



**Faculté des Sciences Appliquées**  
**Département de Génie Mécanique**

## **PROJET DE FIN D'ETUDE**

Présenté pour l'obtention du Diplôme de Master **Spécialité** : Génie mécanique  
**Option** : Énergétique

### **THEME**

Simulation numérique pour la prédiction de l'ambiance  
thermique des tenues de protection pour sapeurs-pompiers

Par :

**NAMOUN Abdellah**

**MAHMOUDI Omar**

Soutenu le 28 /06 /2025 devant le jury composé

Dr. DAHMANE M

Dr. BENSALAM C

Dr. BAGHDADI F

Université de Bouira

Université de Bouira

Université de Bouira

Président

Promoteur

Examineur




## REMERCIEMENT

*Avant tout, nous remercions ALLAH le tout puissant qui nous a donné le courage, la volonté et la patience pour faire ce travail.*

*Nous tenons à remercier tous les membres de nos familles pour leur soutien moral et leurs encouragements durant toutes nos années d'études et