pour un sapeur-pompier.

La prédiction passe d'abord par l'élaboration de deux modèles algébriques (avec et sans conduction dans les lames d'air), issus d'un bilan thermique conductif-convectif-radiatif sur l'ensemble tenue-peau.

L'étude a montré que dans le cas où l'on néglige la conduction dans les lames d'air (seules la convection et le rayonnement), la température sur la surface de la peau dépasse le seuil de brûlure (45°C), malgré le changement des propriétés des tissus. En effet, on passe de 89°C pour le cas d'une peau à émissivité $\varepsilon=0,6$ à 58°C pour $\varepsilon=0,98$.

La prise en compte de la conduction dans les lames d'air, permet de prédire une température de 46°C à la surface de peau, pour une situation standard de $\varepsilon=0,6$ ce qui représente une diminution relative de 20%. La contribution d'une forte convection (en sus de la conduction) au niveau de la couche d'air N°3 ($h_{\text{air}3} = 4 \text{ W/m}^2\text{K}$), permet de descendre à 50°C en surface de peau.

En conséquences, il est légitime de conclure que la résistance thermique de l'air aux interfaces, joue un rôle important dans l'isolation de la peau contre les élévations de température. Il serait donc judicieux, de renforcer cette isolation via des techniques qui permettent de donner plus de prépondérance à la convection (air en mouvement) dans la couche d'air en contact direct avec la surface de la peau.

En perspectives, il serait intéressant de persévérer dans ces approches algébriques, en incluant les effets du stress thermique (retour de flux incident) et le changement de phase (sudation) dans la couche d'air (air 3) en contact de la surface de peau.

Nomenclature

ϕ	Flux thermique	w
Gf	Densité du flux thermique	w/ K
T	La température	°C
h	Le coefficient de convection	W °C ⁻¹ m ⁻²
λ	La conductivité thermique du milieu	W m ⁻¹ °C ⁻¹
δ	Epaisseur de la couche	m
e	Epaisseur de la lame d'air	m
σ	La constante de Stefan-Boltzmann qui vaut 5.67.10 ⁻⁸	W. m ⁻² k ⁻⁴
L	Longueur	m
$T_{b,a}$	La température du sang artériel	°C
α	Absorptivité des couches	
τ	Transmissivité des couches	(sans dimension)
ε	Emissivité des différentes couches	(sans dimension)
V	Le taux de perfusion par unité de volume	(sans dimension)
C_b	Chaleur spécifique du sang.	J/kg k
h_b	Le taux de transfert de chaleur par unité de volume du tissu	(sans dimension)
Nu	Nombre de Nusselt	
∞	Ambiant (condition à l'infini, à l'entrée de l'écoulement principal)	(sans dimension)
T_i	La température de l'organisme	°C
T_{inf}	La température ambiante	°C
T_{air}	La température de l'air	°C

En plus des aspects liés à l'évaluation de la résistance au feu des structures et à l'estimation des durées d'évacuation des personnes, l'ingénierie de la sécurité incendie s'oriente vers la caractérisation thermique des équipements de protection individuelle (EPI) pour le personnel d'intervention (sapeurs-pompiers). Exposés à des flux thermiques émanant des foyers de feu et des écoulements de fumées pendant des périodes considérables, ces personnes doivent être équipées de tenues de protection assurant un confort tout en préservant l'intégrité physique contre le chargement thermique du milieu ambiant, mais aussi contre de possibles fluctuations des propriétés thermo-physiques des matériaux de la tenue [1].

Le problème des incendies n'est certes pas nouveau; il reste toujours d'actualité et des catastrophes humaines dues au feu sont là pour nous le rappeler périodiquement. 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 réparation plus importants et une détérioration plus rapide de l'aspect du vêtement [2].

Les sapeurs-pompiers et lors de leurs interventions (secours - à la personne ou lutte contre un incendie), sont vêtus d'équipements de protection individuelle (EPI) qui assurent leur intégrité physique durant ces opérations. Elle se compose d'une veste et d'un sur-pantalon. Pendant de très nombreuses années, le cuir a été utilisé pour confectionner cette veste. Cependant, à la suite de deux évènements tragiques en 2002, en France (4 morts et 1 disparu), il a été décidé de remplacer les vestes en cuir par des vestes en matière textile pour augmenter les niveaux de protection thermique et signalétique [3]. Cette veste est actuellement constituée d'un matériau multicouche (3 ou 4 couches selon les fabricants) composées de polymères qui lui confère des propriétés mécaniques et thermiques particulières ; très résistante mécaniquement aux déchirures, imper-respirant ; elle permet d'évacuer la sueur mais est imperméable à l'humidité extérieure ou toutes autres agressions chimiques et auto-extinguible; elle n'entretient pas une flamme à sa surface [4].

De nombreuses études expérimentales se rencontrent dans la littérature sur la résistance des vêtements de protection au feu. Parmi ces oeuvres, 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.* [5] ont caractérisé séparément les 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.* [6] 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.* [1] 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'embrassement ou d'extinction. Jiang *et al.* [7] 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.* [3] 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 souscouches internes de la peau.

Le présent travail s'inscrit dans le cadre d'une tentative de prédiction du niveau thermique, à travers l'épaisseur de la tenue, allant de la couche externe jusqu'à la première couche de peau. La prédiction émane d'une modélisation algébrique continue – *non discrète* – des transferts couplés; conductifs, convectifs et radiatifs à travers les couches de tissus et aux interfaces tissu-air. Plusieurs niveaux de modélisation servent à élaborer trois modèles thermiquement stationnaires. Les calculs numériques sont entrepris en formulation algébrique via le langage symbolique **MATLAB**[®],

Ce projet se présente en quatre chapitres :

Le premier chapitre est consacré à l'effet thermique de l'incendie, les aspects techniques liés à la confection des EPI, les propriétés thermophysiques des couches de tissus, les effets thermiques du feu sur les personnes et les accidents par brûlures de pompiers.

Le deuxième chapitre présente les bilans thermique sur les couches de tissus et les couches des l'armes d'air, formulation du modèle algébrique

Introduction générale

Le troisième chapitre constitue le travail propre entrepris sur un modèle de tenue à couches, comportant un ensemble de calculs sur des cas de référence (Baseline x), associés à des analyses paramétriques, quant aux effets des paramètres extérieurs, biologique et structurelles sur le niveau thermique, spécifiquement en première couche de peau.

Le mémoire se termine par une conclusion et un ensemble de perspectives.

1.1-Introduction

Le premier objectif des études d'ingénierie de sécurité incendie est la préservation des personnes. Cet objectif consiste à évaluer les risques induits par le feu sur les personnes avoisinantes d'une part en termes d'incapacitation, ce qui sous-entend la préservation de la capacité des personnes évacuer les lieux d'un sinistre par leurs propres moyens, mais aussi en termes de létalité [8].

Les risques liés au feu sur les personnes exposées sont principalement de trois natures :

- la perte de visibilité : elle retarde l'évacuation, désoriente les foules et peut les exposer plus longtemps ou de manière plus importante aux autres effets ;
- les risques thermiques liés au feu et aux fumées : ils peuvent entraîner l'incapacitation ou une létalité au sein des populations. Ils sont liés au flux thermique et à la température ;
- les risques toxiques du feu ; ils sont liés aux espèces chimiques présentes dans les fumées, et sont les plus importants, ils sont incapacitants ou létaux, parfois à des distances considérables des foyers.

A ces facteurs s'ajoute le risque de développement rapide et incontrôlable du feu par flashover. Le risque pour les personnes dépend alors des trois critères suscités, mais le principal danger vient de l'étape rapide que constitue le flash over dans l'incendie.

D'autres effets sur les personnes peuvent s'ajouter, comme l'anoxie liée au manque d'oxygène et les risques d'étouffement liés la présence de particules de suies [9]

1.2- Description générale de l'incendie et de ses effets thermique

1.2.1- Effets du feu et stades de développement

Les effets d'un feu dépendent de son état de développement. Les risques présentés dans l'introduction sont donc fortement corrélés avec le stade de développement du feu.

Les feux peuvent être classés en quatre catégories :

- Le feu couvant ou sans flammes,
- Les feux bien ventilés avec des flammes importantes,
- Les feux mal ventilés,
- Les feux post- flashover.

I.2.1.a- Les feux sans flammes

Les feux sans flammes se produisent si les conditions de ventilation sont insuffisantes, la combustion des matériaux étant incomplète. La fumée dégagée contient alors de nombreux composés organiques et irritants. Les observations suivantes peuvent être faites [9] :

- Une très faible quantité de matériau décomposé peut causer des effets sévères sur les personnes. Par exemple, une exposition pendant une heure à des gaz de pyrolyse présents sous les seuils olfactifs peut conduire à une inflammation pulmonaire, ainsi qu' une intoxication sévère au monoxyde de carbone,

Chaque année, les couvant font, de nombreuses victimes. Le décès est consécutif à une longue exposition aux gaz de combustion sans que la victime ait pu en prendre conscience,

La décomposition des matériaux en milieu sous-oxygène est souvent très lente. Un délai significatif peut s'écouler avant qu'une concentration gazeuse dangereuse soit atteinte.

- Ce sont les personnes endormies qui encourent le plus grand risque. Elles sont tout d'abord, intoxiquées par le monoxyde de carbone. Les gaz irritants provoquant ensuite de sérieux dommages pulmonaires.

I.2.1.b- Les feux en cours de développement

Pour de tels feux, les conditions de décomposition, particulièrement le rapport air/carburant, sont primordiaux et vont déterminer la quantité de gaz toxique dégagée.

A ce stade, les principaux dangers sont la température et le monoxyde de carbone puisque la quantité de gaz irritants est généralement faible. Bien que variable en fonction du combustible considéré. Si le feu devient important, la température s'élève et la quantité d'air nécessaire l'entretien d'une combustion complète devient rapidement insuffisant. La chimie de la combustion s'en trouve alors modifiée et de nouvelles espèces gazeuses peuvent être formées ou la répartition de celles-ci peut évoluer fortement. Le feu est contrôlé par la pyrolyse, puis s'oriente vers un régime conditionné par la ventilation.

Dans le cas d'un feu se déclarant dans un local représentatif d'une pièce d'habitation, renfermant un fauteuil constitué de polystyrène et de polyéthylène, les événements suivants sont :

- Dès la troisième minute, la quantité de fumée présente entrave sérieusement. L'évacuation du fait de l'obscurcissement et de la sensation d'irritation.

- Durant la quatrième minute, la température atteint 220°C. Les personnes ressentent des brûlures sur la peau pouvant conduire à une incapacitation ;

- A la cinquième minute, les gaz narcotiques provoquent une perte de connaissance. Le seuil de douleur due à la chaleur est atteint,

- une personne exposée pendant plus de quatre minutes souffrira de brûlures de la peau et du larynx. Le décès pourra être dû à l'apparition d'un œdème pulmonaire.
- Une personne exposée plus de six minutes, ne survivra pas plus d'une heure après son évacuation.

1.2.1.c- Les feux mal ventilés

A ce stade, la combustion est conditionnée par les conditions de ventilation. La référence [6] présente un exemple d'effet de feu mal ventilé dans une pièce close. Dans ce cas, le taux d'oxygène dans l'air diminue très rapidement. Au-delà d'une minute, il ne permet plus une combustion complète, et une fumée dense, riche en monoxyde de carbone(CO) et autres produits toxiques se dégage. L'atmosphère devient rapidement mortelle. Le décès de deux personnes a ainsi été constaté seulement quelques minutes après le début d'un petit feu survenant dans une pièce close. Une analyse de sang a mis en évidence une dose de carboxyhémoglobine correspondant à seulement 50 % de la dose létale admise. La conclusion tirée est que le décès est survenu suite à un manque d'oxygène. Des essais ont montré que la combustion d'un rideau de 500 g dans un local était à même de produire une atmosphère contenant 10 % d'oxygène et 1% de CO, potentiellement létale en quelques minutes [8]. Les revêtements muraux peuvent contribuer à la propagation du feu en dégageant des produits très toxiques, responsables d'une atteinte irréversible de la santé occupants, ainsi, lors de l'incendie survenu en 1989 { Manchester suite à un accident d'avion, une analyse du sang des victimes a montré que leur décès était imputable au chlorure d'hydrogène produit par la combustion du PVC, utilisé dans de nombreux revêtements [9]

1.2.1.d- Les feux post-Flashover

De tels feux conduisent aux désastres majeurs et font de nombreuses victimes. Un feu post-flashover est pleinement développé et sa vitesse de combustion et sa puissance dégagée sont élevées. Ainsi, la température atteint 1000°C et la quantité de fumée dégagée est importante. Ce type de feu peut conduire à l'envahissement rapide d'un immeuble par la fumée. Dans le cas d'une mauvaise ventilation, l'incendie consomme rapidement tout l'oxygène de l'air, une atmosphère pauvre en oxygène, riche en CO et éventuellement en HCN se forme et se répand. Ces conditions réduisent considérablement les chances de fuite des occupants. Les feux post-flashover dégagent donc, une fumée dense et hautement toxique qui se répand rapidement dans tout le local. C'est elle qui est responsable de la plupart des décès.

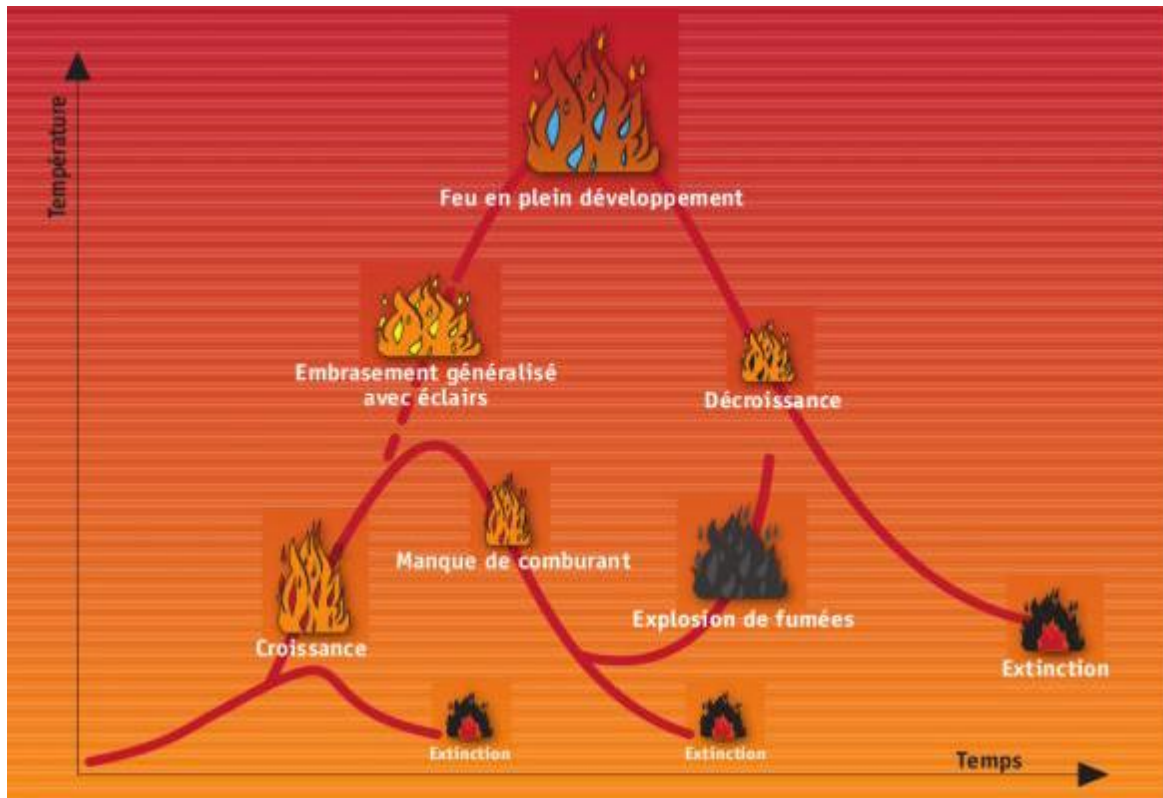


Figure 1.1 Courbes de développement du feu [9]

1.2.2-Effets thermiques du feu sur les personnes

Les effets thermiques du feu sur les personnes ont trois principales origines :

- Un débordement de la thermorégulation qui engendre une élévation de la température corporelle. Comme la fièvre, cette élévation engendre des maux de tête et peut entraîner la mort au-dessus de 42°C. L'évacuation de la chaleur par thermorégulation étant basée sur le principe de l'évaporation de la sueur, l'humidité ambiante est primordiale ;
- Une atteinte des voies respiratoires, caractérisée par un dessèchement ou des brûlures à différents niveaux : gorge, trachée et bronches, alvéoles pulmonaires ;
- Un effet direct sur la peau qui peut être d'origine radiative (flux radiatif incident), sans contact de la peau avec les fumées, ou lié à la convection et au contact des tissus avec les fumées. C'est l'effet qui nous intéresse dans le présent projet. Ces atteintes peuvent être caractérisées par deux grandeurs : le flux thermique incident et la température des fumées. Ces grandeurs peuvent correspondre à deux niveaux de sollicitation :
 - Le niveau de sollicitation thermique suffisant pour brûler la peau et les poumons.

il est comparable à un effet suraigu, c'est-à-dire aux expositions uniques fortes, mais de courte durée ;

- L'exposition pour laquelle l'hyperthermie est suffisante pour causer une dégradation des capacités mentales, diminuant la capacité d'évacuation et de survie. Ce niveau est comparable à un effet subaigu, c'est-à-dire à une exposition unique moyenne, mais prolongée.

Effets du flux thermique radiatif

Le flux thermique radiatif participe aux risques pour les personnes et contribue de manière importante au développement du feu. Avec la température, il présente des risques pour les personnes ; le flux thermique engendre des brûlures directes de la peau en fonction de l'exposition.

Le flux radiatif dépend strictement de la propagation, car il est de nature électromagnétique. Il chauffe donc en priorité les zones corporelles en regard direct avec la source. Ainsi une partie du corps peut être exposée intensément, les autres parties restant dans l'air frais [3].

I.3- Aspect technique liés à la confection des EPI

Les EPI conçues sont de nouvelles tenues, constituées d'une veste, d'un tee-shirt et de bottes, et équipées de systèmes de monitoring ambulatoires qui permettent d'effectuer, de façon autonome, le suivi de l'état de santé du secouriste, des paramètres environnementaux et comportementaux. Le support textile a été choisi pour que le pompier ou le secouriste n'ait pas s'occuper du positionnement des capteurs et ne perde pas de temps dans sa préparation. Cette solution, qui permet de maintenir l'efficacité et la rapidité de l'intervention, impose des contraintes liées au textile «intelligent » lui-même. La difficulté majeure de l'utilisation de textiles instrumentés pour l'évaluation des paramètres physiologiques est le contact des capteurs avec le corps du sujet. Les matériaux employés devront permettre d'obtenir une mesure de qualité suffisante pour évaluer l'état de santé du pompier tout en respectant les contraintes réglementaires en vigueur pour les tenues de secouriste, notamment la nature du textile ou encore leur « lavabilité ». Le monitoring de l'état de santé du secouriste a été abordé sous une approche multiparamétrique afin de procéder à une surveillance à deux niveaux : au niveau du corps pour les paramètres physiologiques et au niveau de l'interface avec l'environnement pour les paramètres environnementaux et comportementaux.

-Le rythme cardiaque, le rythme respiratoire et la température centrale sont les principaux paramètres physiologiques qui font l'objet d'un suivi à partir du tee-shirt.

- **La température de l'interface Homme-environnement** ainsi que les échanges thermiques, Les concentrations de monoxyde de carbone et de dioxyde de carbone sont mesurées depuis la veste et les bottes.

- **La posture, l'activité** (marche ou immobilité) et la position sont les trois paramètres comportementaux dont le monitoring est assuré grâce aux tenues. Pour cela, des capteurs, modules d'acquisition et de communication et une batterie sont Intégrés aux équipements.

Dans le cadre de ce programme, les partenaires du consortium ont conçu et développé de nouveaux capteurs pour la mesure de l'ECG (électrode textile), pour la mesure de la température interne ou encore pour estimer la posture du secouriste. Les paramètres thermiques constituent une source d'informations importantes pour l'évaluation de l'état physiologique des secouristes, mais aussi pour apprécier la dangerosité de l'environnement dans lequel ils évoluent. Dans le cas du pompier, la connaissance de ces paramètres thermiques est primordiale. L'environnement peut exercer une très forte contrainte thermique sur le pompier entraînant une augmentation de sa température interne. De plus, sa tenue, qui joue le rôle de protection vis-à-vis de l'extérieur, ne lui permet pas d'évacuer la chaleur accumulée. Par conséquent, il peut être sujet à des pathologies telles le coup de chaleur

I.4-Propriétés des tissus

Les tissus multifonctionnels peuvent intégrer capteurs, actionneurs, modules électroniques et batteries [10]. C'est le cas du "Wearable Motherboard" développé par Georgia Tech (Figure 1.2), un tee-shirt intelligent sur lequel peuvent être connectés des dispositifs commerciaux : capteurs pour le monitoring de fonctions vitales telles que le rythme cardiaque, le rythme respiratoire, l'électrocardiogramme, l'oxymétrie de pouls et la température cutanée pour les versions récentes. Le monitoring de signes vitaux tels que la fréquence cardiaque, la respiration ou la température corporelle peut être réalisé à partir de textiles dans lesquels des fibres optiques entrelacées sont tissées. Cette technologie a été proposée par l'Université Drexel de Philadelphie, et par SensatexTM qui produit le SmartShirt, un dispositif basé sur des technologies similaires et déjà disponible sur le marché (Figure 1.2), VivoMetrics a conçu le LifeShirt [11] (Figure 1.2), un système de monitoring des paramètres physiologiques qui se présente sous la forme d'une veste en lycra ou d'une ceinture dotée de capteurs. Le dispositif est basé sur la mesure de pléthysmographie inductive, la mesure de l'ECG avec des électrodes conventionnelles et un accéléromètre deux axes pour la détection des mouvements Ce système est utilisé aux Etats-Unis par certaines brigades de pompiers et de militaires.

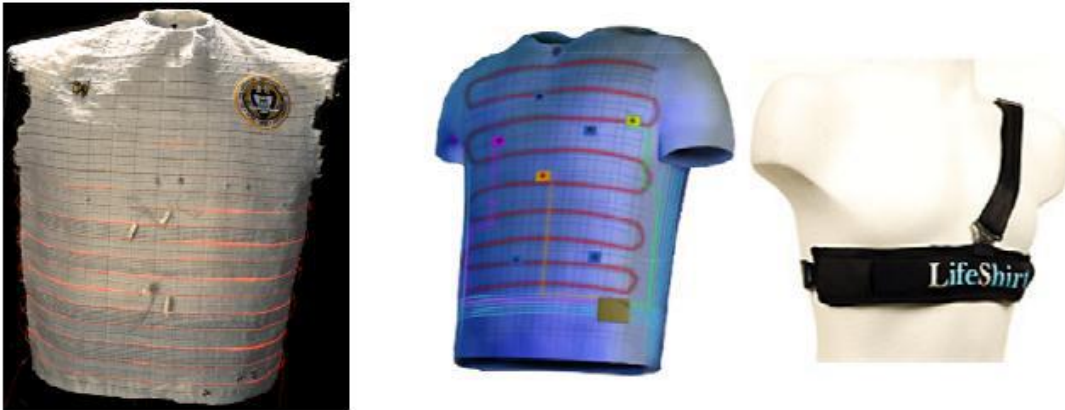


Figure 1.2 : Vêtements intelligents destinés au monitoring des fonctions vitales, à gauche le Wearable Motherboard [11]

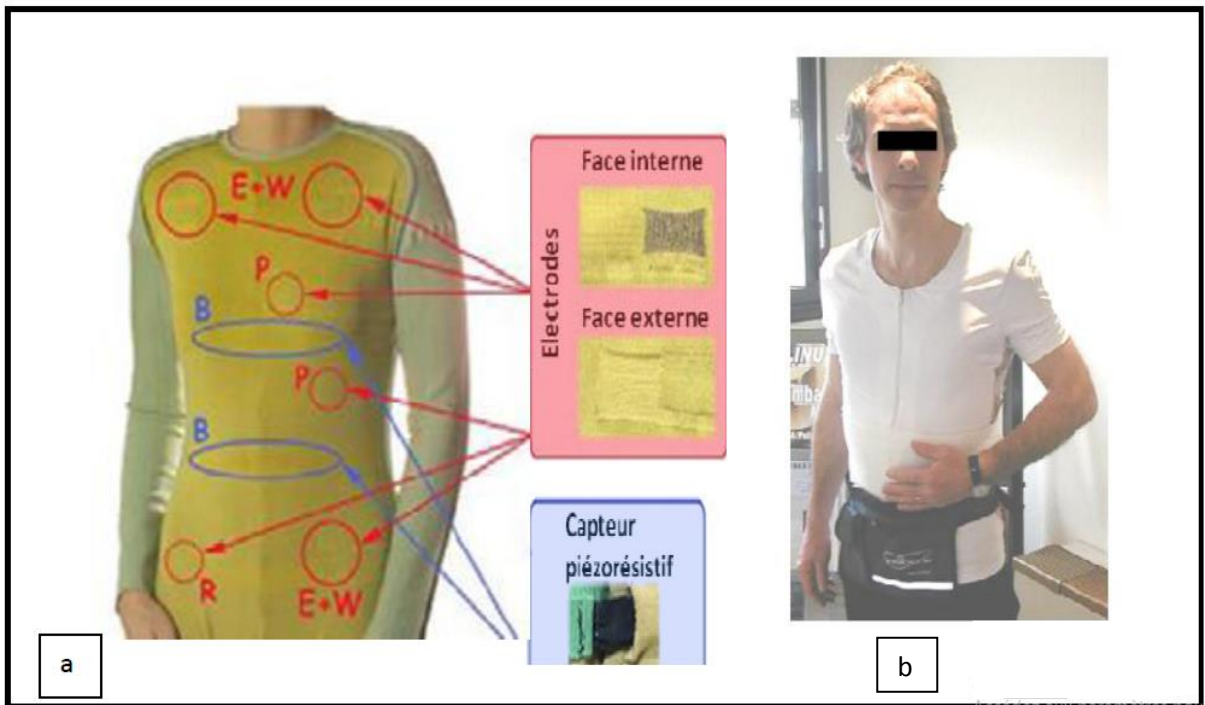


Figure 1.3 : Prototype développé dans le cadre du projet européen WEALTHY, à gauche[a] et k, tee-shirt instrumenté du projet VTAMN à droite[b] [11]

D'autres dispositifs intégrés ont été conçus afin d'assurer le monitoring des signaux physiologiques et/ou comportementaux. Dans le cadre du projet VTAMN (Vêtement de Télé Assistance Médicale Nomade), un tee-shirt intégrant des capteurs de respiration, de température, des électrodes pour l'ECG et un capteur de chute a été développé (Figure 1.2). Smartex, a conçu une combinaison instrumentée (Figure 1.2) capable de mesurer les signaux physiologiques tels que l'ECG, la respiration et l'indice d'activité dans le cadre du projet européen WEALTHY,

dans lequel l'INSA était partenaire. Pandian et Coll ont mis au point la SmartVest, un tee-shirt dédié au monitoring ambulatoire de signes vitaux [10]. Ces dispositifs de monitoring intègrent des modules de communication qui permettent de transmettre l'information vers un PC ou un centre spécialisé.

Equipements de Protection Individuelle ProeTEX Les nouveaux EPI, développés par le consortium du programme ProeTEX, sont constitués d'une veste, d'un tee-shirt et de bottes. Des capteurs, modules d'acquisition et de communication, batteries, GPS ... sont intégrés aux différents éléments de la tenue afin d'assurer un monitoring continu des paramètres vitaux du secouriste et de son environnement (Figure 1.3). Les informations collectées sont alors envoyées via une liaison Wifi sur un ordinateur au poste de commandement. L'intégration de voyants lumineux dans la veste est également prévue afin de faciliter le repérage en cas d'intervention en milieu sombre. Ces nouveaux équipements permettront de porter plus facilement assistance aux secouristes en danger.



Figure 1.4: Vue d'ensemble du projet ProeTEX. Les capteurs (fluxmètres, électrodes pour l'ECG, capteurs de gaz, etc.), batteries et module d'acquisition et de communication sont intégrés dans les vêtements : veste, tee-shirt et bottes. [10]

Le programme ProeTEX regroupe 23 partenaires de domaines différents (textile, capteur, électronique, sécurité civile, pompier...) afin de répondre au mieux au défi posé par la conception de ces nouveaux équipements instrumentés. Le Tableau 1.2 présente les principaux éléments intégrés ainsi que les partenaires responsables de leurs développements. Trois générations de prototypes ont été réalisées dans le cadre de ProeTEX. Les prototypes ProeTEX3

des deux équipements sont représentés (figure 1.4), pour le tee-shirt, et (figure 1.5), pour la veste. Le tee-shirt est également composé d'une ceinture détachable dans laquelle l'électronique est intégrée. Cette ceinture électronique permet de communiquer les valeurs des paramètres enregistrés dans le tee-shirt vers la veste via une liaison sans fil.

Tableau 1.1 : Principaux éléments intégrés dans l'équipement ProeTEX [10].

Vêtement	Modules/Fonction	Partenaire
Veste	Capteurs de température externe	CSEM, INSA Lyon
	Capteurs de flux thermique	INSA Lyon
	Capteurs de position	UNIFI
	Capteurs de gaz toxique	DCU
	Antenne textile	U-Gent
	Antenne textile	CSEM/Zarlink
	Batteries	CEA
Tee-shirt	Paramètres cardiaques (ECG, rythme cardiaque)	UNIFI, Intelesens, U-Gent, Smartex
	Capteurs de respiration	UNIFI, Smartex
	Capteurs de température interne	INSA Lyon
	Capteurs de déshydratation	CEA
Bottes	Capteurs d'activité	INFM
	Capteurs de CO2	DCU

Deux types d'équipement ont été développés au cours de ce projet : des équipements spécifiques aux pompiers et des équipements destinés à la sécurité civile. Les besoins et les Contraintes réglementaires (matériaux utilisables) pour ces deux populations de secouristes n'étant les mêmes, les deux catégories de prototypes n'intègrent pas les même capteurs. Ainsi, le prototype de la sécurité civile ne possède pas de fluxmètre. Les tenues développées répondent aux contraintes d'entretien des tenues actuelles. Le tee-shirt doit pouvoir être lavé régulièrement. Quant à la veste, elle est actuellement nettoyée une à deux fois par an, phase pendant laquelle un produit de traitement anti-feu est appliqué par des professionnels tels que Brunet-Lion, partenaire du projet. Concernant les tee-shirts, ils sont lavables car intégrant des capteurs textiles (électrodes de mesure de l'ECG en INOX) ou des capteurs rendus imperméables par encapsulation (capteur de température interne). L'électronique est quand elle intégrée dans une ceinture détachable. Les vestes, elles sont actuellement nettoyées une à deux fois par an

(contrainte budgétaire). Lors de cette opération, un produit de traitement anti-feu doit être appliqué. Pour la phase d'entretien, il est prévu que les capteurs soient alors retirés de la veste puis réintégrés dans les poches prévues à cet effet.



Figure 1.5 : Prototype ProeTEX 3 de tee-shirt. A gauche le tee-shirt de la sécurité civile, conçu en fibres Synthétiques élastiques. A droite, le tee-shirt des pompiers, confectionné en coton. Seule la partie intégrant les électrodes est élastique pour améliorer les contacts entrés électrodes et la peau [10].

Tableau 1.2 : Eléments intégrés dans le prototype ProeTEX 3 de tee-shirt [10].

Modèle	Sécurité Civile	Pompier
Tee-shirt	Capteur de Na+ Electrodes ECG Température interne	Capteur de Na+ Capteur de SpO2 Electrodes ECG Température interne
Ceinture	Capteur piézoélectrique pour la respiration Electronique	



Figure 1.6 :(à gauche) Prototype ProeTEX 3 de veste de sécurité civile

Figure I.6 :(à droite), Prototype ProeTEX le modèle pompier

Les deux modèles n'intègrent pas tous les capteurs :

- 1 – Alarme visuelle(x1 dans le modèle pompier, x2 dans le modèle de la sécurité civile),
- 2– Alarme acoustique,
- 3 – Capteur de température externe,
- 4 – Module Wifi,
- 5 – Module d'acquisition,
- 6 – Accéléromètre (x2),
- 7 – GPS,
- 8 – Antenne textile (x2),
- 9 – Batterie flexible,
- 10 – Capteur de CO,
- 11 – Fluxmètre (modèle pompier).

1.5-Seuils de vulnérabilité de brûlure

1.5.1- Pompiers

Les pompiers, de part le fait de leur métier et de leur champ d'action, sont très impliqués dans la prise en charge du brûlé, notamment dans les cas d'incendie. Ils sont d'ailleurs très régulièrement les premiers à intervenir sur le patient brûlé. De plus, le SDIS possède au sein des casernes plusieurs ambulances, à même de prendre en charge le patient brûlé.

1.5.2- Physiopathologie

La brûlure est un traumatisme initialement local, mais ce phénomène devient rapidement général.

1.5.3- Mécanismes

Les mécanismes conduisant à une brûlure sont extrêmement variés. Mais on les regroupe en trois catégories : les brûlures thermiques, chimiques et électriques.

1.5.3.1-Les brûlures thermiques

Ce sont les plus fréquentes, représentant un peu plus de 90% des blessures. Elles peuvent être de contact, par flamme, par rayonnement :

a) Par contact

Soit solide (braise, fers chauds...), limitée en superficie, mais souvent profonde (plus le temps est long) ; soit liquide (eau bouillante, huile...), plus étendue, et moins profonde, très fréquente chez l'enfant.

b) Par flamme

Dues soit aux hydrocarbures enflammés (lésions étendues et profondes) ; soit à l'explosion de gaz ou de vapeur d'essence (lésions en mosaïque de zones profondes et superficielles). Si elles se passent dans un lieu clos (maison, voiture), elles impliquent fréquemment des lésions d'inhalation ou des brûlures respiratoires.

c) Par rayonnement

Essentiellement dues aux rayons UV du soleil. Elles peuvent être aggravées par des agents photo sensibilisants (mélaminée...). Elles sont très étendues, peu profondes. Une autre cause demeure les rayons X ou autres rayons nucléaires.

1.5.3.2-Les brûlures chimiques

Soit par l'acide (limitées en étendue et de profondeur moyenne si on les a lavées précocement), cependant les lésions {l'acide fluorhydrique sont à mettre à part (profonde, devant être traitée par chélation de l'agent causal par du gluconate de calcium) ; soit par une base (d'emblée profondes, évolutives, plus graves)

1. 5.3.3- Les brûlures électriques

Les lésions sont toujours très profondes. Le point d'entrée, parfois minuscule, cache la véritable lésion, souvent musculaire. Une brûlure est causée par un transfert d'énergie entre une source de chaleur et le corps humain. Si l'absorption de chaleur est supérieure { sa dissipation, la température intracellulaire va augmenter. Le point critique se situe à 440C. Au-dessous, il n'y aura pas de lésions. Entre 44 et 510 °C, il y destruction de l'épiderme, tandis que > 600°C, il se produit une coagulation des protéines. Ainsi, le refroidissement immédiat de la brûlure a pour effet d'atténuer la douleur, de limiter la destruction cellulaire, d'améliorer le pourcentage de revascularisation en limitant les lésions des capillaires.

1.5.4-Profondeur

Il existe trois degrés pour classifier la profondeur de la brûlure. Cependant, sur le plan chirurgical, il est plus logique et plus facile de séparer les brûlures en deux catégories : les superficielles (premier et deuxième degré superficiel) et les profondes (deuxième profond et troisième degrés) (figure 1. 7).

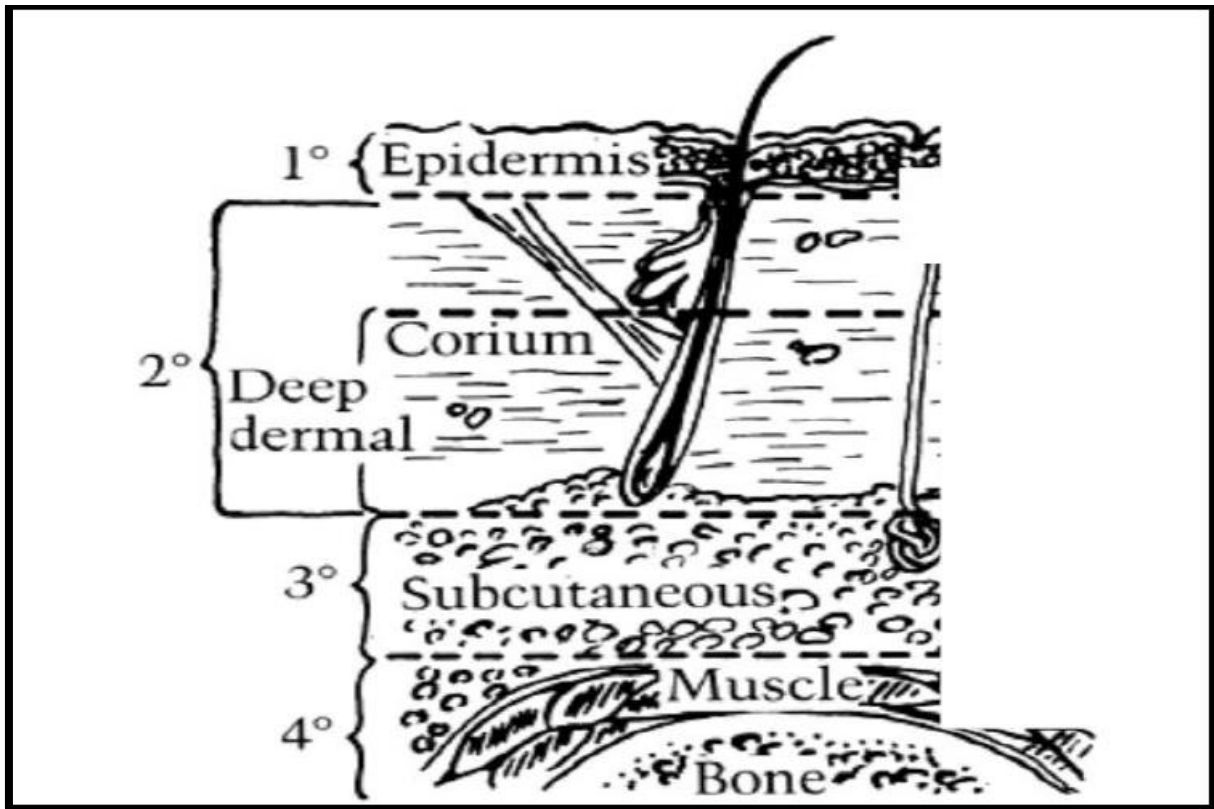


Figure 1.7 : Coupe cutanée montrant les différents niveaux de profondeur, à noter le 4e degré anglo-saxon (tirée de Grabb and Smith Plastic Surgery).[12]

1) Premier degré

Atteinte des couches superficielles de l'épiderme. Il s'agit d'un érythème douloureux (coup de soleil). La douleur, due à la libération de prostaglandines, disparaît en 72 heures. L'évolution se fait spontanément, avec une guérison en 4 {5 jours, avec une légère desquamation

1) Deuxième degré

On les divise en deux stades : superficiel et profond (appelé aussi stade intermédiaire, car il peut évoluer vers le troisième degré) (figure 1.8). a) Superficiel La brûlure atteint les couches profondes de l'épiderme, sans toucher la jonction dermo-épidermique (lame basale). La libération de substances vaso-actives entraîne un exsudat avec décollement

des couches superficielles, créant une phlyctène rempli de sérum. Sous la phlyctène, la peau est rosée. La lésion est douloureuse et cicatrise en moins de 10 jours, sans séquelles

b) Profond La jonction dermo-épidermique est partiellement atteinte, avec effraction plus ou moins complète de la lame basale. La douleur est importante. La lésion saigne.



Figure 1.8 : Brûlures du deuxième degré : superficielles sur le bras; et profondes sur l'avant-bras et sur l'image de droite [12]

3) Troisième degré

La totalité de l'épiderme est atteinte. La couche de cellules basales est entièrement détruite, y compris les bulbes pileux, jusqu'à l'hypoderme parfois. La vascularisation a disparu, l'innervation est détruite. Ainsi, la lésion est insensible et ne saigne pas (la scarification). C'est une zone blanche, cartonnée, cireuse, pouvant être recouverte d'épiderme desquamé noirâtre. Dans les cas de carbonisations, la lésion est noire. Les poils sont facilement arrachables (figure 1.9).



Figure 1.9 : Brûlure du troisième degré avec zones de bourgeonnement [12]

Mais attention, une lésion du deuxième degré profond au premier jour peut devenir une lésion du troisième degré au troisième jour, par poursuite du mécanisme nécrotique... Les transferts thermiques dans les couches internes de la peau sont fonction des paramètres physiques (stress, sueur, activité,...) et ne seront pas modélisés dans notre projet. On s'intéressera seulement à la température de la couche superficielle de la peau et adapteront l'intervalle [44°C, 51°C] comme une zone de température où les brûlures sont très probables.

Conclusion

Le risque professionnel apparaît comme inhérent à l'intervention de la lutte contre l'incendie. Nul ne songerait à le nier. Le respect qu'inspirent les pompiers repose sur la reconnaissance des risques encourus, sur la bravoure de ceux qui, admettant que dans les circonstances d'un incendie le risque zéro n'existe pas, acceptent que sauver des vies puisse conduire à leur propre sacrifice.

2.1 Introduction

Dans cette partie, on va dresser quelques études bibliographiques sur les transferts thermiques dans les tenues pour sapeur-pompier, et on présentera deux modèles mathématiques relatifs à la distribution de la température à travers l'épaisseur de la tenue.

Les modèles seront confectionnés sur la base de bilans thermiques, qu'on va détailler par la suite.

2.2 Etude bibliographique sur les transferts thermiques peau-tenue

Pour les chercheurs, le domaine de la bio-thermie a pour point de départ l'équation de transfert de chaleur de Pennes, qui prend en compte la conduction, la radiation, la circulation sanguine et la production de chaleur par le métabolisme [13]. La peau est représentée par cinq domaines homogènes (épiderme, derme, hypoderme, muscles et os) figure 2.1 ayant chacun des propriétés thermiques et physiologiques propres.

La tenue de protection (EPI) est souvent modélisée, comme un milieu à trois couches de tissu séparées par des lames d'air figure 2.2

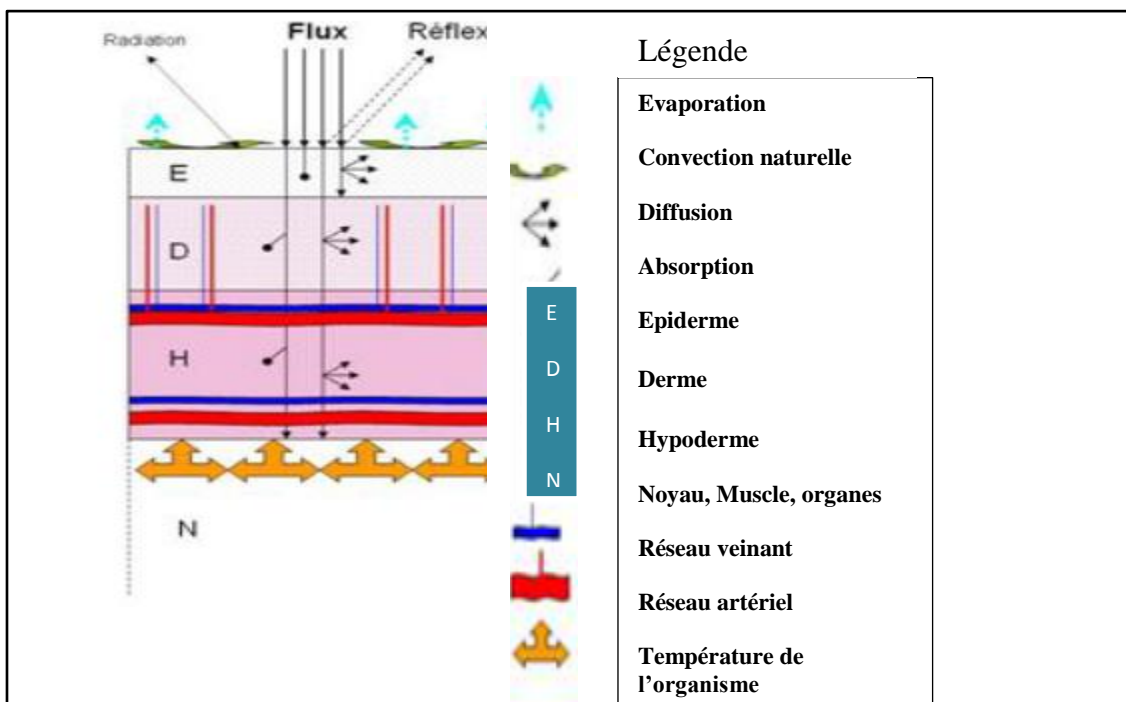


Figure 2.1 : Schématisation de la peau et des différents modes d'échanges thermiques [9], [13].

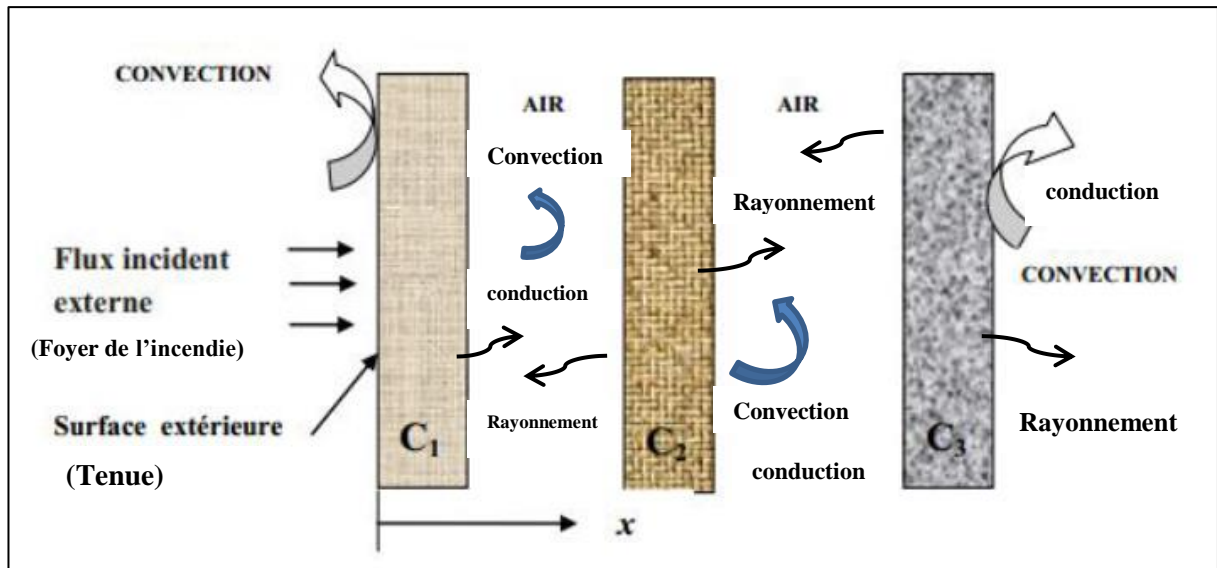


Figure2.2 : Schématisation de la veste et des différents échanges thermiques [9],[13].

2.2.1 L'étude de Pennes

Toutes les modélisations mathématiques qui cherchaient 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 était 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. D'où la relation dite « équation bio thermique de Pennes » [13] :

$$h_b = V \rho_b C_b (1 - \kappa) (T_{b,a} - T) \dots \dots \dots (2.1)$$

avec :

h_b : le taux de transfert de chaleur par unité de volume du tissu,

V : le taux de perfusion par unité de volume.

C_b : chaleur spécifique du sang.

κ est un facteur qui rend compte l'équilibre thermique incomplet entre le sang et le tissu (sans dimension), $T_{b,a}$ la température du sang artériel (°C) et T la température du tissu (°C). Pennes suppose que $0 \leq \kappa \leq 1$, bien que dans son article il fixe $\kappa = 0$ pour calculer la courbe théorique. Cette équation étant basée sur la loi de conservation de l'énergie, il propose ensuite d'écrire l'équilibre thermique énergétique des tissus perfusés de la façon suivante [13] :

$$\rho c \frac{\partial T(x,t)}{\partial t} = k \frac{\partial T(x,t)}{\partial x} + q_m + h_b \dots \dots \dots (2.2)$$

Dans l'équation qui décrit l'évolution thermique à l'intérieur du tissu (matériau multicouche) sous une forme monodimensionnelle, le premier terme de droite définit les pertes de chaleur de la peau dues à la conduction. De façon générale, les pertes conductives caractérisent les échanges de chaleur entre un matériau et les surfaces directement en contact. Le second terme de droite caractérise la production de chaleur métabolique (la chaleur interne, métabolisme) et enfin, le troisième terme décrit les transferts thermiques dus à la circulation sanguine dans les tissus.

Pennes démontre clairement que le champ de température est affecté par les transferts de chaleur entre les gros vaisseaux sanguins et les tissus environnants.

Cette étude a servi de point de départ à de nombreux. Wissler en 1998 écrit un article qui « revisite » le papier de Pennes de 1948 et pointe certaines incohérences [14] :

- Les données expérimentales de Pennes sont en désaccord avec ses résultats théoriques.
- Pennes concentre son attention sur les transferts de chaleur entre les capillaires sanguins et le tissu, alors qu'on peut démontrer que la température du sang dans les artérioles pré capillaires et dans les veines post capillaires est proche de la température des tissus environnants. L'effet de la perfusion sanguine est considéré comme isotrope alors que ce n'est probablement pas le cas. La valeur de la conductivité thermique (k) proposée et utilisée par Pennes vaut un tiers de la valeur couramment acceptée pour les tissus et l'eau.

2.2.2 Les études de Collin

Dans l'une de ces contributions, Collin propose de caractériser les propriétés thermiques et radiatives des tenues de protection des sapeurs-pompiers [3]. Les textiles étant complexes, ils se présentent sous la forme d'un matériau multicouche. Cette première étude met en avant le rôle de la couleur du textile et du mode de teinture sur les propriétés radiatives des vestes, et donne l'ordre de l'absorptivité moyenne [3].

La caractérisation des propriétés radiatives consiste en la mesure de la transmission et de la réflexion directionnelle hémisphérique (TDH et RDH) à l'aide d'un spectromètre à transformée de Fourier (FTIR) pour le domaine infrarouge. Cette technique est présentée plus en détails dans [4].

Lors de la comparaison entre les différents échantillons d'une veste (avant, arrière, bras), il affirme que les propriétés optiques des trois échantillons sont pratiquement identiques (moins de 25% d'écart au maximum sur la réflectivité spectrale entre les faces arrière et avant). Ceci a prouvé que le textile de la veste est quasiment homogène vis à vis des propriétés radiatives. Il

constate également qu'une très faible transmittance spectrale pour les trois échantillons indiquant que l'essentiel des flux thermiques incidents est soit transmis (aspect positif pour le bilan thermique au sein de la veste) soit absorbé [3].

Dans une autre étude Collin & al ont présenté le fruit d'une collaboration entre le SDIS 54 et le LEMTA de Nancy [5]. L'objectif était d'évaluer l'efficacité des tenues de protection utilisées par les sapeurs-pompier. 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 comptait à la fois des spécificités des vestes (matériaux multicouches, 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 permettaient de bien évaluer le niveau de protection thermique des vestes.

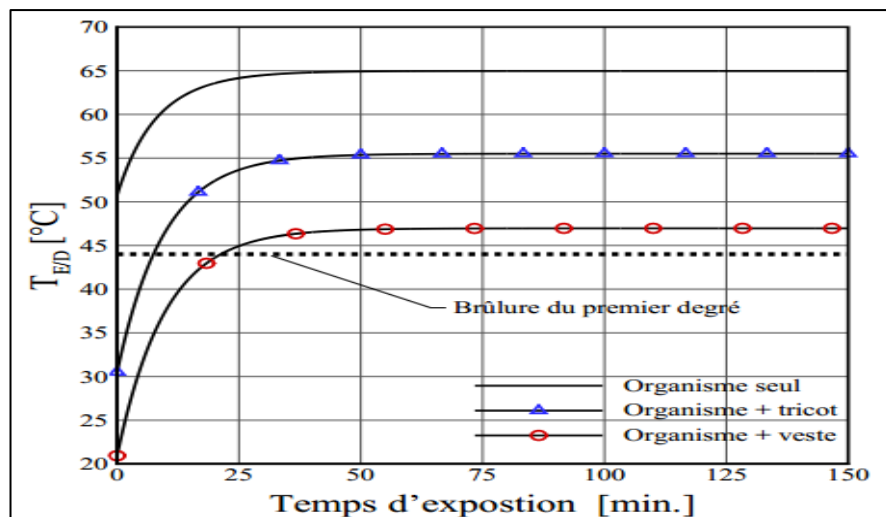


Figure.2.3: Résultats numériques [3]

2.2.3 Les autres études

- Au début des années 1960, la marine Américaine a mis au point un système de mesure stationnaire (mannequin) recouvert de cuir et équipé de papier détecteur de température et un indicateur de point de fusion. À l'aide de ce mannequin, Stoll a tout d'abord effectué des tests sur la sécurité incendie des systèmes vestimentaires des marins de la marine Américaine [15]. Au même moment, l'US Air Force commença à se concentrer sur la sécurité incendie membres de l'équipage, qui ont souvent dû faire face à des incendies à grande échelle.

Il a été observé que cette instrumentation à la fine pointe de la technologie mannequin de feu flashover pourrait être utilisée pour évaluer systématiquement et scientifiquement la performance de protection des vêtements contre la chaleur et les flammes. Les mannequins de feu, sont développés et utilisés dans le monde entier pour évaluer la chaleur et les flammes pour la performance protectrice des vêtements.

- En 1985, Weinbaum et Jiji [14] présente un « nouveau » modèle nommé la « bio-heat W-J équation » qui est une variante simplifiée du modèle de Pennes. La différence majeure réside en ce que ce modèle prend en compte les échanges de chaleur à "contre-courant" entre le sang venant du cœur (réseau artériel) et le sang qui y retourne (réseau veineux), sachant que le sang qui provient du cœur est plus chaud que celui qui vient, par exemple, des extrémités
- En 2001, Baldwin et *al* [14]. développent un modèle bidimensionnel qui simule l'ablation thermique de l'endomètre. En se basant sur l'équation de Pennes, il on fait la description d'un tissu homogène dont les propriétés ne varient pas avec la température et où la perfusion sanguine a été considérée comme constante. Cette étude est une avancée dans la modélisation de ce tissu mais les auteurs notent que des données physiologiques manquent pour simuler correctement ce phénomène quand les températures sont supérieures à 120°C.
- En 2002, Chua et *al* [14] proposent et comparent deux modèles : le premier considère une seule dimension d'espace et est résolu par une méthode aux "différences finies" alors que le second, bidimensionnel, est résolu par une méthode des "éléments finis". Les objectifs de ces modèles sont de prédire la température de la peau et le dommage qu'elle occasionne
- En 2006, Chen et *al* [14]. modélisent la température de la peau. Le problème direct décrit par le modèle est résolu à l'aide du logiciel FEMLAB (code basé sur la méthode des éléments finis). La peau est représentée par deux domaines (épiderme et derme) homogènes. Ils ont choisi un modèle simplifié en 2D, ils supposent que les pertes radiatives sont négligeables et qu'il n'y a ni perte ni gain de chaleur dus à la perfusion sanguine. En revanche, les pertes d'eau par évaporation sont considérées comme une condition aux limites. Une bonne corrélation est observée entre leur modèle et leurs données expérimentales même si lors de la phase de refroidissement, quand la température cutanée est inférieure à 50°C, il existe un décalage entre les deux courbes.

A l'issue des études précédentes, il s'avère que la modélisation des transferts de et vers la peau, est sujette à des versions contre verses, et hautement complexes, surtout si la sudation (écoulement diphasique) est considérée.

De ce fait, notre étude va concerner l'ensemble tissu-lames d'air de l'équipement (EPI), et modélisera seulement une couche de peau équivalente (aux quatre couches), avec des propriétés convectives et radiatives moyennes [9]

2.3 Formulation des bilans thermiques

La veste se présente comme un matériau multicouche 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 couches d'air. Le modèle implémenté pour le module veste comprend :

En régime permanent, un bilan thermique s'écrit de la manière suivante :

$$\text{Flux}(\varphi) \text{ reçu} = \text{Flux}(\varphi) \text{ perdu} \dots(2.3)$$

Moyennement un régime stationnaire, le bilan thermique (convection, rayonnement) sur chaque couche permettra d'évaluer sa température (uniforme sur l'épaisseur) et le flux qui la traverse

Il est à noter que les directions de transferts sont essentiellement à travers l'épaisseur (1D) [4]

En plus, notre étude va s'entre pendre sur des cas en absence de stress thermique (sans retour de flux) et ce en accord avec les analyses de jean [16]

2.3.1 Modélisation mathématique en absence de conduction dans les lames d'air

Comme énoncé au paravent, on se place dans le cas du régime stationnaire avec absence de flux inverse, impliquant une décroissance de la température dans le sens de l'épaisseur figure.

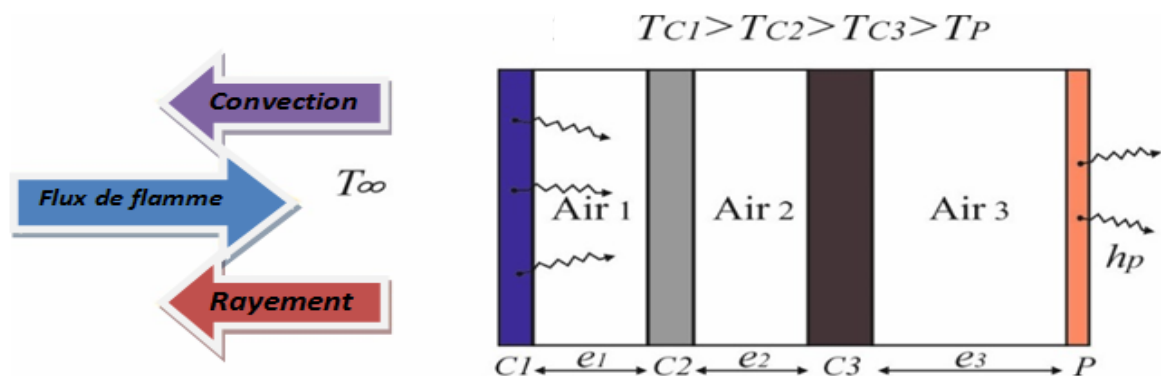


Figure.2.4 : Schématisation des transferts [17]

2.3.1.1 Bilan thermique sur la couche (1)

A. Les flux reçus $\phi [w/m^2]$: Le flux reçu par la couche C1 à partir de la flamme.

$$\phi_{flamme \rightarrow C1} = \alpha_{C1} * G_{flamme} \dots (2.4)$$

Sachant que :

$$\alpha_{C1} + \tau_{C1} = 1$$

Avec :

α_{C1} : Absorptivité de la couche C1

τ_{C1} : Transmissivité de la couche C1

B. Les flux perdus ($T_{C1} > T_{C2}$)

B.1 Flux convectif C1 → C2 via la lame d'air 1

$$\begin{cases} \phi_{C1 \rightarrow C2}^{conv} = h_{air1} \cdot (T_{C1} - T_{C2}) \\ h_{air1} = \frac{Nu \cdot \lambda_{air1}}{e_1} \end{cases} \dots (2.5)$$

B.3 Flux radiatif C1 → C2 via la lame d'air 1

$$\begin{cases} \phi_{C1 \rightarrow C2}^{rad} = \sigma \cdot \frac{(T_{C1}^4 - T_{C2}^4)}{\left(\frac{1}{\varepsilon_{C1C2}}\right)} \\ 1/\varepsilon_{C1C2} = \frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1 \end{cases} \dots (2.6)$$

B.5 Flux convectif C1 → ∞ (Convection libre)

$$\phi_{C1 \rightarrow air}^{conv} = h_{air} \cdot (T_{C1} - T_{air}) \dots (2.7)$$

$$\begin{cases} I_{convC1} = 1 \text{ (convection libre)} \\ I_{convC1} = 0 \text{ (pas de pertes convectives vers } \infty) \end{cases}$$

B.5 Flux radiatif $C1 \rightarrow \infty$

$$\Phi_{C1 \rightarrow \infty}^{rad} = \sigma \cdot \epsilon_{c1} \cdot (T_{C1}^4 - T_{\infty}^4) \dots (2.8)$$

$$\Phi_{C1 \rightarrow \infty}^{net} = I_{rad} \cdot \Phi_{C1 \rightarrow \infty}^{rad} \begin{cases} I_{rad} = 1 \\ I_{rad} = 0 \text{ (pas de pertes radiatifs)} \end{cases}$$

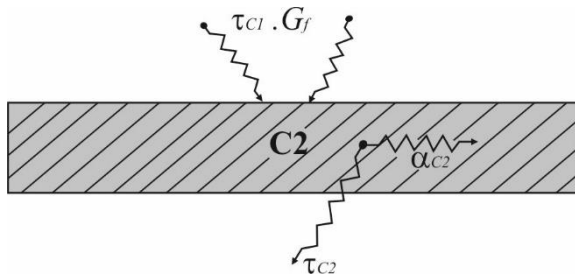
Bilan pour la couche C1

$$\alpha_{C1} * G_f = h_{air1} \cdot (T_{C1} - T_{C2}) + \sigma \frac{(T_{C1}^4 - T_{C2}^4)}{\left(\frac{1}{\epsilon_{c1c2}}\right)} + I_{convC1} \cdot h_{air} \cdot (T_{C1} - T_{air}) +$$

$$I_{radair} \cdot \sigma \cdot \epsilon_{C1} \cdot (T_{C1}^4 - T_{\infty}^4) \dots \dots (I.A)$$

2.3.1.2 Bilan thermique sur la couche (2)

A. Les flux reçus $\phi [w/m^2]$



A.1 Le flux de la flamme absorbée par la couche C2

$$\Phi_{flamme \rightarrow C2} = \alpha_{C2} * (\tau_{C1} * G_f) \dots (2.9)$$

A.2 Le flux convectif reçu par C2 et provenant de C1 (plus chaude) via la lame d'air Air1

$$\Phi_{C1 \rightarrow C2}^{conv} = h_{air1} \cdot (T_{C1} - T_{C2}) \dots (2.10)$$

A.3 Le flux radiatif provenant de C1 et reçu par C2

$$\Phi_{C1 \rightarrow C2}^{rad} = \frac{\sigma}{\frac{1}{\epsilon_{c1c2}}} \cdot (T_{C1}^4 - T_{C2}^4) \dots (2.11)$$

$$\frac{1}{\epsilon_{c1c2}} = \frac{1}{\epsilon_{C1}} + \frac{1}{\epsilon_{C2}} - 1$$

B. Les flux perdus

B.2 Flux convectif transmis de C1 → C3 via la lame d'air 2

$$\begin{cases} \phi_{C2 \rightarrow C3}^{conv} = h_{air2} \cdot (T_{C2} - T_{C3}) \\ h_{air2} = \frac{Nu \cdot \lambda_{air2}}{e_2} \end{cases} \dots (2.12)$$

B.3 Flux radiatif émis par C2 → C3 via la lame d'air 2 :

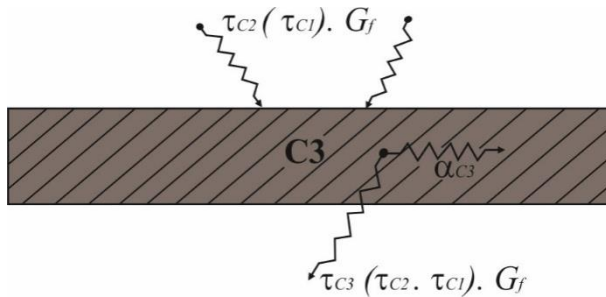
$$\begin{cases} \phi_{C2 \rightarrow C3}^{rad} = \frac{\sigma}{\left(\frac{1}{\epsilon_{C2C3}}\right)} \cdot (T_{C2}^4 - T_{C3}^4) \\ 1/\epsilon_{C2C3} = \frac{1}{\epsilon_{C2}} + \frac{1}{\epsilon_{C3}} - 1 \end{cases} \dots (2.13)$$

Bilan pour la couche C2

$$\begin{aligned} \alpha_{C2} * (\tau_{C1} * G_f) + h_{air1} \cdot (T_{C1} - T_{C2}) + \frac{\sigma}{\epsilon_{C1C2}} \cdot (T_{C1}^4 - T_{C2}^4) \\ = h_{air2} \cdot (T_{C2} - T_{C3}) + \frac{\sigma}{(1/\epsilon_{C2C3})} \cdot (T_{C2}^4 - T_{C3}^4) \dots \dots (I.B) \end{aligned}$$

2.3.1 .3Bilan thermique sur la couche (3)

A. Les flux reçus ϕ [w/m^2]



A.1 Fraction du flux issu de la flamme :

$$\phi_{flamme \rightarrow C3} = \alpha_{C3} * (\tau_{C2} * \tau_{C1} * G_f) \dots (2.14)$$

A.2 Le flux convectif reçu par C3 et provenant de C2 via la lame d'air Air2

$$\begin{cases} \phi_{C2 \rightarrow C3}^{conv} = h_{air2} \cdot (T_{C2} - T_{C3}) \\ h_{air2} = \frac{Nu \cdot \lambda_{air2}}{e_2} \end{cases} \dots (2.15)$$

A.3 Le flux radiatif provenant de C2 et reçu par C3

$$\phi_{C2 \rightarrow C3}^{rad} = \frac{\sigma}{\frac{1}{\epsilon_{C2}} + \frac{1}{\epsilon_{C3}} - 1} \cdot (T_{C2}^4 - T_{C3}^4) \dots (2.16)$$

B. Les flux perdus :

B.2 Flux convectif transmis de C3 vers la peau via la lame d'air 3 :

$$\begin{cases} \phi_{C3 \rightarrow Peau}^{conv} = h_{air3} \cdot (T_{C3} - T_P) \\ h_{air3} = \frac{Nu \cdot \lambda_{air3}}{e_3} \end{cases} \dots (2.17)$$

B.3 Flux radiatif émis par C3 vers la peau :

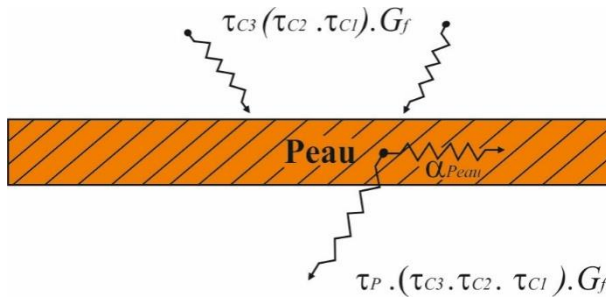
$$\begin{cases} \phi_{C3 \rightarrow Peau}^{rad} = \frac{\sigma}{\left(\frac{1}{\epsilon_{C2C3}}\right)} \cdot (T_{C3}^4 - T_P^4) \\ \epsilon_{C3Peau} = \frac{1}{\epsilon_{C3}} + \frac{1}{\epsilon_P} - 1 \end{cases} \dots (2.18)$$

Bilan pour la couche C3 : Le bilan sur la couche 3 s'écrit

$$\begin{aligned} \alpha_{C3} * (\tau_{C2} * \tau_{C1} * G_f) + h_{air2} \cdot (T_{C2} - T_{C3}) + \frac{\sigma}{(1/\epsilon_{C2C3})} \cdot (T_{C2}^4 - T_{C3}^4) &= \phi_{C2 \rightarrow C3}^{cond} \\ &= h_{air3} \cdot (T_{C3} - T_P) + \frac{\sigma}{(1/\epsilon_{C3P})} \cdot (T_{C3}^4 - T_P^4) \dots \dots (I.C) \end{aligned}$$

2.3.1 .4 Equation de bilan thermique sur la couche de peau

A. Les flux reçus ϕ [w/m^2]



A.1 Fraction du flux reçue de la flamme :

$$\phi_{flamme \rightarrow Peau} = \alpha_P * (\tau_{C3} * \tau_{C1} * \tau_{C1}) * G_f \dots (2.19)$$

A.2 Le flux convectif reçu par la peau et provenant de C3 via la lame d'air Air3

$$\begin{cases} \phi_{C3 \rightarrow Peau}^{conv} = h_{air3} \cdot (T_{C3} - T_{Peau}) \\ h_{air3} = \frac{Nu^2 \cdot \lambda_{air3}}{e_3} \end{cases} \dots (2.20)$$

A.3 Le flux radiatif émanant de la couche C3

$$\phi_{C3 \rightarrow Peau}^{rad} = \frac{\sigma}{\frac{1}{\epsilon_{C3}} + \frac{1}{\epsilon_P} - 1} \cdot (T_{C3}^4 - T_{Peau}^4) \dots (2.21)$$

B. Les flux perdus :

B.1 Flux convectif de la peau vers l'organisme :

$$\phi_{Peau \rightarrow Org}^{conv} = I_{convP} \cdot h_P \cdot (T_P - T_i) \dots (2.22)$$

$$T_i = 36,8 + 273,15 = 309.95 \text{ K}$$

B.2 Flux radiatif la peau vers l'organisme

$$\phi_{Peau \rightarrow Org}^{rad} = I_{radP} \cdot \sigma \cdot \epsilon_{Peau} \cdot (T_P^4 - T_i^4) \dots (2.23)$$

Bilan de la peau

$$\alpha_P * (\tau_{C3} * \tau_{C2} * \tau_{C1} * G_f) + h_{air3} \cdot (T_{C3} - T_P) + \frac{\sigma}{\left(\frac{1}{\varepsilon_{C3P}}\right)} \cdot (T_{C3}^4 - T_P^4)$$

$$= I_{ConvP} \cdot h_P \cdot (T_P - T_i) + I_{radP} \cdot \sigma \cdot \varepsilon_{Peau} \cdot (T_P^4 - T_i^4) \dots \dots (I.D)$$

Récapitulatif des équations de Bilan: (cas sans conduction dans les lames d'air)

$$h_{air1} \cdot (T_{C1} - T_{C2}) + \sigma \cdot \frac{(T_{C1}^4 - T_{C2}^4)}{(1/\varepsilon_{C1C2})} + I_{convC1} \cdot h_{air} \cdot (T_{C1} - T_{air}) + I_{radair} \cdot \sigma \cdot \varepsilon_{C1} \cdot (T_{C1}^4 - T_{\infty}^4)$$

$$- \alpha_{C1} * G_f = 0 \dots \dots (A1)$$

$$(\alpha_{C2} * \tau_{C1}) * G_f + h_{air1} \cdot (T_{C1} - T_{C2}) + \frac{\sigma}{(1/\varepsilon_{C1C2})} \cdot (T_{C1}^4 - T_{C2}^4) - h_{air2} \cdot (T_{C2} - T_{C3})$$

$$- \frac{\sigma}{\left(\frac{1}{\varepsilon_{C2C3}}\right)} \cdot (T_{C2}^4 - T_{C3}^4) = 0 \dots \dots (B1)$$

$$(\alpha_{C3} * \tau_{C2} * \tau_{C1}) * G_f + h_{air2} \cdot (T_{C2} - T_{C3}) + \frac{\sigma}{\left(\frac{1}{\varepsilon_{C2C3}}\right)} \cdot (T_{C2}^4 - T_{C3}^4) - h_{air3} \cdot (T_{C3} - T_P)$$

$$- \frac{\sigma}{(1/\varepsilon_{C3P})} \cdot (T_{C3}^4 - T_P^4) = 0 \dots \dots (C1)$$

$$\left(\alpha_P * \tau_{C3} * \tau_{C2} * \tau_{C1}\right) * G_f + h_{air3} \cdot (T_{C3} - T_P) + \frac{\sigma}{(1/\varepsilon_{C3P})} \cdot (T_{C3}^4 - T_P^4) - I_{ConvP} \cdot h_P \cdot (T_P - T_i)$$

$$- I_{radP} \cdot \sigma \cdot \varepsilon_{Peau} \cdot (T_P^4 - T_i^4) \dots \dots (D1)$$

2.3.2 Modèle mathématique en présence de conduction dans les lames d'air

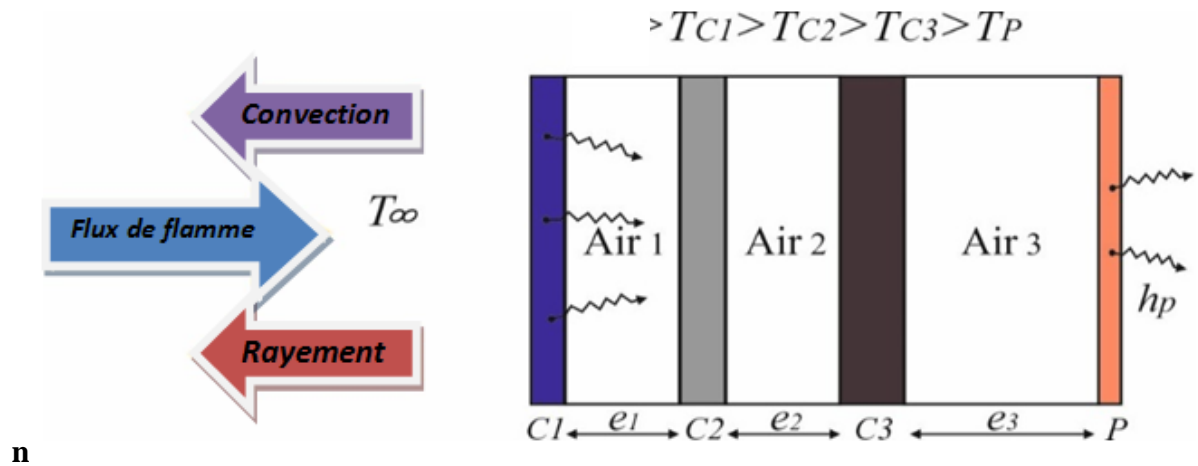


Figure2.5 : Schéma de la veste[17].

Les mêmes hypothèses sont énoncées, que celle du cas en absence de conduction dans les lames d'air (section 2.3.1).

Pour ce cas où l'air situé dans les interfaces des couches, participe au transport d'une partie des flux par conduction l'épaisseur et la conductivité thermique jouent un rôle de résistance thermique.

2.3.2.1 Bilan thermique sur la couche (1) :

A. Les flux reçus ϕ [w/m^2]: Le flux reçu par la couche C1 à partir de la flamme.

$$\phi_{flamme \rightarrow C1} = \alpha_{C1} * G_{flamme} \dots (2.24)$$

Sachant que :

α_{C1} : Absorptivité de la couche C1 τ_{C1} : Transmissivité de la couche C1

B. Les flux perdus ($T_{C1} > T_{C2}$)

B.1 Flux conductif C1 → C2 via la lame d'air 1

$$\left\{ \begin{array}{l} \phi_{C1 \rightarrow C2}^{cond} = \frac{(T_{C1} - T_{C2})}{R_1} \\ R_1 = \frac{e_1}{\lambda_{air1}} \left[\frac{K}{W} \right] \end{array} \right. \dots (2.25)$$

B.2 Flux convectif C1 → C2 via la lame d'air 1

$$\begin{cases} \phi_{C1 \rightarrow C2}^{conv} = h_{air1} \cdot (T_{C1} - T_{C2}) \\ h_{air1} = \frac{Nu \cdot \lambda_{air1}}{e_1} \end{cases} \dots (2.26)$$

B.3 Flux radiatif C1 → C2 via la lame d'air 1

$$\begin{cases} \phi_{C1 \rightarrow C2}^{rad} = \sigma \cdot \frac{(T_{C1}^4 - T_{C2}^4)}{\left(\frac{1}{\varepsilon_{C1C2}}\right)} \\ 1/\varepsilon_{C1C2} = \frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1 \end{cases} \dots (2.27)$$

B.5 Flux convectif C1 → ∞ (Convection libre)

$$\phi_{C1 \rightarrow air}^{conv} = h_{air} \cdot (T_{C1} - T_{air}) \dots (2.28)$$

$$\begin{cases} I_{convC1} = 1 \text{ (convection libre)} \\ I_{convC1} = 0 \text{ (pas de pertes convectives vers } \infty) \end{cases}$$

B.5 Flux radiatif C1 → ∞

$$\phi_{C1 \rightarrow \infty}^{rad} = \sigma \cdot \varepsilon_{C1} \cdot (T_{C1}^4 - T_{\infty}^4) \dots (2.29)$$

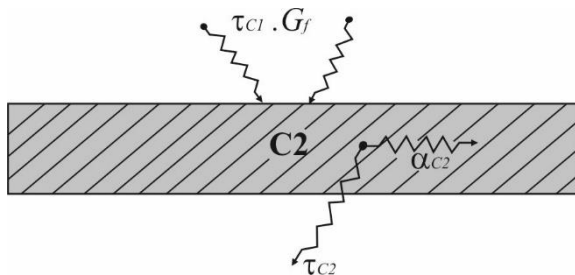
$$\phi_{C1 \rightarrow \infty}^{net} = I_{rad} \cdot \phi_{C1 \rightarrow \infty}^{rad} \begin{cases} I_{rad} = 1 \\ I_{rad} = 0 \text{ (pas de pertes radiatifs)} \end{cases}$$

Bilan pour la couche C1 :

$$\alpha_{C1} * G_f = \phi_{C1 \rightarrow C2}^{cond} = \frac{(T_{C1} - T_{C2})}{R_1} + h_{air1} \cdot (T_{C1} - T_{C2}) + \sigma \cdot S \cdot \frac{(T_{C1}^4 - T_{C2}^4)}{\left(\frac{1}{\varepsilon_{C1C2}}\right)} + I_{convC1} \cdot h_{air} \cdot (T_{C1} - T_{air}) + I_{radair} \cdot \sigma \cdot \varepsilon_{C1} \cdot (T_{C1}^4 - T_{\infty}^4) \dots \dots (II. E)$$

2.3.2.2 Bilan thermique sur la couche (2)

A. Les flux reçus ϕ [w/m²]



A.1 Le flux de la flamme absorbée par la couche C2

$$\Phi_{flamme \rightarrow C2} = \alpha_{C2} * (\tau_{C1} * G_f) \dots (2.30)$$

A.2 Le flux convectif reçu par C2 et provenant de C1 (plus chaude) via la lame d'air Air1

$$\Phi_{C1 \rightarrow C2}^{conv} = h_{air1} \cdot (T_{C1} - T_{C2}) \dots (2.31)$$

A.3 Le flux radiatif provenant de C1 et reçu par C2

$$\Phi_{C1 \rightarrow C2}^{rad} = \frac{\sigma}{\frac{1}{\epsilon_{C1C2}}} \cdot (T_{C1}^4 - T_{C2}^4) \dots (2.32)$$

$$\frac{1}{\epsilon_{C1C2}} = \frac{1}{\epsilon_{C1}} + \frac{1}{\epsilon_{C2}} - 1$$

B. Les flux perdus

B.1 Flux conductif transmis de C2 → C3 via la lame d'air 2

$$\left\{ \begin{array}{l} \Phi_{C2 \rightarrow C3}^{cond} = \frac{(T_{C2} - T_{C3})}{R_2} \\ R_2 = \frac{e_2}{\lambda_{air2}} \end{array} \right. \dots (2.33)$$

B.2 Flux convectif transmis de C1 → C3 via la lame d'air 2

$$\left\{ \begin{array}{l} \Phi_{C2 \rightarrow C3}^{conv} = h_{air2} \cdot (T_{C2} - T_{C3}) \\ h_{air2} = \frac{Nu^2 \cdot \lambda_{air2}}{e_2} \end{array} \right. \dots (2.34)$$

B.3 Flux radiatif émis par C2 → C3 via la lame d'air 2

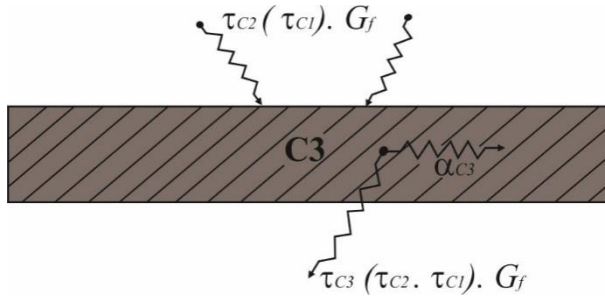
$$\left\{ \begin{array}{l} \Phi_{C2 \rightarrow C3}^{rad} = \frac{\sigma}{\left(\frac{1}{\epsilon_{C2C3}}\right)} \cdot (T_{C2}^4 - T_{C3}^4) \\ 1/\epsilon_{C2C3} = \frac{1}{\epsilon_{C2}} + \frac{1}{\epsilon_{C3}} - 1 \end{array} \right. \dots (2.35)$$

Bilan pour la couche C2

$$\begin{aligned} & \alpha_{C2} * (\tau_{C1} * G_f) + h_{air1} \cdot (T_{C1} - T_{C2}) + \frac{\sigma}{\varepsilon_{C1C2}} \cdot (T_{C1}^4 - T_{C2}^4) \\ & = \frac{(T_{C2} - T_{C3})}{R_2} + h_{air2} \cdot (T_{C2} - T_{C3}) + \frac{\sigma}{(1/\varepsilon_{C2C3})} \cdot (T_{C2}^4 - T_{C3}^4) \dots \dots (II.F) \end{aligned}$$

2.3.2.3 Bilan thermique sur la couche (3)

A. Les flux reçus ϕ [w/m^2]



A.1 Fraction du flux issu de la flamme

$$\phi_{flamme \rightarrow C3} = \alpha_{C3} * (\tau_{C2} * \tau_{C1} * G_f) \dots (2.36)$$

A.2 Le flux convectif reçu par C3 et provenant de C2 via la lame d'air Air2

$$\begin{cases} \phi_{C2 \rightarrow C3}^{conv} = h_{air2} \cdot (T_{C2} - T_{C3}) \\ h_{air2} = \frac{Nu \cdot \lambda_{air2}}{e_2} \end{cases} \dots (2.37)$$

A.3 Le flux radiatif provenant de C2 et reçu par C3

$$\phi_{C2 \rightarrow C3}^{rad} = \frac{\sigma}{\frac{1}{\varepsilon_{C2}} + \frac{1}{\varepsilon_{C3}} - 1} \cdot (T_{C2}^4 - T_{C3}^4) \dots (2.38)$$

B. Les flux perdus

B.1 Flux conductif transmis de C2 \rightarrow C3 via la lame d'air 3

$$\begin{cases} \phi_{C2 \rightarrow C3}^{cond} = \frac{(T_{C3} - T_{C2})}{R_3} \\ R_3 = \frac{e_3}{\lambda_{air3}} \end{cases} \dots (2.39)$$

B.2 Flux convectif transmis de C3 vers la peau via la lame d'air 3

$$\begin{cases} \phi_{C3 \rightarrow \text{Peau}}^{\text{conv}} = h_{\text{air}3} \cdot (T_{C3} - T_P) \\ h_{\text{air}3} = \frac{Nu \cdot \lambda_{\text{air}3}}{e_3} \end{cases} \dots (2.40)$$

B.3 Flux radiatif émis par C3 vers la peau

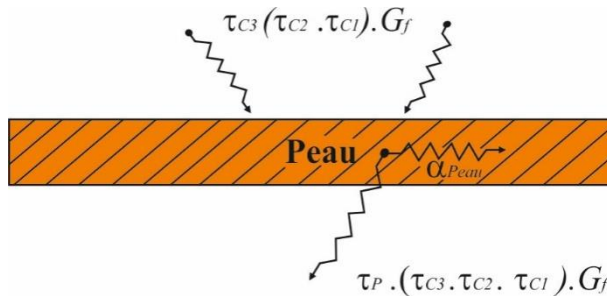
$$\begin{cases} \phi_{C3 \rightarrow \text{Peau}}^{\text{rad}} = \frac{\sigma}{\left(\frac{1}{\varepsilon_{C2C3}}\right)} \cdot (T_{C3}^4 - T_P^4) \\ \frac{1}{\varepsilon_{C3\text{Peau}}} = \frac{1}{\varepsilon_{C3}} + \frac{1}{\varepsilon_P} - 1 \end{cases} \dots (2.41)$$

Bilan pour la couche C3 : Le bilan stationnaire sur la couche 3 s'écrit

$$\begin{aligned} \alpha_{C3} * (\tau_{C2} * \tau_{C1} * G_f) + h_{\text{air}2} \cdot (T_{C2} - T_{C3}) + \frac{\sigma}{(1/\varepsilon_{C2C3})} \cdot (T_{C2}^4 - T_{C3}^4) &= \phi_{C2 \rightarrow C3}^{\text{cond}} \\ &= \frac{(T_{C3} - T_{C2})}{R_3} + h_{\text{air}3} \cdot (T_{C3} - T_P) + \frac{\sigma}{(1/\varepsilon_{C3P})} \cdot (T_{C3}^4 - T_P^4) \dots \dots (II.G) \end{aligned}$$

2.3.2.4 Equation de bilan thermique sur la couche de peau

A. Les flux reçus ϕ [w/m²]



A.1 Fraction du flux reçue de la flamme

$$\phi_{\text{flamme} \rightarrow \text{Peau}} = \alpha_P * (\tau_{C3} * \tau_{C1} * \tau_{C1}) * G_f \dots (2.42)$$

A.2 Le flux convectif reçu par la peau et provenant de C3 via la lame d'air Air3

$$\begin{cases} \phi_{C3 \rightarrow \text{Peau}}^{\text{conv}} = h_{\text{air}3} \cdot (T_{C3} - T_{\text{Peau}}) \\ h_{\text{air}3} = \frac{Nu \cdot \lambda_{\text{air}3}}{e_3} \end{cases} \dots (2.43)$$

A.3 Le flux radiatif émanant de la couche C3 :

$$\phi_{C3 \rightarrow Peau}^{rad} = \frac{\sigma}{\frac{1}{\varepsilon_{C3}} + \frac{1}{\varepsilon_P} - 1} \cdot (T_{C3}^4 - T_{Peau}^4) \dots (2.44)$$

B. Les flux perdus :

B.1 Flux convectif de la peau vers l'organisme :

$$\phi_{Peau \rightarrow Org}^{conv} = I_{ConvP} \cdot h_P \cdot (T_P - T_i) \dots (2.45)$$

$$T_i = 36,8 + 273,15 = 309,95 \text{ K}$$

B.2 Flux radiatif la peau vers l'organisme

$$\phi_{Peau \rightarrow Org}^{rad} = I_{radP} \cdot \sigma \cdot \varepsilon_{Peau} \cdot (T_P^4 - T_i^4) \dots (2.46)$$

Bilan pour la peau

$$\begin{aligned} \alpha_P \cdot (\tau_{C3} \cdot \tau_{C2} \cdot \tau_{C1} \cdot G_f) + h_{air3} \cdot (T_{C3} - T_P) + \frac{\sigma}{\left(\frac{1}{\varepsilon_{C3P}}\right)} \cdot (T_{C3}^4 - T_P^4) \\ = I_{ConvP} \cdot h_P \cdot (T_P - T_i) + I_{radP} \cdot \sigma \cdot \varepsilon_{Peau} \cdot (T_P^4 - T_i^4) \dots \dots (II.H) \end{aligned}$$

Récapitulatif des équations de bilan

$$\begin{aligned} \frac{(T_{C1} - T_{C2})}{R1} + h_{air1} \cdot (T_{C1} - T_{C2}) + \sigma \cdot \frac{(T_{C1}^4 - T_{C2}^4)}{(1/\varepsilon_{C1C2})} + I_{convC1} \cdot h_{air} \cdot (T_{C1} - T_{air}) \\ + I_{radair} \cdot \sigma \cdot \varepsilon_{C1} \cdot (T_{C1}^4 - T_{\infty}^4) - \alpha_{C1} \cdot G_f = 0 \dots \dots (A2) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} (\alpha_{C2} \cdot \tau_{C1}) \cdot G_f + h_{air1} \cdot (T_{C1} - T_{C2}) + \frac{\sigma}{(1/\varepsilon_{C1C2})} \cdot (T_{C1}^4 - T_{C2}^4) - \frac{(T_{C2} - T_{C3})}{R2} \\ - h_{air2} \cdot (T_{C2} - T_{C3}) - \frac{\sigma}{\left(\frac{1}{\varepsilon_{C2C3}}\right)} \cdot (T_{C2}^4 - T_{C3}^4) = 0 \dots \dots (B2) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} (\alpha_{C3} \cdot \tau_{C2} \cdot \tau_{C1}) \cdot G_f + h_{air2} \cdot (T_{C2} - T_{C3}) + \frac{\sigma}{\left(\frac{1}{\varepsilon_{C2C3}}\right)} \cdot (T_{C2}^4 - T_{C3}^4) - \frac{(T_{C3} - T_P)}{R3} \\ - h_{air3} \cdot (T_{C3} - T_P) - \frac{\sigma}{(1/\varepsilon_{C3P})} \cdot (T_{C3}^4 - T_P^4) = 0 \dots \dots (C2) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & (\alpha_P * \tau_{C3} * \tau_{C2} * \tau_{C1}) * G_f + h_{air3} \cdot (T_{C3} - T_P) + \frac{\sigma}{(1/\varepsilon_{C3P})} \cdot (T_{C3}^4 - T_P^4) - I_{ConvP} \cdot h_P \cdot (T_P - T_i) \\ & - I_{radP} \cdot \sigma \cdot \varepsilon_{Peau} \cdot (T_P^4 - T_i^4) \dots \dots (D2) \end{aligned}$$

Conclusion

Après une analyse bibliographique sur les études effectuées sur les transferts thermiques dans l'ensemble tenu-organisme, il s'avère que la modalisation du transfert dans les couches de peau, est complète en raison de la dépendance des propriétés thermiques avec les paramètres métabolique (pression sanguine, taux de perfusion, ...etc.), et de l'introduction de l'évaporation/condensation sur la surface de la peau.

En utilisant un bilan thermique, en absence puis en présence d'air, il a été possible d'élaborer deux modèles algébriques pour la détermination des températures dans les couches de tissus et à la surface de la peau.

3.1 Introduction

Les chapitres précédents montrent les effets thermiques sur les personnes et les vestes de protection, les modes de transfert thermique et les différentes méthodes utilisées pour traiter ce phénomène. Le but de ce chapitre est de résoudre numériquement le système d'équations algébriques dans le chapitre précédent avec le langage symbolique **MATLAB**[®] pour déterminer la distribution de la température à travers l'épaisseur de la tenue ainsi On va prêter attention sur la température en la surface de la peau, pour savoir si on a atteint ou non le seuil de la brûlure de 1^{er} degré (45°C).

Enfin on va présenter une analyse paramétrique sur les effets des paramètres convectifs et radiatifs, de la peau, des tissus et des lames d'air, sur la température en la surface de la peau.

3.2 Modèle géométrique et conditions aux limites

Un schéma de transport de la chaleur dans les vêtements de pompiers ainsi que le transfert de chaleur dans la peau et de tissus humains est affiché dans la figure3.1 Le vêtement est constitué de trois couches de tissu, qui sont l'enveloppe extérieure, la barrière contre l'humidité et la doublure thermique ainsi que la configuration de chaque couche de vêtement. Avec la couche de peau humaine.

Le problème considéré est un transfert de chaleur unidimensionnel et stationnaire que l'on cherchera à résoudre numériquement

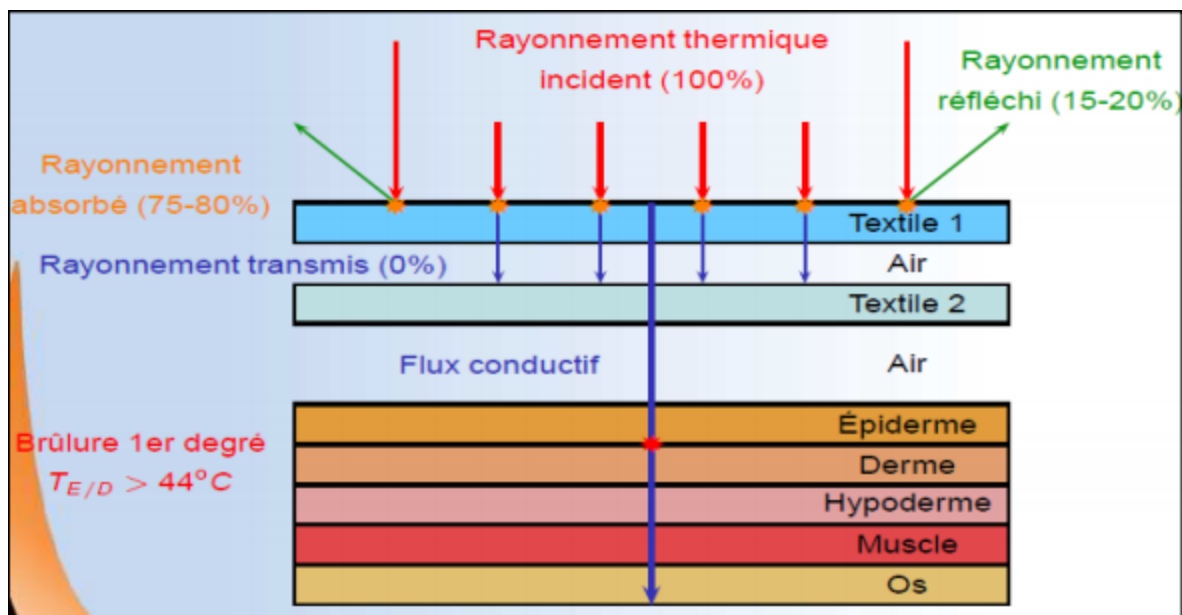


Figure.3.1: Les échanges thermiques entre les différentes couches de la veste [4]

Le domaine d'étude de référence se compose d'un milieu tri-couches de tissus (C1, C2, C3), séparées par trois lames d'air (Figure3.2). Pour la peau on adopte une condition de convection interne, moyennant une température imposée pour l'organisme $T_i=37.8^\circ\text{C}$.

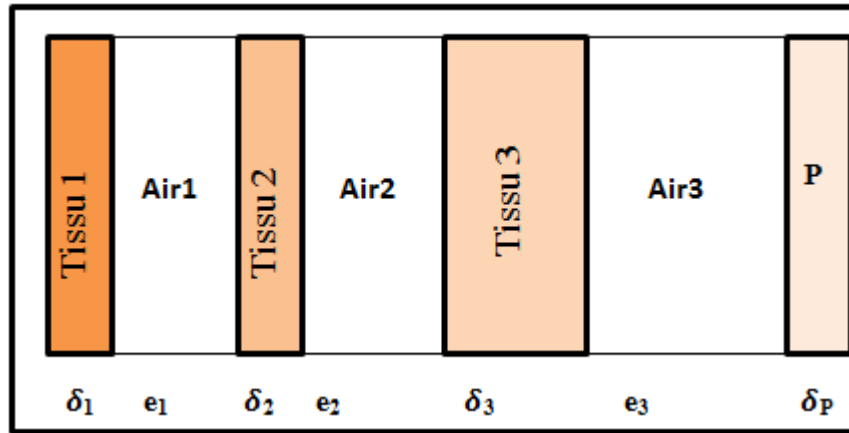


Figure3.2 : domaine de calcul

Les données relatives aux transferts conductifs-radiatifs dans les différentes couches ont été extraites des travaux de caractérisation menés par S.Dahamni *et al.*[2] et Collin *et al.* [3] et sont visibles sur les tableaux 3.1. et 3.2

Tableau3.1 : Les valeurs de l'épaisseur des tissus [2]

	C1	C2	C3	Peau
δ (mm)	0.42	0.75	1.55	

Tableau3.2 : Les valeurs de l'épaisseur des lames d'air [2]

	Air1	Air2	Air3
e (mm)	2	2	5

Condition aux limites

*Condition au limite gauche : coté ∞ : de deuxième type, de Neumann : Flux de la flamme = G_f

On prend $G_f=2300$ Watts.

*Condition au limite droite: de premier type, de Dirichlet : $T = T_{\text{organisme}}=37.8^\circ\text{C}$

* En absence de réflectivité (pas de stress thermique), les couches de tissus absorbent et transmettent les flux $\alpha_{Ci}+\tau_{Ci}=1$.

Tableau3.3 : Les propriétés Des tissus, la peau, l’ambiance extérieure [17]

	l’ambiance extérieure (∞)	C1	C2	C3	Peau
α	---	1	0.5	0.5	1
ε	---	0.6	0.6	0.6	0.98
$h(\text{W/k.m}^2)$	8	4	4	4	4

3.3 Les cas de référence (Baseline)

3.3.1 Modèle sans réflectivité, sans conduction dans les lames d’air

Cas standard (Baseline 1)

$T_{\text{air}}=298\text{K}$; $T_{\text{inf}}=298\text{K}$; $T_i=309.95\text{ K}$

$h_{\text{air}}=8\text{ Watts/K.m}^2$;

Intercouches: $h_{\text{air}1}=4$; $h_{\text{air}2}=4$; $h_{\text{air}3}=4$; Watts/K. m^2 ;

$h_{\text{convpeau}}=1, h_p=4\text{ Watts/K. m}^2$;;

$I_{\text{radpeau}}=0$ (pas de rayonnement coté peau)

$$\begin{cases} \alpha_{C1} = 0,98 \\ \tau_{C1} = 0,02 \end{cases} T_{\infty} = 25^{\circ}\text{C}$$

Tableau3.4 :La variation de température de la première couche de tissu vers la peau avec l’Absorptivité et la Transmissivité des couches de tissu et de la peau

	C1	C2	C3	Peau	Organisme
Absorptivité (α)	0.98	0.5	0.5	1.0	---
Transmissivité (τ)	0.02	0.5	0.5	0.0	---
Température ($^{\circ}\text{C}$)	161.95	143.79	121.67	100.73	36,8
	Air 1	Air 2	Air 3		
Température ($^{\circ}\text{C}$)	152.87	132.73	111.2		

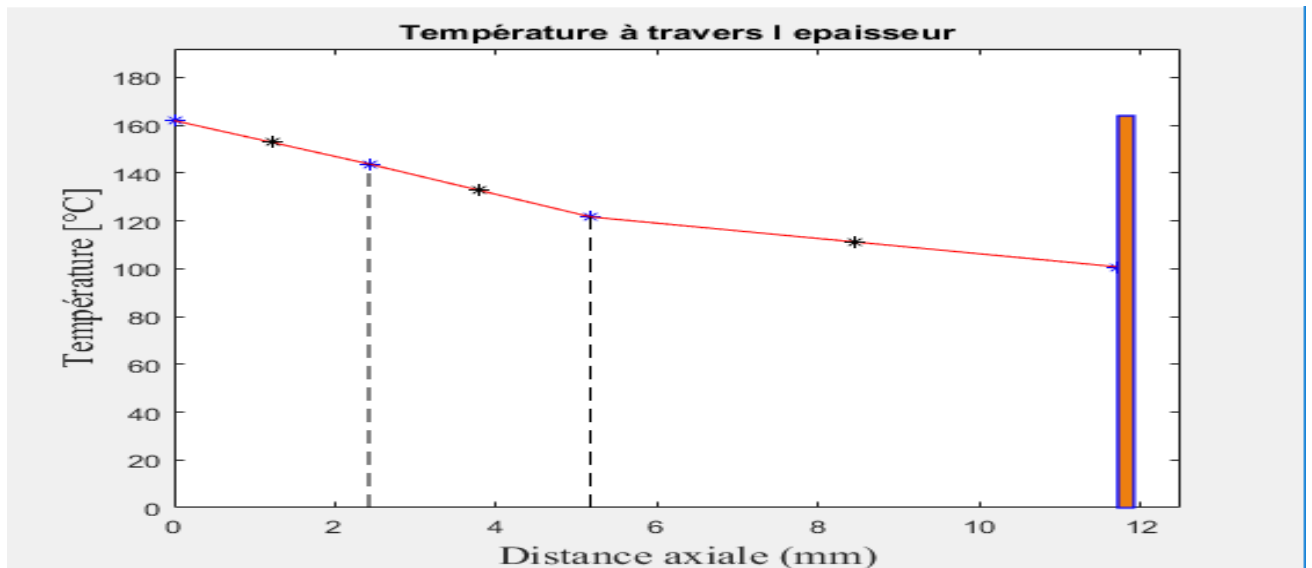


Figure3.3: Courbe de la température (°C) en fonction de la distance axiale (mm)

Quand on néglige le rayonnement sur le côté de peau, la température diminue de première couche de tissu jusqu'à la couche de peau mais elle reste toujours supérieure à 100°C, alors on aura des brûlures de troisième degré.

Cas standard (Baseline 2)

$T_{air}=298\text{ K}$; $T_{inf}=298\text{ K}$; $T_i=309.9\text{ K}$

$h_{air}=8\text{ Watts/K. m}^2$;

Interouches: $h_{air1}=4$; $h_{air2}=4$; $h_{air3}=4\text{ Watts/K.m}^2$;

$I_{convpeau}=0$

$I_{radpeau}=1$ (rayonnement coté peau, $\epsilon_{peau} = 0.60$)

$$\begin{cases} \alpha_{c1} = 0,98 \\ \tau_{c1} = 0,02 \end{cases} T_{\infty} = 25^{\circ}\text{C}$$

Dans ce cas on laisse les mêmes paramètres de cas précédent, mais on laisse le rayonnement coté peau et on annule la convection de même coté. On trouve que la température diminue plus que le premier cas, on dit que l'absence de convection est plus important que l'absence de rayonnement, mais la température de peau est de l'environ 89°C donc on reste toujours dans la zone des brûlures troisième degré.

Cas standard (Baseline 3)

$T_{air}=298\text{ K}$; $T_{inf}=298\text{ K}$; $T_i=309.95\text{ [K]}$

$h_{air}=8\text{ Watts/K.m}^2$;

Intercouches: $h_{air1}=4$; $h_{air2}=4$; $h_{air3}=4\text{ Watts/K.m}^2$;

$h_{convpeau}=1\text{ hp}=4\text{ Watts/K.m}^2$;

$h_{radpeau}=1$ (rayonnement coté peau, $\epsilon_{peau} = 0,60$)

$$\begin{cases} \alpha_{c1} = 0,98 \\ \tau_{c1} = 0,02 \end{cases} \quad T_{\infty} = 25^{\circ}\text{C}$$

Tableau3.5 :La variation de température de la première couche de tissu vers la peau et l’Absorptivité et la Transmissivité des couches de tissu et de la peau

	C1	C2	C3	Peau	Organisme
Absorptivité (α)	0.98	0.5	0.5	1.0	---
Transmissivité (τ)	0.02	0.5	0.5	0.0	---
Température ($^{\circ}\text{C}$)	159.07	135.55	106.74	72.19	36.8
	Air 1	Air 2	Air 3		
Température ($^{\circ}\text{C}$)	147.31	121.14	89.46		

On prend tous les paramètres en considération on trouve que la température de la couche externe de la veste et la couche de peau sont diminués respectivement de 159.0755°C à 72.1884°C avec ces résultats on remarque que la présence des deux paramètres (convection/rayement) contribue à la réduction de la température mais on reste dans le problème des brûlures.

Cas standard (Baseline 3-1)

$T_{air}=298\text{ K}$; $T_{inf}=298\text{ K}$; $T_i=309.95\text{ K}$

$h_{air}=8\text{ Watts/K. m}^2$;

Intercouches: $h_{air1}=4$; $h_{air2}=4$; $h_{air3}=4\text{ Watts/K. m}^2$;

Iconvpeau=1 hp=4 Watts/K. m²;

Iradpeau=1 (rayonnement coté peau, Epsilon Peau = 0,98)

$$\begin{cases} \alpha_{C1} = 0,98 \\ \tau_{C1} = 0,02 \end{cases} \quad T_{\infty} = 25^{\circ}C$$

Tableau3.6 :La variation de température de la première couche de tissu vers la peau et l’Absorptivité et la Transmissivité des couches de tissu et de la peau

	C1	C2	C3	Peau	Organisme
Absorptivité (α)	0.98	0.5	0.5	1.0	---
Transmissivité (τ)	0.02	0.5	0.5	0.0	---
Température (°C)	157.58	131.18	98.62	66.09	36.8
	Air 1	Air 2	Air 3		
Température (°C)	144.38	114.9	82.35		

Dans ce cas-là on change que l’epsilon de peau on le met 0.98, on trouve que la température de couche01 diminué presque par 2°C et la température de la peau diminué avec 6°C, donc la couleur de peau joue un rôle important pour l’augmentation ou bien la diminution de la température(plus epsilon est de grand plus la température est petite).Mais il reste toujours des brulures.

Cas standard (Baseline 4)

Tair=298 K; Tinf=298 K; Ti=309.95 K

hair=8Watts/K. m²;

Intercouches: hair1=0; hair2=0; hair3=4Watts/K. m²;

Iconvpeau=1 hp=4Watts/K.m²;

Iradpeau=1 (rayonnement coté peau, Epsilon Peau = 0.60)

$$\begin{cases} \alpha_{C1} = 0,98 \\ \tau_{C1} = 0,02 \end{cases} T_{\infty} = 25^{\circ}C$$

Maintenant on revenue aux baseline3 est on annulent la convection dans les lames d'air 1 et 2, on trouve que la température de peau est diminué jusqu'à 65.7°C donc on dit que l'absence de convection dans les deux premiers airs réduit la température travers la tenue plus que la présence d'elles (le problème de brulure il se reste) .

Cas standard (Baseline 5)

Tair=298 K; Tinf=298 K; Ti=309.95 [K]

hair=8Watts/K. m²;

Intercouches: hair1=0; hair2=0; hair3=0 Watts/K. m²;

Iconvpeau=1 hp=4Watts/K. m²;

Iradpeau=1 (rayonnement coté peau, Epsilon Peau = 0,60)

$$\begin{cases} \alpha_{C1} = 0,98 \\ \tau_{C1} = 0,02 \end{cases} T_{\infty} = 25^{\circ}C$$

Tableau3.7 :La variation de température de la première couche de tissu vers la peau et l'Absorptivité et la Transmissivité des couches de tissu et de la peau

	C1	C2	C3	Peau	Organisme
Absorptivité (α)	0.98	0.5	0.5	1.0	---
Transmissivité (τ)	0.02	0.5	0.5	0.0	---
Température (°C)	163.82	140.67	108.63	62.49	36.8
	Air 1	Air 2	Air 3		
Température (°C)	152.25	124.65	85.56		

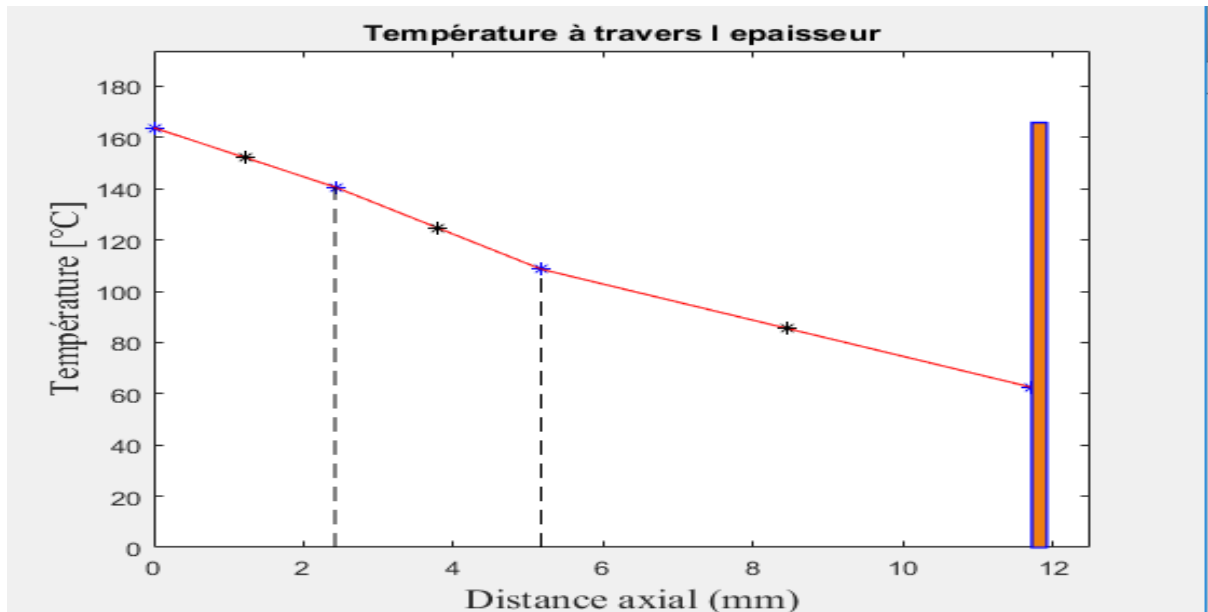


Figure 3.4: Courbe de la température (°C) en fonction de la distance axiale (mm).

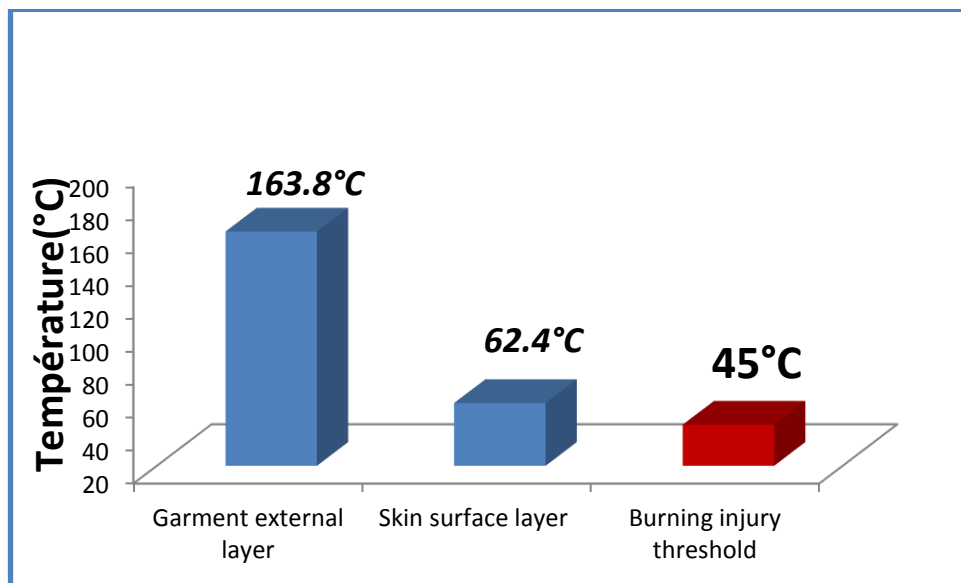


Figure 3.5 : Histogramme représente la variation de la température en (°C) entre TC1 et Tpeau et la température de brûlure premier degré

On garde les mêmes paramètres et on néglige la convection dans les trois couches d'air on trouve que la température diminue de 163.8178°C (couche 1) jusqu'à 62.4873°C (la peau) alors le cas standard 5 est le plus adéquat avec la bibliographie.

Pour cela on garde les mêmes conditions de Baseline 5 et nous étudierons le changement de température en fonction de la couleur de peau.

Baseline 5.1 :

$T_{air}=298\text{ K}$; $T_{inf}=298\text{ K}$; $T_i=309.95\text{ K}$

$h_{air}=8\text{ Watts/K. m}^2$;

Intercouches: $h_{air1}=0$; $h_{air2}=0$; $h_{air3}=0\text{ Watts/K. m}^2$;

$h_{convpeau}=1\text{ hp}=4\text{Watts/K. m}^2$;

$h_{radpeau}=1$ (rayonnement coté peau, Epsilon Peau = 0, 7)

$$\begin{cases} \alpha_{C1} = 0,98 \\ \tau_{C1} = 0,02 \end{cases} T_{\infty} = 25^{\circ}C$$

Tableau3.8 :La variation de température de la première couche de tissu vers la peau et l’Absorptivité et la Transmissivité des couches de tissu et de la peau

	C1	C2	C3	Peau	Organisme
Absorptivité (α)	0.98	0.5	0.5	1.0	---
Transmissivité (τ)	0.02	0.5	0.5	0.0	---
Température ($^{\circ}C$)	163.42	139.08	105.14	61.30	36.8
	Air 1	Air 2	Air 3		
Température ($^{\circ}C$)	151.24	122.11	83.22		

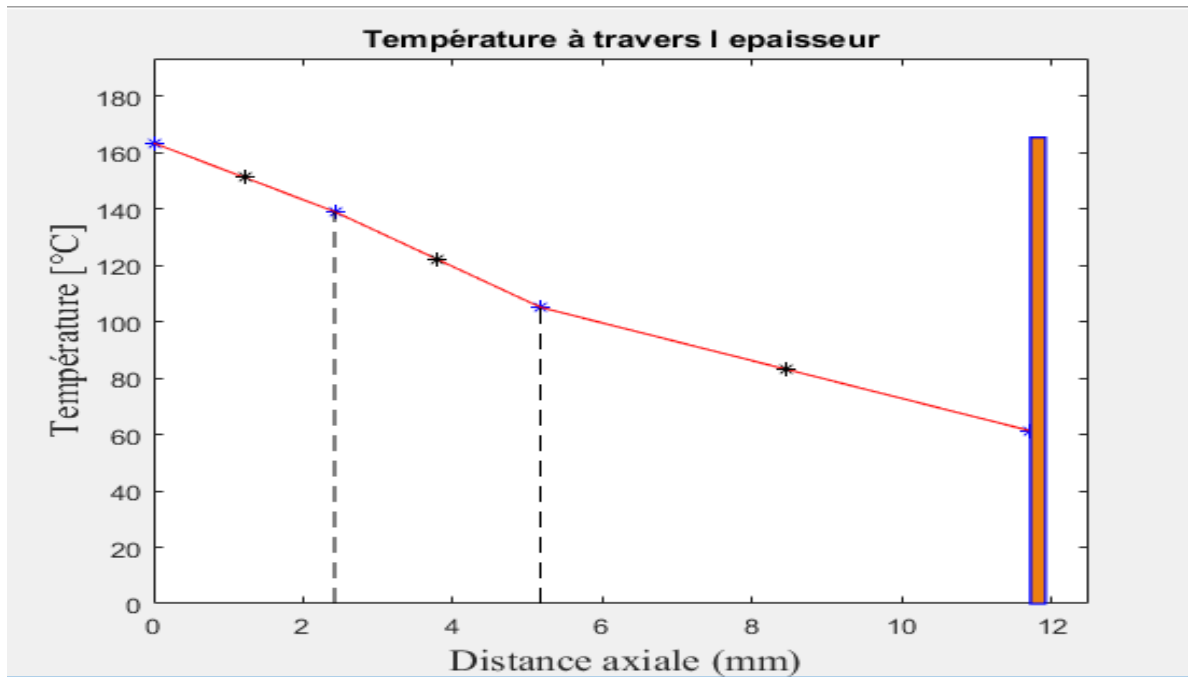


Figure 3.6: Courbe de la température (°C) en fonction de la distance axiale (mm).

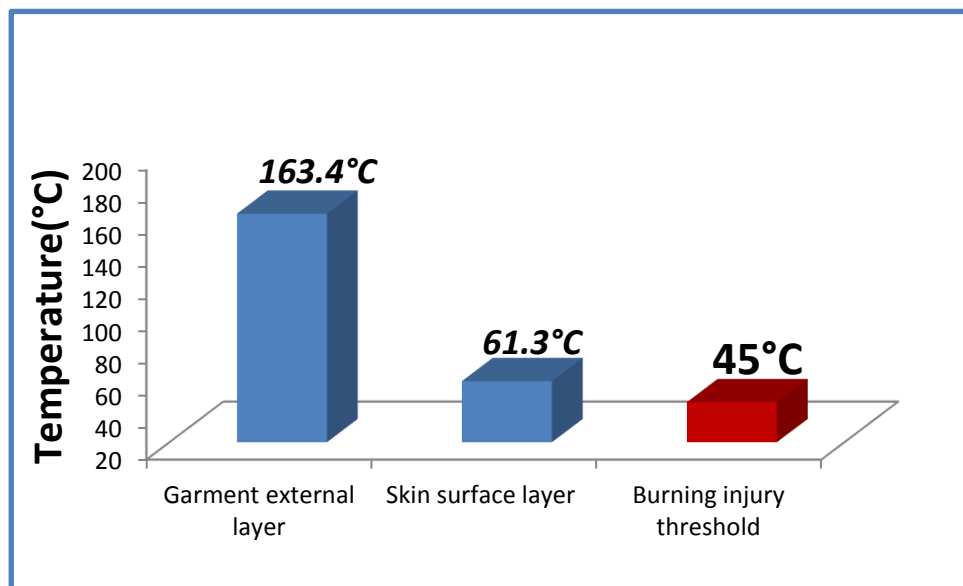


Figure 3.7 : Histogramme représente la variation de la température en (°C) entre TC1 et Tpeau et la température de brûlure premier degré.

Lorsqu'on augmente la valeur d'Epsilon à 0.7 la température de la peau diminue à 61.30°C et il n'y a pas de changement significatif de la température de la couche externe de la veste donc on remarque que l'augmentation de epsilon avec 0.1°C diminuait la température de peau par 1°C.

Baseline5.2:

Tair=298 K; Tinf=298 K; Ti=309.95 K

hair=8 Watts/K. m²;

Intercouches: hair1=0; hair2=0; hair3=0 Watts/K. m²;

Iconvpeau=1 hp=4 Watts/K. m²;

Iradpeau=1 (rayonnement coté peau, Epsilon Peau = 0, 80)

$$\begin{cases} \alpha_{c1} = 0,98 \\ \tau_{c1} = 0,02 \end{cases} \quad T_{\infty} = 25^{\circ}C$$

Lorsqu'on augmente la valeur d'Epsilon à 0.8 la température de la peau diminue à 60.1725°C et il n'y a pas de changement significatif de la température de la couche externe de la veste.

Baseline5.3:

Tair=298 K; Tinf=298 K; Ti=309.95 K

hair=8 Watts/K. m²;

Iconvpeau=1 hp=4 Watts/K. m²;

Iradpeau=1 (rayonnement coté peau, Epsilon Peau = 0, 85)

$$\begin{cases} \alpha_{c1} = 0,98 \\ \tau_{c1} = 0,02 \end{cases} \quad T_{\infty} = 25^{\circ}C$$

On augmente la valeur de Epsilon à 0.85 la température de la peau diminue à 59.6336°C et la température de la couche externe de la veste diminue à 162.9467°C.

Baseline 5.4:

Tair=298 K; Tinf=298 K; Ti=309.95 K

hair=8 Watts/K. m²;

Intercouches: hair1=0; hair2=0; hair3=0 Watts/K. m²;

Iconvpeau=1 hp=4 Watts/K. m²;

Iradpeau=1 (rayonnement coté peau, Epsilon Peau = 0, 90)

$$\begin{cases} \alpha_{c1} = 0,98 \\ \tau_{c1} = 0,02 \end{cases} \quad T_{\infty} = 25^{\circ}C$$

On augmente la valeur de Epsilon à 0.90 la température de la peau diminue à 59.1133°C et il n'y a pas de changement significatif de la température de la couche externe de la veste.

Baseline5.5 :

Tair=298 K; Tinf=298 K; Ti=309.95 K

hair=8 Watts/K. m²;

Intercouches: hair1=0; hair2=0; hair3=0 Watts/K. m²;

Iconvpeau=1 hp=4 Watts/K.m²;

Iradpeau=1 (rayonnement coté peau, Epsilon Peau = 0, 95)

$$\begin{cases} \alpha_{c1} = 0,98 \\ \tau_{c1} = 0,02 \end{cases} \quad T_{\infty} = 25^{\circ}C$$

On augmente la valeur de Epsilon à 0.95 la température de la peau diminue à 58.6117 °C et il n'y a pas de changement significatif de la température de la couche externe de la veste. .

Cas standard (Baseline 5-6)

Tair=298 K; Tinf=298 K; Ti=309.95 K

hair=8 Watts/K.m²;

Intercouches: hair1=0; hair2=0; hair3=0 Watts/K. m²;

Iconvpeau=1 hp=4 Watts/K. m²;

Iradpeau=1 (rayonnement coté peau, Epsilon Peau = 0,98)

$$\begin{cases} \alpha_{c1} = 0,98 \\ \tau_{c1} = 0,02 \end{cases} \\ T_{\infty} = 25^{\circ}C$$

Tableau3.9 :La variation de température de la première couche de tissu vers la peau et l’Absorptivité et la Transmissivité des couches de tissu et de la peau.

	C1	C2	C3	Peau	Organisme
Absorptivité (α)	0.98	0.5	0.5	1.0	---
Transmissivité (τ)	0.02	0.5	0.5	0.0	---
Température (°C)	162.62	135.83	97.85	58.32	36.8
	Air 1	Air 2	Air 3		
Température (°C)	149.23	116.84	78.09		

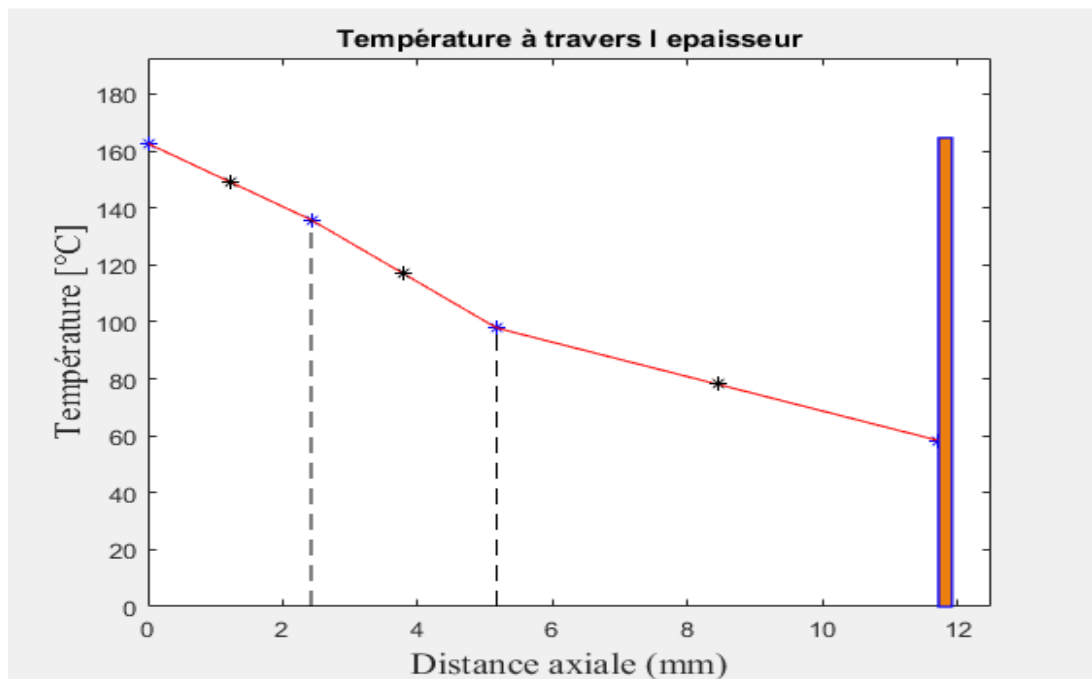


Figure3.8: Courbe de la température (°C) en fonction de la distance axiale (mm).

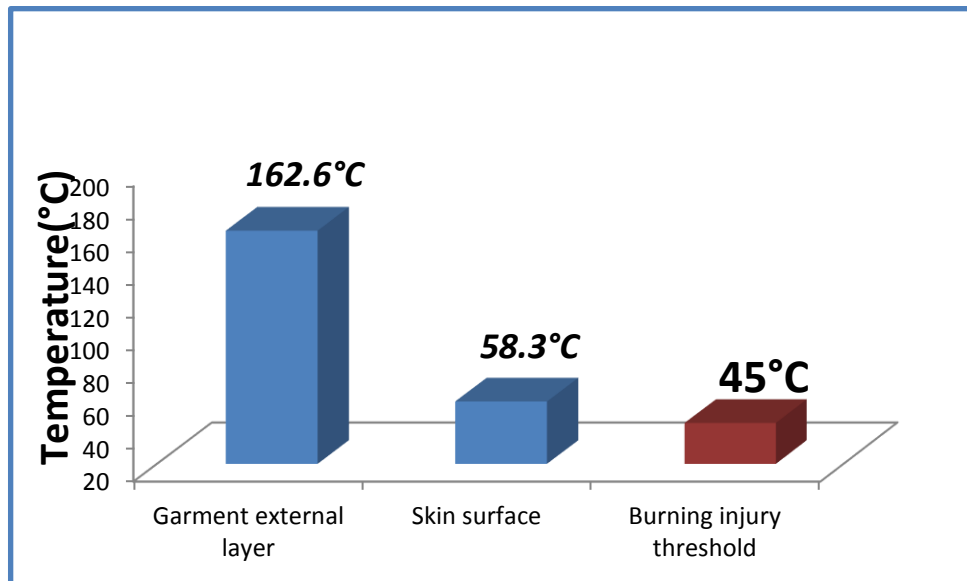


Figure 3.9 : Histogramme represente la variation de la temperature en (°C) entre TC1 et Tpeau et la temperature de brulure premier degré

On augmente la valeur de Epsilon à 0.98 la température de la peau diminue à 58,31 °C et il n'y a pas de changement significatif de la température de la couche externe de la veste

On remarque que lorsqu'on augmente l'épsilon la température de la peau diminue.

La variation relative des TC1 et Tpeau entre cas31 et cas56

$$\Delta_{TC1} = (T_{c1_31} - T_{c1_56}) / T_{c1_31}$$

$$\Delta_{TC1} = -0.0320 \%$$

$$\Delta_{Tpeau} = (T_{peau_31} - T_{peau_56}) / T_{peau_31}$$

$$\Delta_{Tpeau} = 662.6962 \%$$

Le gradient est très élevé

$$\text{Cas56 : grad} = (T_{c1_56} - T_{peau_56}) / E_{globale} = 8.8995e+03$$

$$\text{Cas31 : grad} = (T_{c1_31} - T_{peau_31}) / E_{globale} = 7.8065e+03$$

A partir des résultats précédents, on peut dire que le cas standard 5.6 est le plus adéquat avec la bibliographie [2], mais la température en surface de peau reste toujours supérieure à la limite de brulure de 1^{er} degré (45°C).

3.3.2 Modèle sans réflectivité, avec conduction dans les lames d'air

Dans ce modèle, on prend en compte la convection dans les lames d'air et on considère en plus, la contribution de la résistance thermique conductive de ces lames, dans les équations de bilan.

Étant donné que la conductivité dans les lames d'air est variable en fonction de la température, on va considérer plusieurs valeurs de conductivité, à des températures situées dans l'intervalle des températures retrouvées dans le modèle avec absence de conduction dans les lames d'air (section 3.3.1).

Baseline 6.11 : $\lambda_{\text{air}}(90^\circ\text{C}) = 0.0084$ [W/m K]

Baseline 6.12 : $\lambda_{\text{air}}(100^\circ\text{C}) = 0.0316$ [W/m K]

Baseline 6.13 : $\lambda_{\text{air}}(120^\circ\text{C}) = 0.0331$ [W/m K]

Baseline 6.14 : $\lambda_{\text{air}}(140^\circ\text{C}) = 0.0345$ [W/m K]

Tableau3.10: Absorptivité et la Transmissivité des couches de tissu et de la peau.

	C1	C2	C3	Peau	Organisme
Absorptivité (α)	0.98	0.5	0.5	1.0	///
Transmissivité (τ)	0.02	0.5	0.5	0.0	///

Cas standard (Baseline 6.1)

$T_{\text{air}}=298$; $T_{\text{inf}}=298$; $T_{\text{i}}=309.95$ [K]

$h_{\text{air}}=8$ Watts/K. m²;

Intercouches: $h_{\text{air}1}=4$; $h_{\text{air}2}=4$; $h_{\text{air}3}=4$ Watts/K. m²;

$h_{\text{convpeau}}=1$ hp=4 Watts/K. m²;

$\epsilon_{\text{radpeau}}=1$ (Epsilon peau =0,6)

$$\begin{cases} \alpha_{C1} = 0,98 \\ \tau_{C1} = 0,02 \end{cases} T_{\infty} = 25^\circ\text{C}$$

Analyse du non linéarité thermique (Lambda Air_i variable avec T)

Cas secondaire 6.11 $T_{\infty} = 25^{\circ}\text{C}$

Tableau3.11 : La variation de température de la première couche de tissu vers la peau.

	C1	C2	C3	peau	Organisme
Température ($^{\circ}\text{C}$)	148.01	116.02	89.22	63.07	36.8

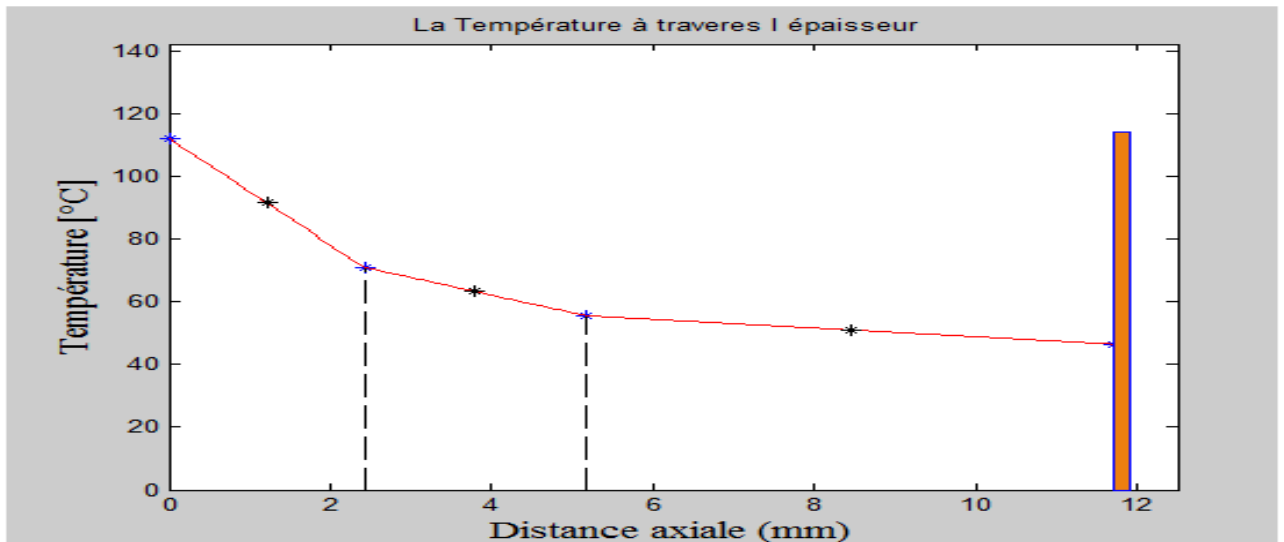


Figure 3.10: Courbe de la température ($^{\circ}\text{C}$) en fonction de la distance axiale (mm).

Les paramètres de **cas secondaire6.11** et **Baseline 3** sont les mêmes, sauf dans ce cas on a la conductivité avec un coefficient de conductivité est variable en fonction de la température

Pour ce cas on a $\lambda(90^{\circ}\text{C}) = 0.0084$ [W/m K].

L'application de ces conditions donne une diminution de température de peau avec 11°C par rapport au cas standard **Baseline3** la même chose pour la première couche de tissu, mais elle dépasse le seuil de brûlures donc on va augmenter λ dans les suivants cas pour voir la variation de température de peau.

Cas secondaire 6.12 $T_{\infty} = 25^{\circ}\text{C}$

Tableau3.12 : La variation de température de la première couche de tissu vers la peau.

	C1	C2	C3	Peau	Organisme
Température ($^{\circ}\text{C}$)	115.65	47.24	57.72	47.47	36.8

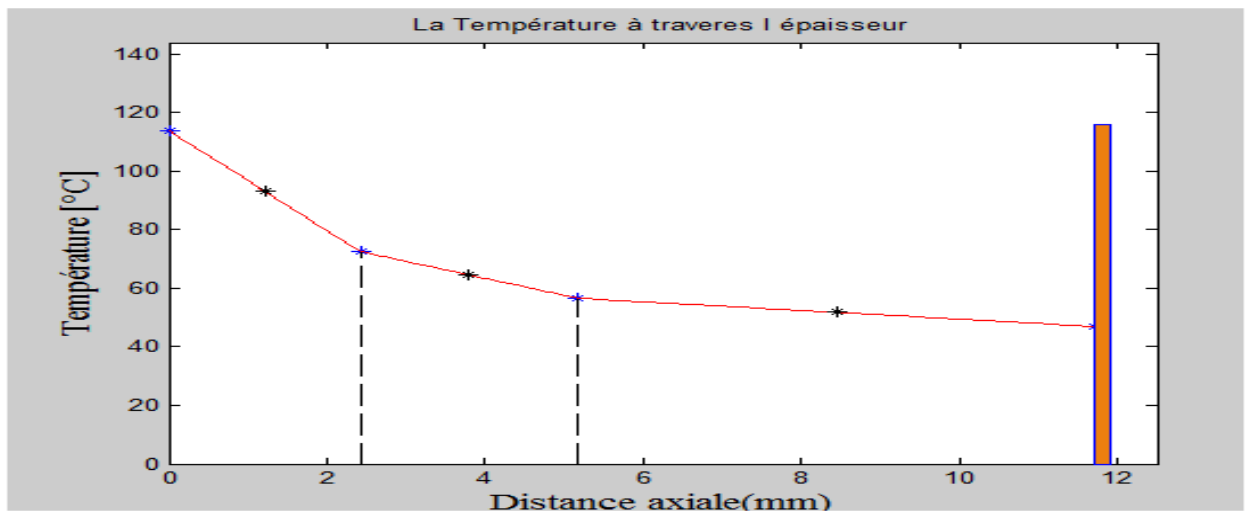


Figure 3.11: Courbe de la température (°C) en fonction de la distance axiale (mm).

On garde les conditions avec le cas précédent et on avait changé le coefficient de conductivité dans ce cas. avec $\lambda(100^\circ\text{C}) = 0.0316 \text{ [W/m K]}$.

Dans ces conditions on trouve que la température de peau dans ce cas égale à 47.4°C donc elle est inférieure par rapport aux Baseline 3 qui été égale à 72°C et aussi inférieure par rapport aux cas précédent

On voit qu'il est proche du seuil de brûlures, il faut descendre de 2.4°C pour atteindre la valeur de 45°C , le seuil des brûlures de premier degré.

Cas secondaire 6.13 $T_\infty = 25^\circ\text{C}$

Tableau3.13 : La variation de température de la première couche de tissu vers la peau.

	C1	C2	C3	Peau	Organisme
Température (°C)	113.9	72.50	56.58	46.92	36.8

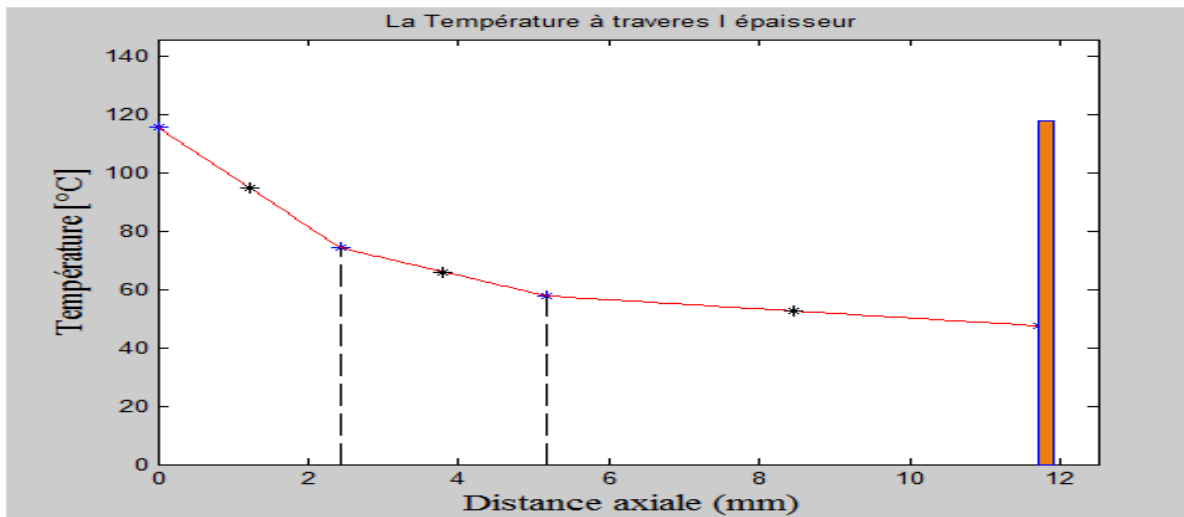


Figure 3.12: Courbe de la température (°C) en fonction de la distance axiale (mm)

La même chose pour ce cas les conditions sont les mêmes on change que le coefficient de conductivité qui égale à $\lambda(120^{\circ}\text{C}) = 0.0331 \text{ [W/m K]}$.

Pour Baseline 6.13 La température est diminué avec 61% de la couche une vert la peau, qu'elle égale à 46.9°C , elle est inférieure par rapport aux cas précédent aussi très inférieure par rapport Baseline 3.

On voit que la diminution de température de peau est mieux dans ce cas que les cas précédent.

Cas secondaire 6.14 $T_{\infty} = 25^{\circ}\text{C}$

Tableau 3.14 : La variation de température de la première couche de tissu vers la peau

	C1	C2	C3	peau	Organisme
Température (°C)	112.32	70.98	55.60	46.45	36.8

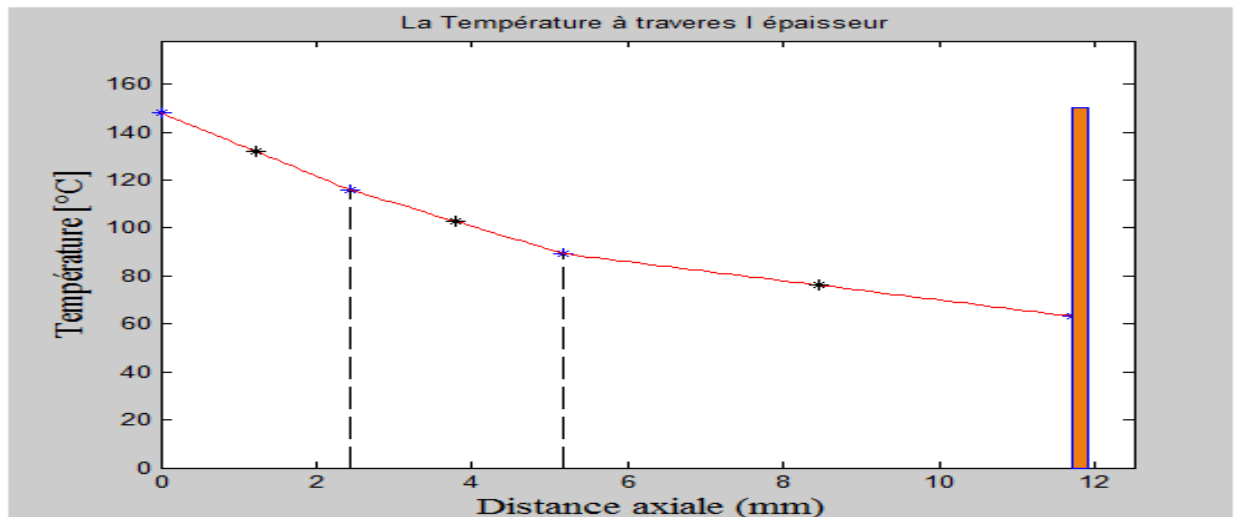


Figure 3.13: Courbe de la température (°C) en fonction de la distance axiale (mm)

Aussi dans ce cas on change que de lambda qui est égale à $\lambda(140^{\circ}\text{C}) = 0.0345[\text{W/m K}]$.

On voit que la température de première couche de tissu et la peau est diminué par 30% par rapport aux baseline 3.

On peut conclure que la variation de conduction en fonction de température contribue pour diminuer la température de première couche de tissu ainsi la température de peau et nous avons trouvé que plus la température des lames d'air augmente plus le lambda augmente et plus la température de peau et première couche diminue.

Alors le cas (Baseline 6.14) il est mieux que les trois premiers cas et que le cas sans conductivité (Baseline 3).

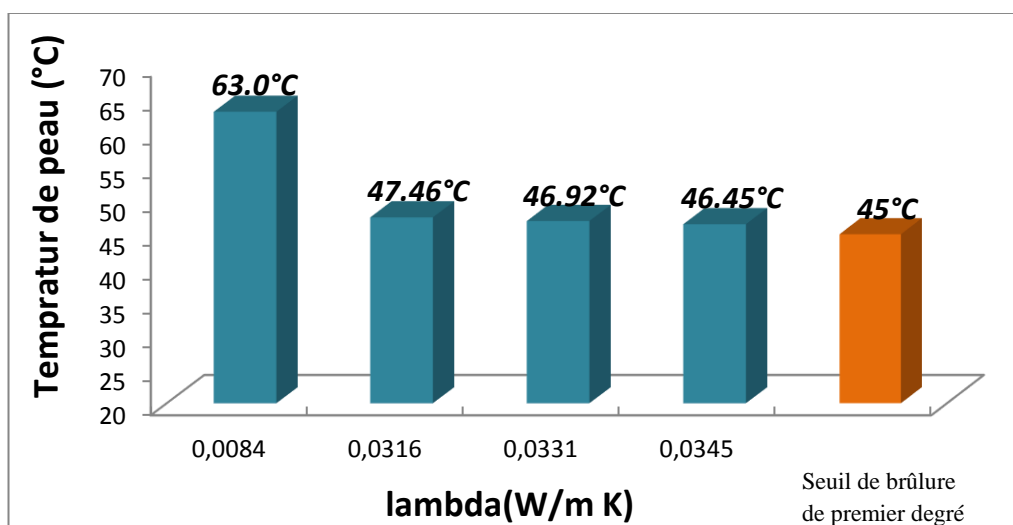


Figure 3.14: Histogrammes présent la variation de la température de peau (°C) en fonction de lambda (W/m K) avec le seuil de brûlure de premier degré

Cas standard (Baseline 6.2)

$T_{air}=298$; $T_{inf}=298$; $T_i=309.95$ [K]

$h_{air}=8$ Watts/K. m^2 ;

Intercouches: $h_{air1}=4$; $h_{air2}=4$; $h_{air3}=4$ Watts/K. m^2 ;

$h_{convpeau}=1$ $h_p=4$ Watts/K. m^2 ;

$\epsilon_{peau}=1$ (Epsilon peau = 0,98)

$$\begin{cases} \alpha_{c1} = 0,98 \\ \tau_{c1} = 0,02 \end{cases} T_{\infty} = 25^{\circ}C$$

Dans les cas suivants (Baseline 6.21 Baseline 6.22 Baseline 6.23 Baseline6.24) on garde les mêmes paramètres avec Baseline 3.1, et on varie le coefficient de conduction (lambda en fonction de la température

Cas secondaire 6.21

Tableau3.15 :La variation de température de la première couche de tissu vers la peau $T_{\infty} = 25^{\circ}C$

	C1	C2	C3	Peau	Organisme
Température (°C)	146.15	111.50	82.51	58.22	36.8

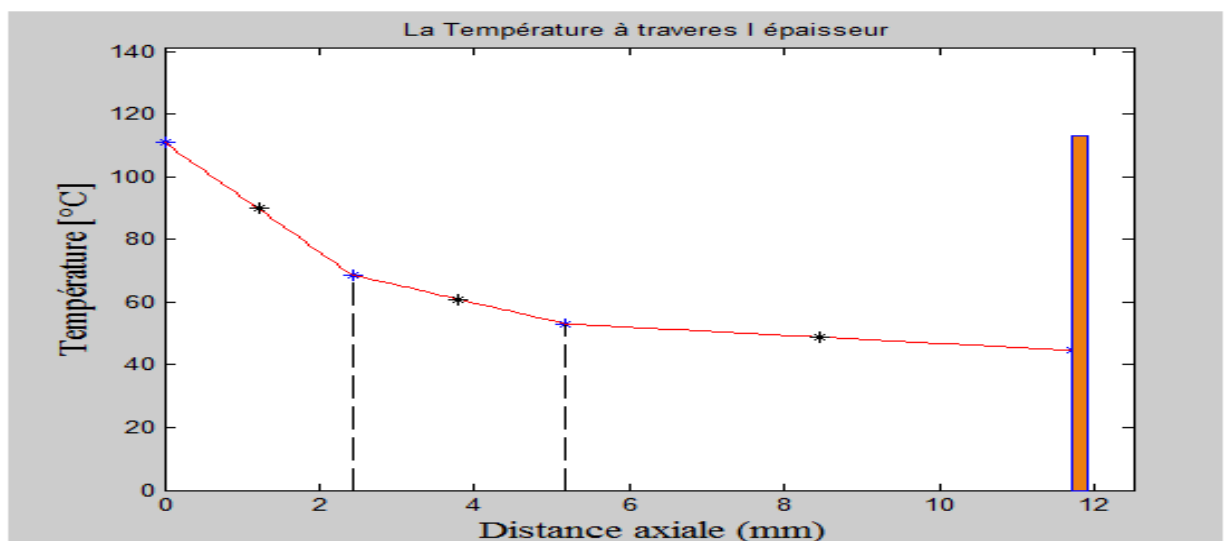


Figure 3.15: courbe de la température (°C) en fonction de la distance axiale (mm)

Chapitre3 : Application à un spécimen de tenue à trois couches de tissus

Premièrement on commence avec $\lambda(90^\circ\text{C}) = 0.0084 \text{ [W/m K]}$., nous trouvons que la température de peau est diminué avec 22% par rapport la température de peau dans le cas Baseline 6.31.

De puits ces résultats on dit que la diminution de température de peau elle est diminué mieux que Baseline 31. Mais il reste des brulures.

Cas secondaire 6.22 $T_\infty = 25^\circ\text{C}$

Tableau3.16 : la variation de température de la première couche de tissu vers la peau.

	C1	C2	C3	peau	Organisme
Température (°C)	114.24	71.8	54.95	45.45	36.8

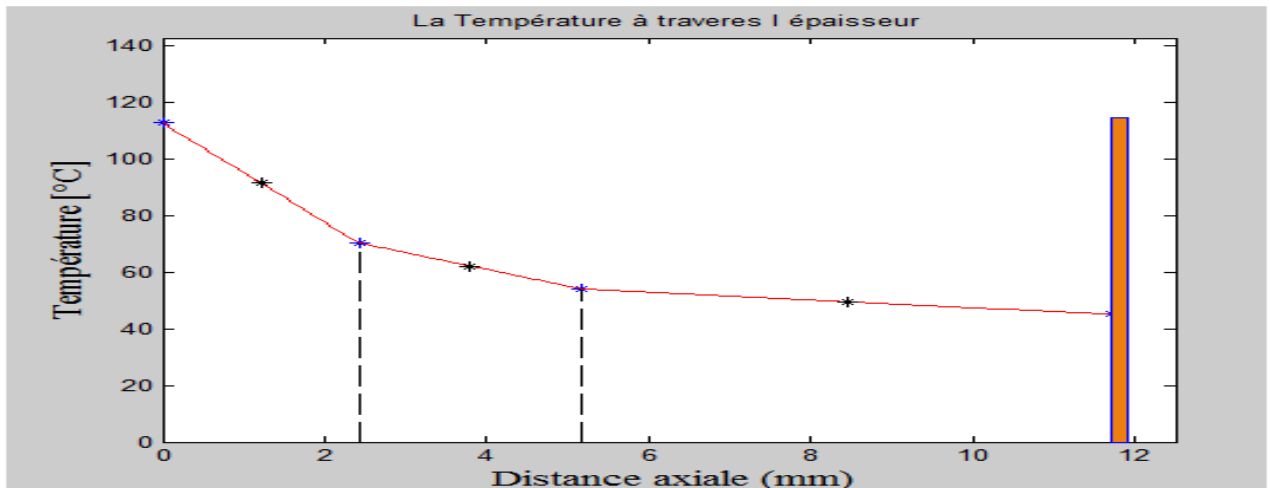


Figure 3.16: courbe de la température (°C) en fonction de la distance axiale (mm).

On remarque qu'il n'y a pas un changement significatif, la température de peau diminue par 5°C par rapport au cas précédent,

Le changement de lambda est en fonction de température des lames d'air, que la température de lame d'air plus de 100°C plus lambda augmente et la température de peau diminue par 5°C

Cas secondaire 6.23 $T_\infty = 25^\circ\text{C}$

Tableau3.17 : La variation de température de la première couche de tissu vers la peau.

	C1	C2	C3	Peau	Organisme
Température(°C)	112.54	70.18	53.98	45.016	36.8

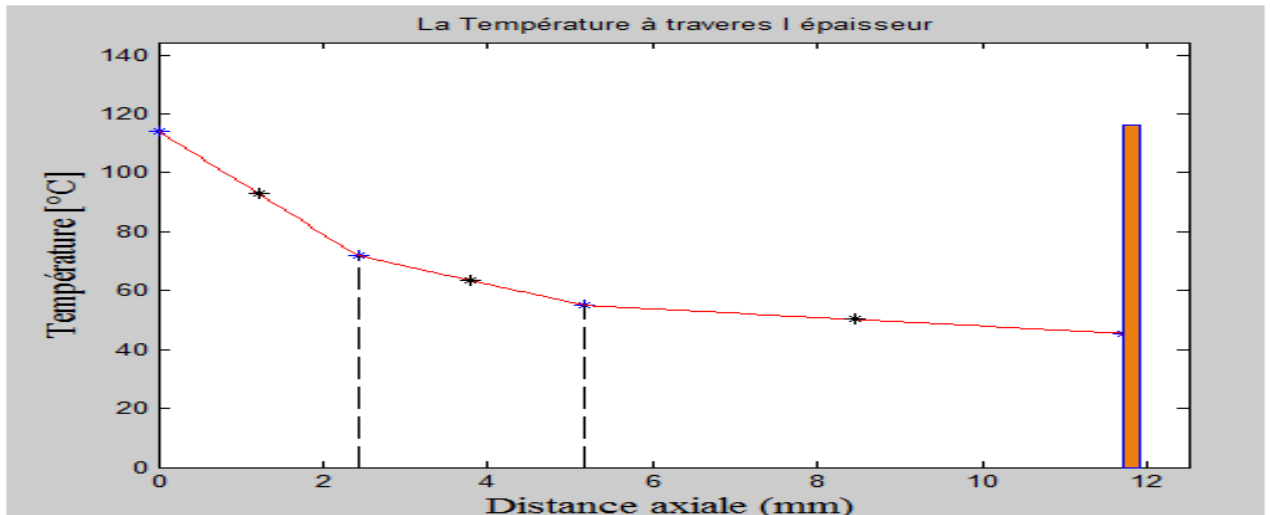


Figure 3.17: Courbe de la température (°C) en fonction de la distance axiale (mm)

La température de peau dans ce cas diminue par 4°C par rapport au cas précédent,

Nous sommes arrivés au seuil de brûlures de premier degré, mais il reste un risque.

Et à partir de là on dit que le cas secondaire 6.23 est mieux que le cas 6.22 et bien sûr que 6.31.

Cas secondaire 6.24

$$T_{\infty} = 25^{\circ}\text{C}$$

Tableau 3.18 : La variation de température de la première couche de tissu vers la peau.

	C1	C2	C3	peau	Organisme
Température (°C)	111.00	68.76	53.13	44.64	36.8

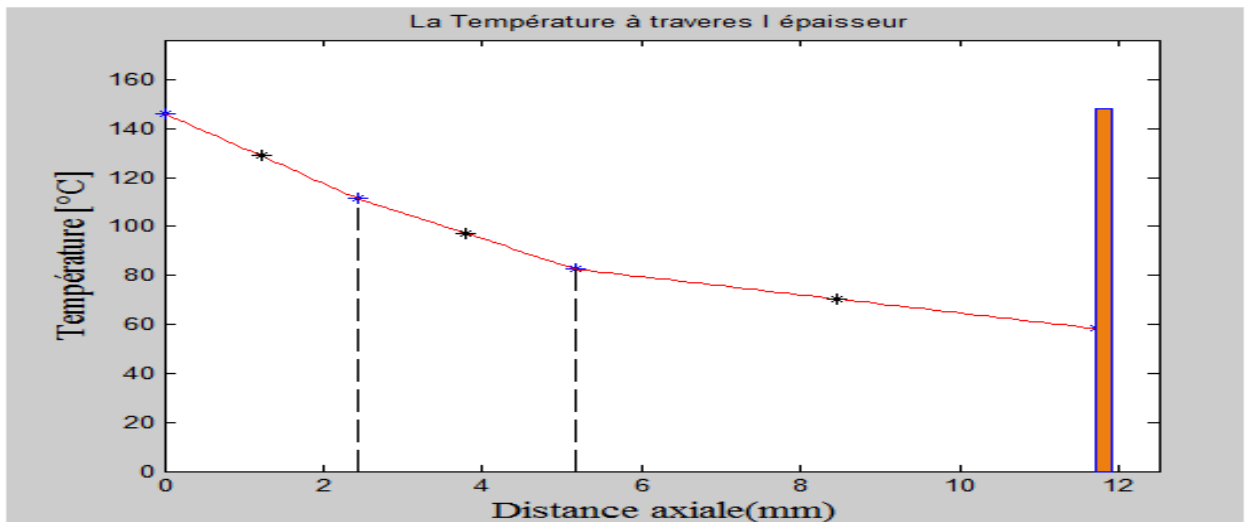


Figure 3.18: Courbe de la température (°C) en fonction de la distance axiale (mm)

Nous observons à travers cette condition que la température diminue progressivement de la première couche de tissu qui égale à 111°C pour atteindre 44.6°C.

Et grâce à ces résultats, nous pouvons dire que l'augmentation de la conduction et de l'épaisseur de peau plus contribue à abaisser la température à l'intérieur de la tenue.

On peut aussi dire que Baseline 6.24 est le meilleur des trois cas précédents.

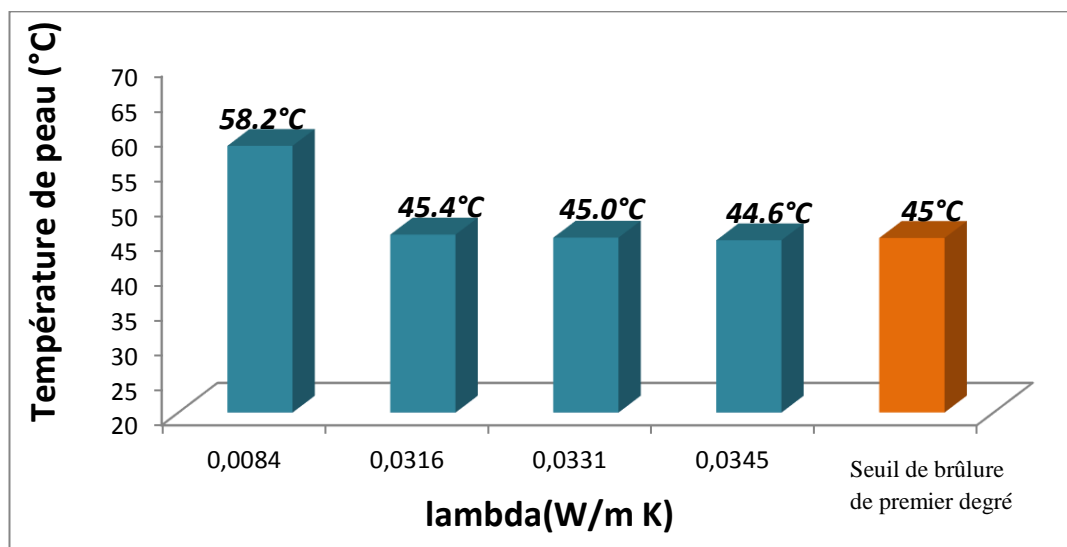


Figure 3.19: Histogrammes représentant la variation de la température de peau (°C) en fonction de lambda (W/m K) avec le seuil des brûlures de premier degré

Cas standard (Baseline 6.3)

Tair=298; Tinf=298; Ti=309.95 [K]

hair=8 Watts/K. m²;

Intercouches: hair1=0; hair2=0; hair3=0Watts/K. m²; Seule la conduction dans les lames d'air

Iconvpeau=1 hp=4 Watts/K. m²;

Iradpeau=1 (Epsilon peau = 0,60)

$$\begin{cases} \alpha_{C1} = 0,98 \\ \tau_{C1} = 0,02 \end{cases} T_{\infty} = 25^{\circ}C$$

Les conditions dans le cas standard Baseline 6.3 sont les mêmes conditions avec Baseline 5 (nous avons annulé de la convection dans les trois couche de tissu et le epsilon de peau est égale à 0.6) sauf là on a de conduction qui est varié en fonction température comme les deux premiers cas standard 6.1 et 6.2.

Cas secondaire6.31 $T_{\infty} = 25^{\circ}C$

Tableau3.19 :La variation de température de la première couche de tissu vers la peau

	C1	C2	C3	peau	Organisme
Température (°C)	150.76	111.3	80.90	51.64	36.8

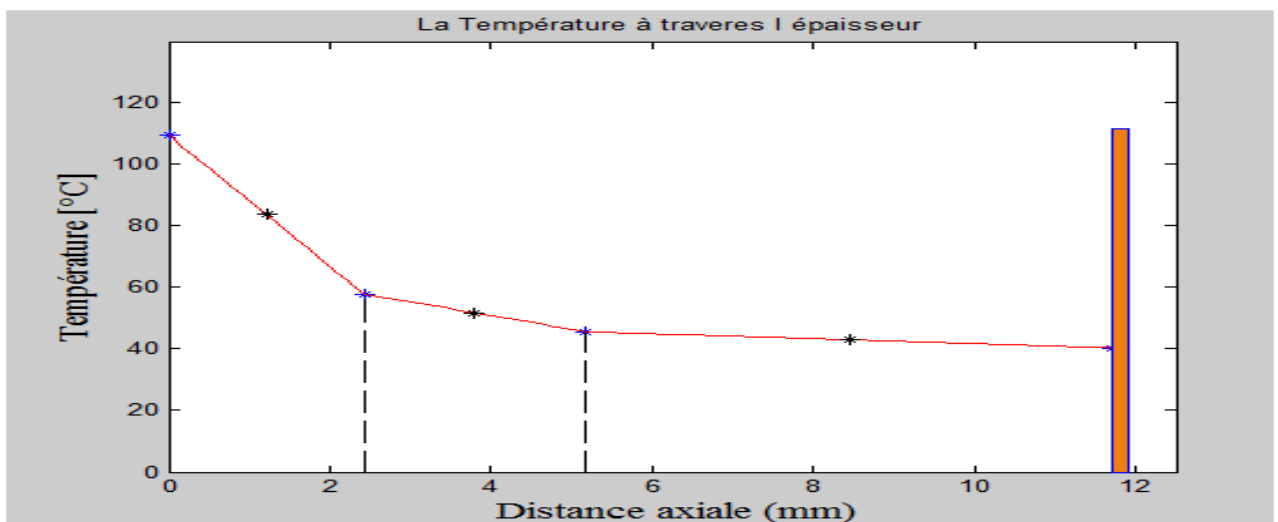


Figure 3.20: Courbe de la température (°C) en fonction de la distance axiale (mm)

Nous absorbons que la température de peau est deminuit avec plus de 20°C par rapport au **Baseline 5**.

Mais malgré ces résultats on n'avait pas passé le degré de brulure donc on va essayer de augmenter la valeur de lambda pour voir ce qu'on va trouver.

Cas secondaire 6.32 $T_{\infty} = 25^{\circ}C$

Tableau3.20 : La variation de température de la première couche de tissu vers la peau.

	C1	C2	C3	peau	Organisme
Température (°C)	112.82	60.42	46.82	40.70	36.8

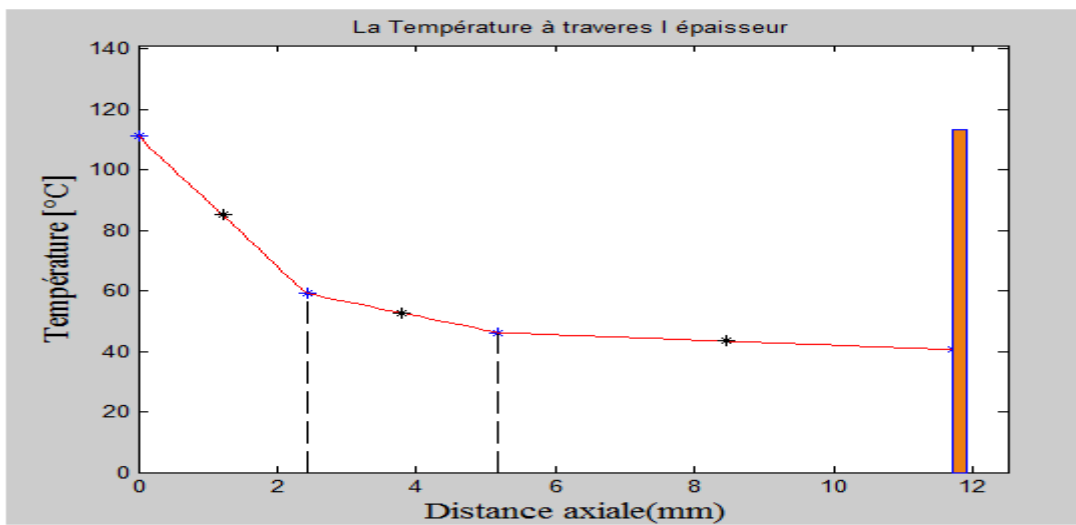


Figure 3.21: Courbe de la température (°C) en fonction de la distance axiale (mm)

Dans ce cas on augmente lambda à $\lambda(100^{\circ}C) = 0.0316 [W/m K]$.

On trouve de température de peau inférieure avec 11°C par rapport au cas précédent et on avait passé le danger des brulures de premier degré.

Cas secondaire 6.33 $T_{\infty} = 25^{\circ}C$

Tableau3.21 : La variation de température de la première couche de tissu vers la peau

	C1	C2	C3	peau	Organisme
Température (°C)	111.03	59.02	46.14	40.50	36.8

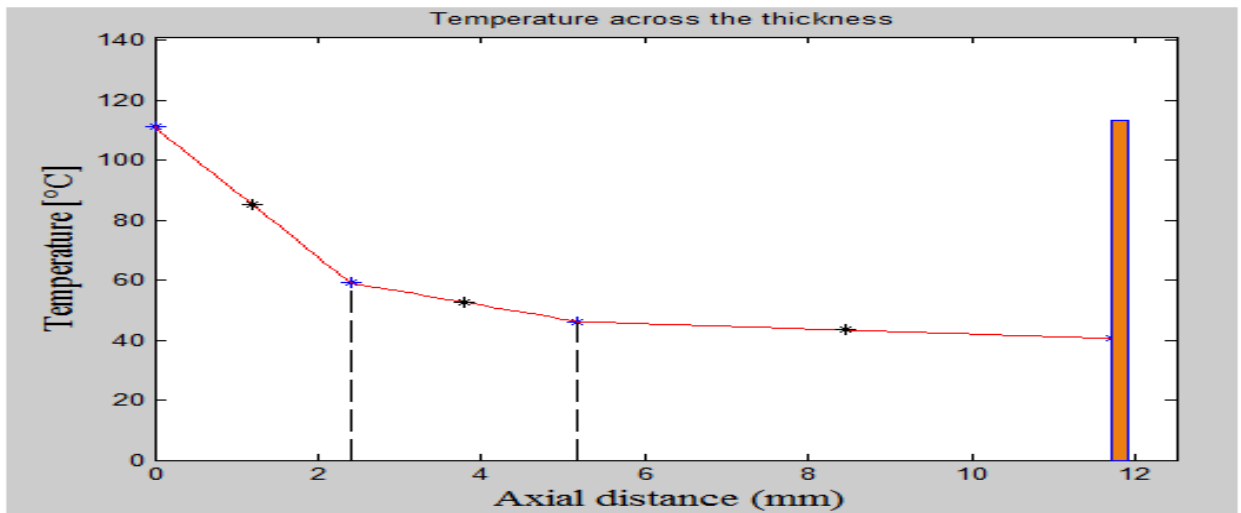


Figure 3.22: Courbe de la température (°C) en fonction de la distance axiale (mm)

La même chose pour **Baseline 6.32** car la diminution de la température de la peau et la première couche de tissu interne elle ne dépasse pas le 0.2°C, on peut dire aussi que l'augmentation dans lambda elle ne change pas beaucoup dans les températures de couche peau et premier couche de tissu.

Et en plus on dit que nous avons passer le degré de bruluer de premier degré.

Cas secondaire 6.34 $T_{\infty} = 25^{\circ}C$

Tableau3.22 :la variation de température de la première couche de tissu vers la peau

	C1	C2	C3	peau	Organisme
Température (°C)	109.43	57.82	45.59	40.35	36.8

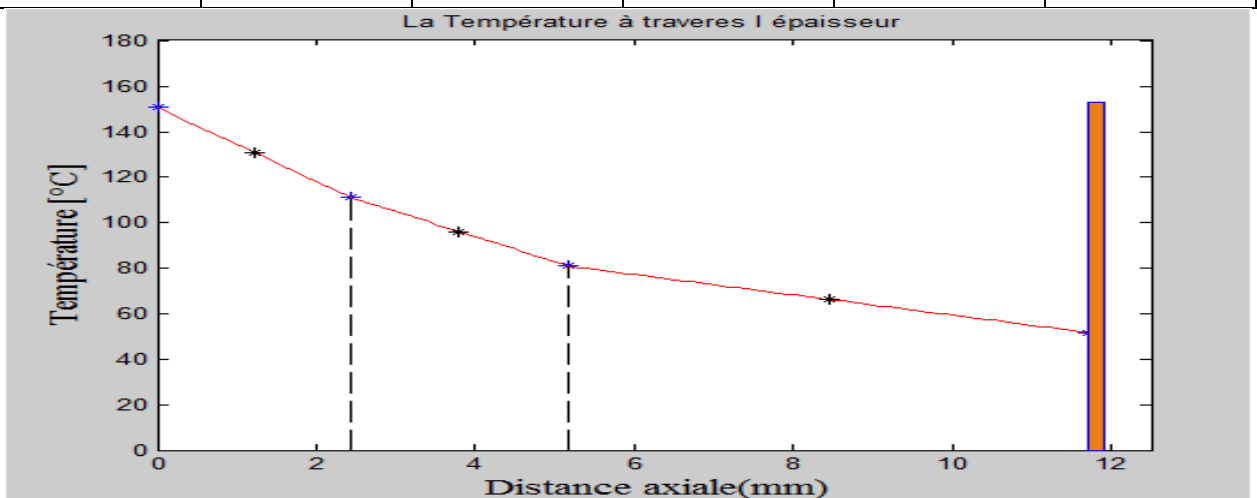


Figure 3.23: Courbe de la température (°C) en fonction de la distance axiale (mm)

Pour le cas secondaire 6.34, nous trouvons que il n'y'a pas un changement significatif de la diminution de température de peau, elle diminue par 2°C par rapport au cas précédent.

Nous avons passer le risque des brulures.

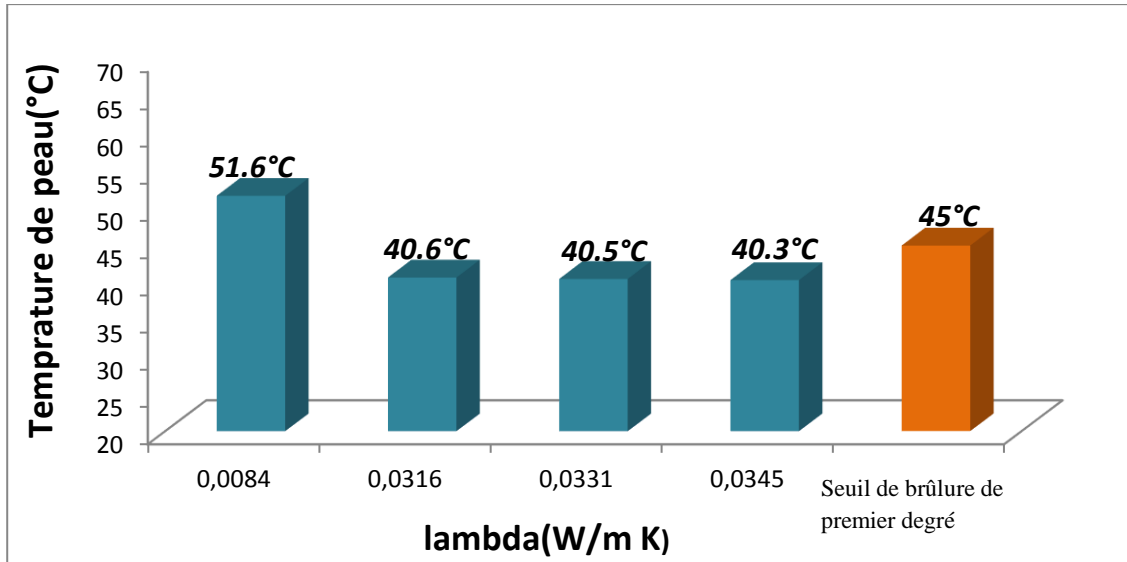


Figure 3.24: Histogrammes represent la variation de la température de peau (°C) en fonction de lambda (W/m K) avec le seuil des brûlures de premier degré

Cas standard (Baseline 6.4)

Tair=298; Tinf=298; Ti=309.95 [K]

hair=8 Watts/K. m²;

Intercouches: hair1=0; hair2=0; hair3=0Watts/K. m²; Seule la conduction dans les lames d'air

Iconvpeau=1 hp=4 Watts/K. m²;

Iradpeau=1 (Epsilon peau = 0,98)

$$\begin{cases} \alpha_{c1} = 0,98 \\ \tau_{c1} = 0,02 \end{cases} T_{\infty} = 25^{\circ}C$$

Les conditions dans le cas standard Baseline 6.4 ce sont les mêmes conditions avec Baseline 5.6 (nous avons annulé de la convection dans les trois lames d'air et nous avons augmenté le epsilon de peau jusqu'à 0.98) sauf là on a de conduction qui est varié en fonction température comme les trois premiers cas standard.

Cas secondaire 6.41 $T_{\infty} = 25^{\circ}C$

Tableau3.23 : la variation de température de la première couche de tissu vers la peau.

	C1	C2	C3	Peau	Organisme
Température (°C)	149.22	106.54	73.71	49.19	36.8

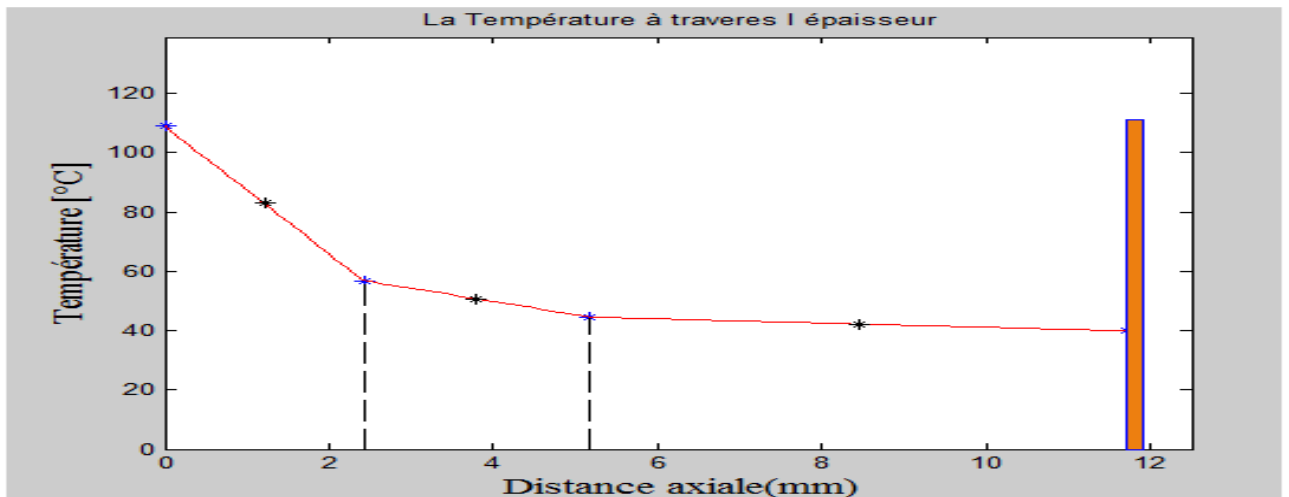


Figure 3.25: Courbe de la température (°C) en fonction de la distance axiale (mm)

Dans ce cas on trouve que la température de peau est diminuée avec presque 9°C par rapport au baseline 5.6 et elle est égale à 49.1°C. Donc dans ce cas il y'a de brulure

Cas secondaire 6.42 $T_{\infty} = 25^{\circ}C$

Tableau3.24 : La variation de température de la première couche de tissu vers la peau.

	C1	C2	C3	Peau	Organisme
Température (°C)	112.22	59.27	45.60	40.17	36.8

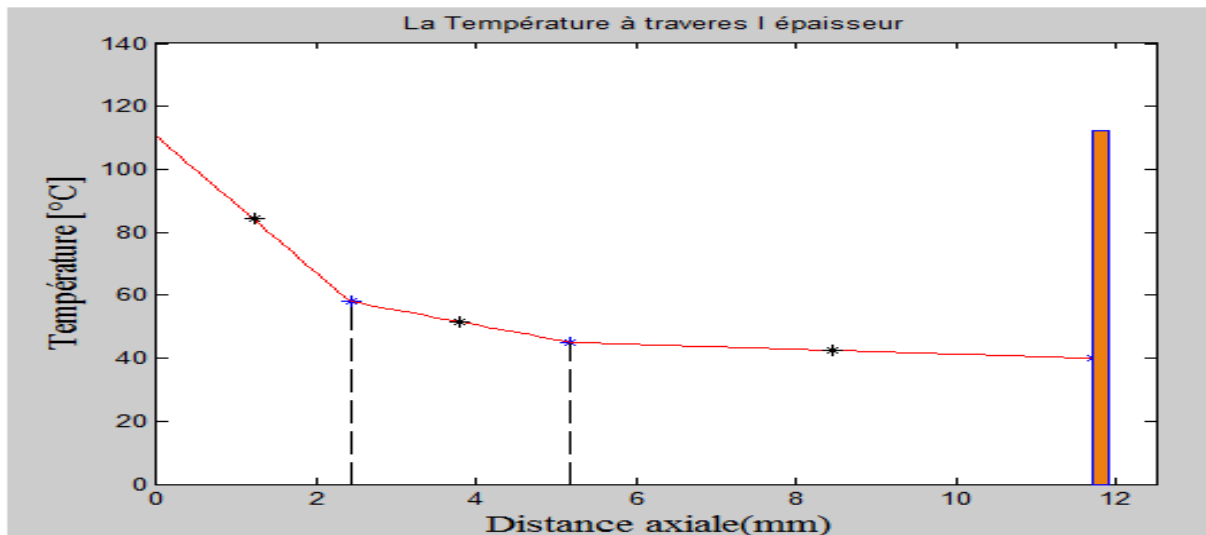


Figure 3.26: Courbe de la température (°C) en fonction de la distance axiale (mm)

Dans ce cas-là la température a diminué de 10°C par rapport au cas précédent et elle est passée le degré de brûleur (45°C) et donc ce cas aussi il est mieux que le cas Baseline 5.6 et le cas secondaire 6.41 par ce que on avait passé le seuil des brûlures de premier degré.

Cas secondaire 6.43 $T_{\infty} = 25^{\circ}C$

Tableau 3.25 : La variation de température de la première couche de tissu vers la peau

	C1	C2	C3	Peau	Organisme
Température (°C)	110.46	57.95	45.02	40.00	36.8

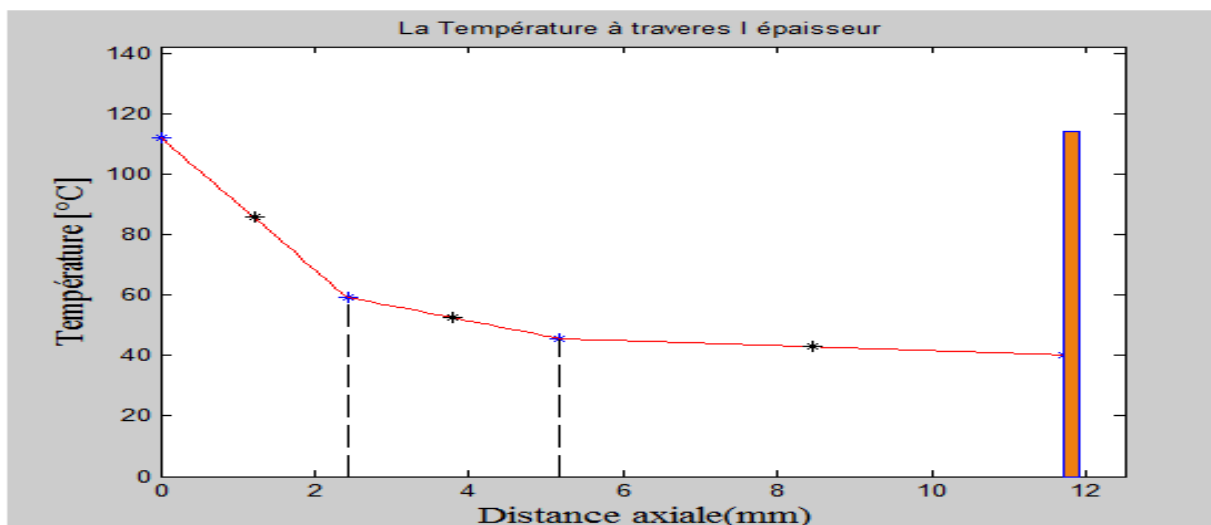


Figure 3.27: Courbe de la température (°C) en fonction de la distance axiale (mm)

Aussi dans ce cas la température n'est pas trop diminuée par rapport au cas précédent et elle est inférieure de seuil de brûleur (45°C) et la diminution de température était faible (la température de peau est diminuée avec 0.1°C) donc ce cas aussi il est mieux que Baseline 5.6 qui a de brûlure.

Cas secondaire 6.44 $T_{\infty} = 25^{\circ}\text{C}$

Tableau3.26 :La variation de température de la première couche de tissu vers la peau

	C1	C2	C3	peau	Organisme
Température (°C)	108.89	56.82	44.54	39.86	36.8

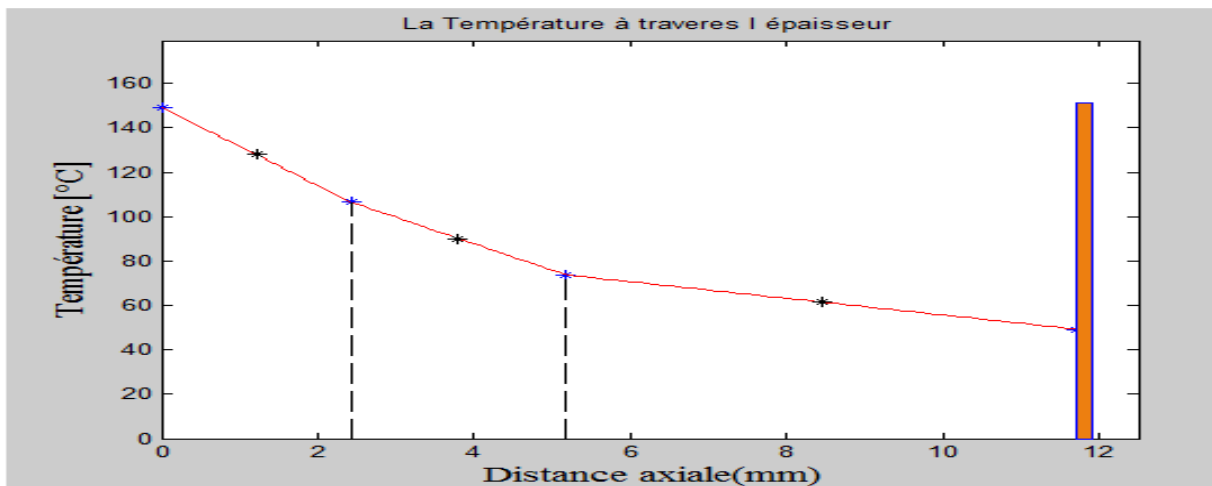


Figure 3.28: Courbe de la température (°C) en fonction de la distance axiale (mm)

Dans ce cas on trouve que la température de peau était diminuée plus que les autres cas, jusqu'à atteindre 39.8°C.

Donc de tous ces résultats on peut conclure que les meilleures conditions pour éviter les brûlures et pour avoir une température approximative de la température de peau qui est 37°C il faut annuler la convection dans les intercouches et prendre le rayonnement côté peau (Epsilon Peau) égale à 0.89 avec la présence de conduction dans les lames d'air et la non linéarité de lambda en fonction de température et donc le cas Baseline 6.44.

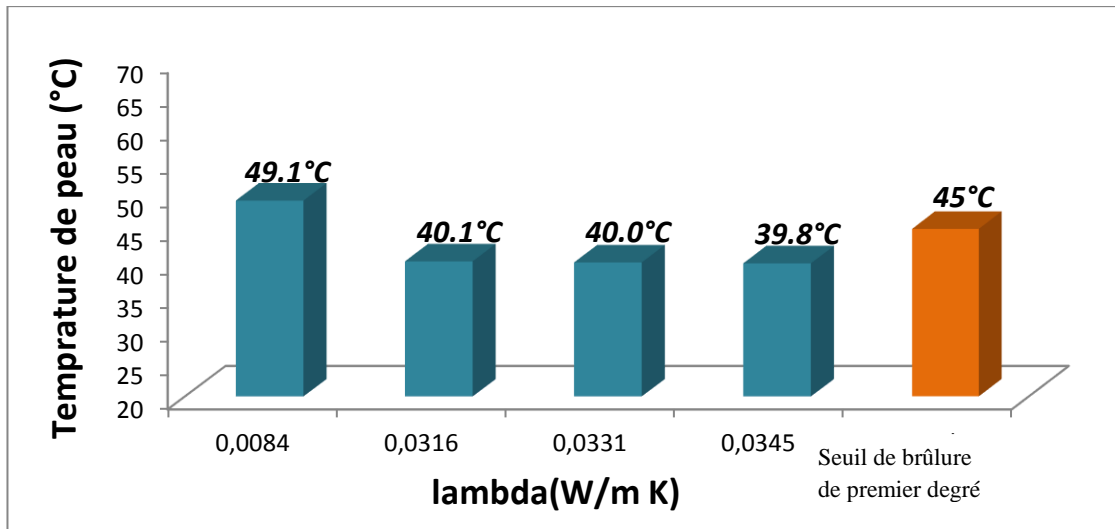


Figure 3.29 Histogrammes représentent la variation de la température de peau (°C) en fonction de lambda (W/m K) avec le seuil des brûlures de premier degré

Cas standard (Baseline 7)

Tair=298; Tinf=298; Ti=309.95 [K]

hair=8Watts/K. m²;

Intercouches: hair1=0; hair2=0; hair3=4Watts/K. m²; convection dans la couche air 3

Iconvpeau=1 hp=4 Watts/K. m²;

Iradpeau=1 (Epsilon peau = 0,98)

$$\begin{cases} \alpha_{C1} = 0,98 \\ \tau_{C1} = 0,02 \end{cases}$$

Dans ce cas nous avons annulé la convection dans les deux premier lames d'air, et nous avons laissé dans le dernier, et les autres conditions sont exactement les mêmes avec le **cas standard Baseline 6.4**.

Cas secondaire 7.1 $T_{\infty} = 25^{\circ}C$

Tableau3.27 :La variation de température de la première couche de tissu vers la peau

	C1	C2	C3	peau	Organisme
Température (°C)	146.79	98.84	62.02	51.73	36.8

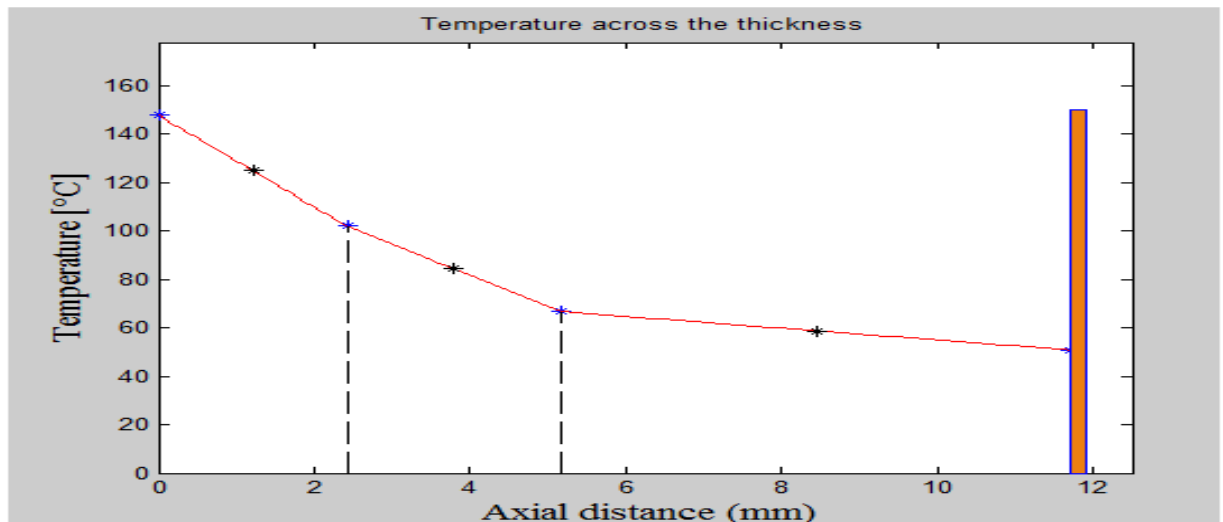


Figure 3.30: Courbe de la température (°C) en fonction de la distance axiale (mm)

Le premier cas dans les cas de Baseline 6.7 La température dans ce là était dépassé 45°C (le seuil de brulures). avec plus de 5°C donc dans ce cas il y'a de brulure.

Donc on peut dire que ces conditions elle nous arenge pas.

Cas secondaire 7.2 $T_{\infty} = 25^{\circ}C$

Tableau3.28 :La variation de température de la première couche de tissu vers la peau

	C1	C2	C3	peau	Organisme
Température (°C)	147.03	99.59	63.16	51.49	36.8

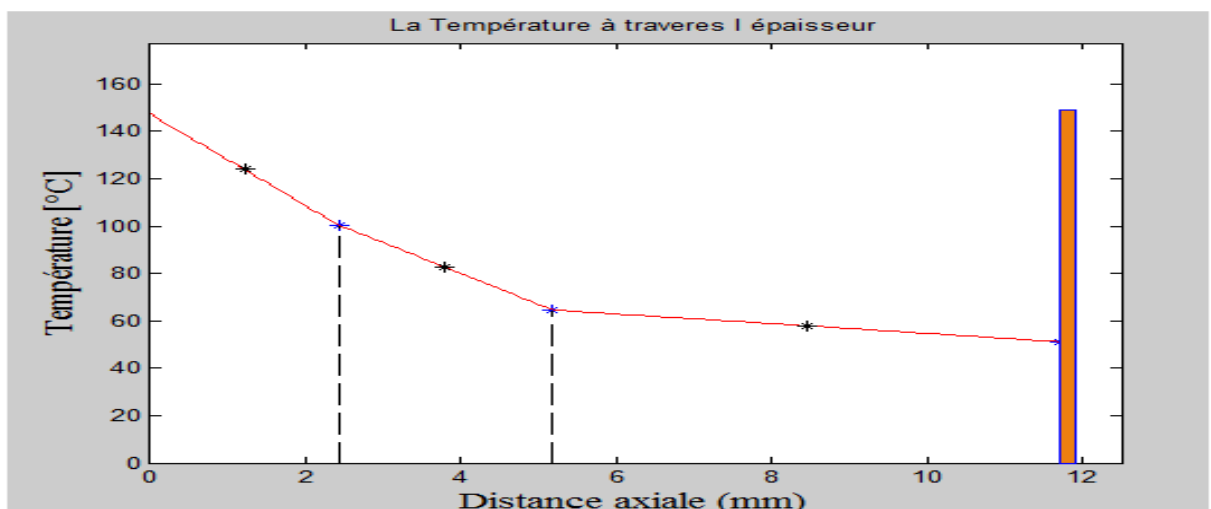


Figure 3.31: Courbe de la température (°C) en fonction de la distance axiale (mm)

Chapitre3 : Application à un spécimen de tenue à trois couches de tissus

Dans ce cas la le lambda il est dans 120°C la température elle était diminué avec 0.2°C dans la peau par rapport au cas précédent.

Nous avons toujours le dengé des brulures.

Cas secondaire 7.3 $T_{\infty} = 25^{\circ}\text{C}$

Tableau3.29 :La variation de température de la première couche de tissu vers la peau

	C1	C2	C3	peau	Organisme
Température (°C)	147.33	100.56	64.64	51.18	36.8

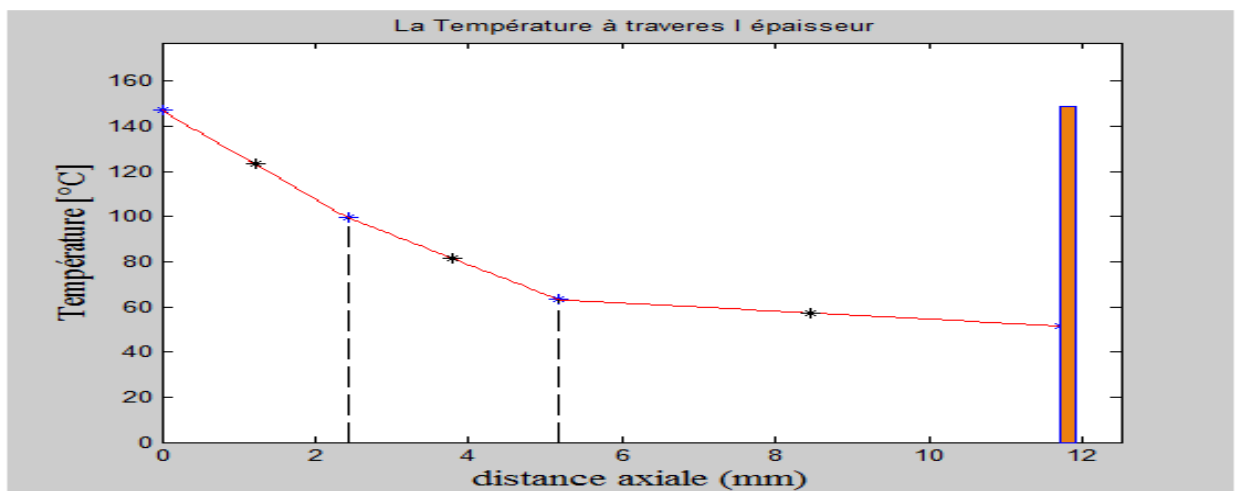


Figure 3.32: Courbe de la température (°C) en fonction de la distance axiale (mm)

Aussi la diminution de la température n'était pas très grande par rapport au cas précédent.

La température de peau est diminué avec 0.3°C au contraire la température de la première couche de tissu était augmenté dans ce cas avec 0.3°C par rapport au cas précédent.

Toujours il y'a des brulures.

Cas secondaire 7.4 $T_{\infty} = 25^{\circ}\text{C}$

Tableau3.30 : La variation de température de la première couche de tissu vers la peau

	C1	C2	C3	peau	Organisme
Température (°C)	115.65	47.24	57.72	47.47	36.8

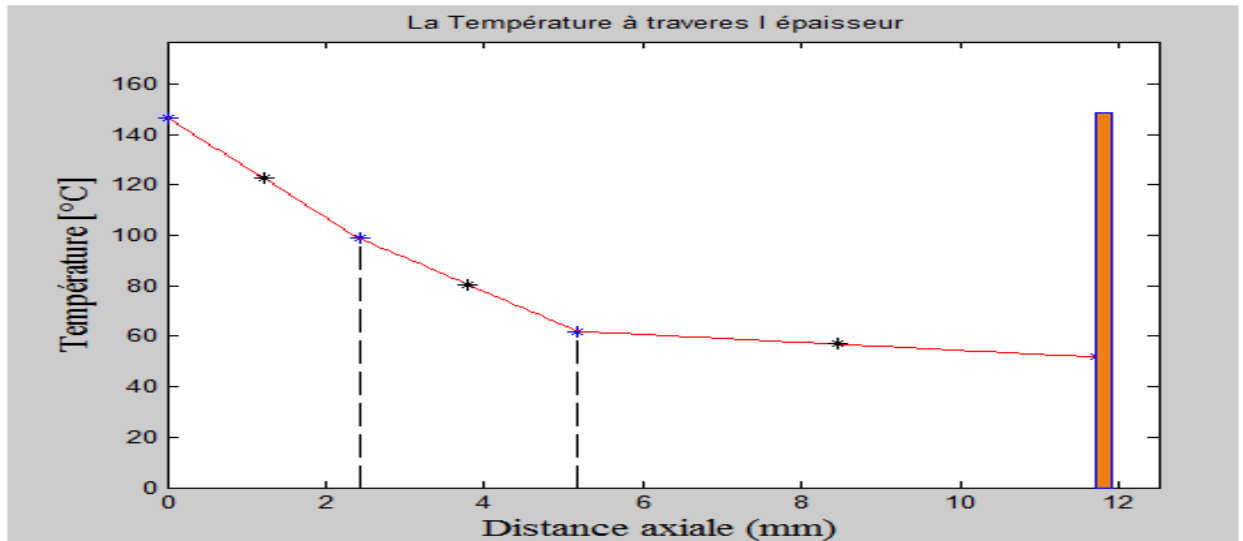


Figure 3.33: Courbe de la température (°C) en fonction de la distance axiale (mm)

Il y'a pas une grande différence entre ce cas et le cas, la température de peau est diminuée avec 0.3°C aussi la température de première couche était augmentée avec 0.3°C .

De là on peut dire que la température des deux couches était approximée dans tous les cas quel que soit la valeur de λ

Tout les cas standard **Baseline7** donnent des températures supérieures à 45°C donc on a de brûlure dans les quatre cas de cas **standard Baseline7**.

Donc on peut dire que ces conditions nous arrange pas.

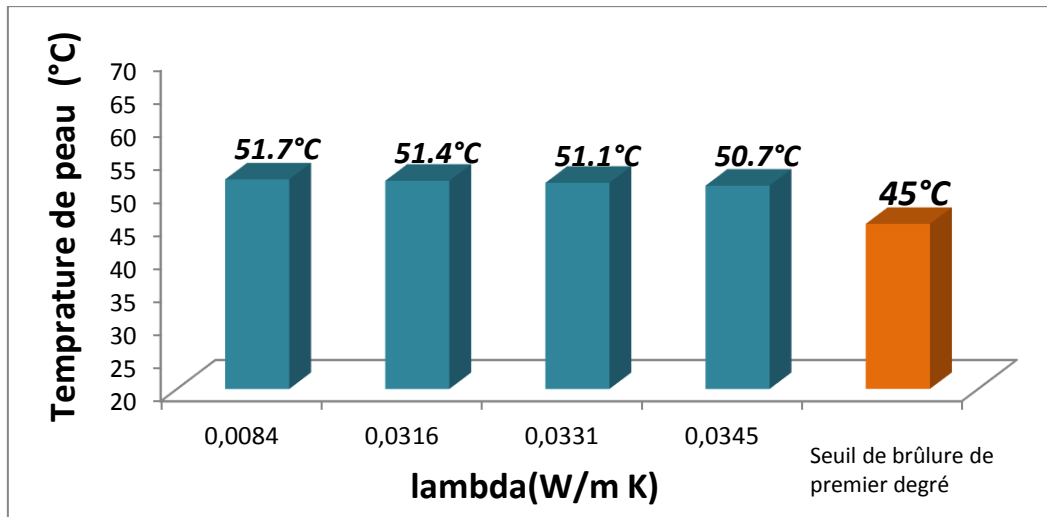


Figure 3.34: Histogramme représentant la variation de la température de peau (°C) en fonction de lambda (W/m K) avec le seuil des brûlures de premier degré.

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons pu évaluer la température en surface de la peau, en utilisant deux modèles. L'un sans la contribution de la conductivité des couches d'air dans le bilan thermique ; l'autre avec prise en compte de la conductivité des lames d'air.

Des analyses paramétriques relatives aux effets de la conduction, de la convection et du rayonnement ont été effectuées.

Il s'avère que les effets conductif dans les lames d'air ont une grande influence sur l'isolation thermique de la surface de la peau. En effet, pour le cas d'une conductivité thermique de 0,0345 Watts/K.m, la température en surface de peau est légèrement supérieure (39,8 °C) à la température de l'organisme, ce qui représente un bon confort thermique pour le sapeur-pompier.

1- Les programmes sources (.m)

➤ Programme de calcul sans conduction (prog_sans_conduc_sans_ref.m)

```
clc; clear all;
%T0=[TC1;TC2;TC3;Tpeau];
T0=[293;293;293;293]; Tair=298; Tinf=298; Ti=309.95; %[K]
Gf=2300; %[w/m2]
lambda=[0.081; 0.041; 0.038; 0.37]; % conductivité des différentes
couches
epv=[0.00042; 0.00075; 0.00155; 0.00008]; % épaisseurs des différentes
couches de la veste [m]
ep=[0.002; 0.002; 0.005]; % épaisseurs des différentes lames d'air [m]
hair1=4; hair2=4; hair3=4; hp=4; hair=8;
% hair1=(Nusselt*lambda(1))/epv(1); hair2=(Nusselt*lambda(2))/epv(2);
% hair3=(Nusselt*lambda(3))/epv(3);
alpha=[0.98; 0.50; 0.50; 1]; % absorptivité des différentes couches
Tau=[0.02; 0.50; 0.50; 0.0]; % Transmissivité des différentes
couches
emiss_C1C2=(1/emiss(1)+1/emiss(2)-1);
emiss_C2C3=(1/emiss(2)+1/emiss(3)-1);
emiss_C3P=(1/emiss(3)+1/emiss(4)-1);
sigma=5.67e-8;
Iconvair=1 ; Iradair=1 ; Iconvpeau=1 ; Iradpeau=1 ; %Options

% options = optimoptions('fsolve','Display','iter');
% Set option to display information after each iteration
options=optimset('Display','iter');

F=@(T0) [hair1*(T0(1)-T0(2))+sigma*(T0(1)^4-
T0(2)^4)/emiss_C1C2+Iconvair*hair*(T0(1)-
Tair)+Iradair*sigma*emiss(1)*(T0(1)^4-Tinf^4)-alpha(1)*Gf; %Equation FA
alpha(2)*Tau(1)*Gf+hair1*(T0(1)-T0(2))+sigma*(T0(1)^4-
T0(2)^4)/emiss_C1C2-hair2*(T0(2)-T0(3))-sigma*(T0(2)^4-T0(3)^4)/emiss_C2C3;
%Equation FB
alpha(3)*Tau(1)*Tau(2)*Gf+hair2*(T0(2)-T0(3))+sigma*(T0(2)^4-
T0(3)^4)/emiss_C2C3-hair3*(T0(3)-T0(4))-sigma*(T0(3)^4-T0(4)^4)/emiss_C3P;
%Equation FC
alpha(4)*Tau(1)*Tau(2)*Tau(3)*Gf+hair3*(T0(3)-T0(4))+sigma*(T0(3)^4-
T0(4)^4)/emiss_C3P-Iconvpeau*hp*(T0(4)-Ti)-Iradpeau*sigma*emiss(4)*(T0(4)^4-
Ti^4)]; %Equation FD

[T,fval]=fsolve(F,T0,options);
TC=T-273;
disp('*****fabrics layers temperatures in °c *****');
T0C=T0-273;
disp(['TC1= ',num2str(TC(1)),' , TC2= ',num2str(TC(2)),' , TC3=
',num2str(TC(3)),' , Tpeau= ',num2str(TC(4))]);
% TA=[TA1;TA2;TA3];
TA=[(T(1)+T(2))/2;(T(2)+T(3))/2;(T(3)+T(4))/2];
TAC=TA-273;
disp('*****air layers temperatures in °c*****');
disp(['TA1= ',num2str(TAC(1)),' ,TA2= ',num2str(TAC(2)),' ,TA3=
',num2str(TAC(3))]);
%deltaXair=[xair1;Xair2,Xair3];
deltaXair=[ep(1)/2;ep(2)/2;ep(3)/2];
% grad[grad_C1Air1;grad_C2Air2;grad_C3Air3];
```

```
grad=[((TAC(1)-TC(1))/deltaXair(1));((TAC(2)-TC(2))/deltaXair(2));((TAC(3)-TC(3))/deltaXair(3))];
disp('*****gradients of T in °C/m*****');
disp(['grad_C1Air1= ',num2str(grad(1)) , 'grad_c1Air2= ',num2str(grad(2)),
'gradC3Air3= ',num2str(grad(3))]);
figure
m=max(TC);
Tf = interp1(x,TC,xf);
plot(x,TC,'*b',xf,Tf,'-r');
rectangle('Position',[11.72,0,0.2,m+2],'FaceColor',[237/255 127/255
16/255],'EdgeColor','b','LineWidth',1);
xlim([0 12.5]); ylim([0 m+30]);
xlabel(' Axial distance (mm)','FontSize',14,'FontName','times');
ylabel('Temperature [°C]','FontSize',14,'FontName','times');
title(' Temperature across the thickness ');
hold on
xa=[ 1.2 3.78 8.44];
plot(xa,TAC,'*K')
hold on
x1=epv(1)+ep(1);
y=x1;
y=[0 TC(2)];x1=[x(2) x(2)];
plot(x1,y,'--K')
hold on
x2=epv(1)+ep(1)+epv(2)+ep(2);
y2=x2;
y2=[0 TC(3)];x2=[x(3) x(3)];
plot(x2,y2,'--K')
```

2- La fonction fsolve

La résolution des systèmes non linéaires, utilise souvent des méthodes de type Levenberg-Marquardt avec région de confiance, issue des algorithmes de moindres carrés non linéaires. Par défaut, fsolve utilise l'algorithme Dogleg-Powell, qui est une méthode itérative (basée une sur la donnée d'un solution initiale) [18].

C'est en fait, une méthode de type Newton, à gradient conjugué avec préconditionnement (PCG). Chaque itération implique le calcul numérique d'un Jacobien, qui doit être non nul.

Algorithmes de résolution d'équations

Étant donné un ensemble de n fonctions non linéaires $F_i(\mathbf{x})$, où n est le nombre de composantes du vecteur \mathbf{x} , l'objectif de la résolution d'équations est de trouver un vecteur \mathbf{x} qui donne toute la valeur $F_i(\mathbf{x}) = 0$.

Fsolve tente de résoudre des systèmes d'équations en minimisant la somme des carrés des composants. Si la somme des carrés est égale à zéro, le système d'équation est résolu. fsolve peut

fonctionner avec un des trois algorithmes, Région de confiance, Dogleg de région de confiance et Levenberg-Marquardt.

La méthode utilisée par défaut (sur Matlab) dans les solutions d'optimisation Toolbox TM est basée sur des régions de confiance, un concept simple mais puissant en optimisation.

Pour comprendre l'approche d'optimisation par région de confiance, considérons le problème de minimisation sans contrainte, minimisez $f(x)$, où la fonction prend des arguments de vecteur et renvoie des scalaires. Supposons que vous êtes à un point x dans le n -espace et que vous souhaitez vous améliorer, c'est-à-dire que vous vous déplacez vers un point avec une valeur de fonction plus basse. L'idée de base est d'approcher f avec une fonction plus simple q , qui reflète raisonnablement le comportement de la fonction dans un voisinage N autour du point x . Ce quartier est la région de confiance. Une étape d'essai s est calculée en minimisant (ou approximativement) au-dessus de N . Il s'agit du sous-problème de la région de confiance.

La méthode de Newton (gradient conjugué) peut rencontrer des difficultés. La matrice Jacobienne peut être singulière et l'étape de Newton dk n'est même pas définie. En outre, le nombre exact d'étapes à la convergence $stepdk$ peut être coûteux à calculer. De plus, la méthode de Newton peut ne pas converger si le point de départ est loin de la solution.

L'utilisation de techniques de région de confiance améliore la robustesse lorsque vous démarrez loin de la solution et gère le cas où $J(\mathbf{x}_k)$ est singulier.

Plus de détails sur l'utilisation des différents algorithmes, peuvent être trouvées sur la section Help du **Matlab**[®].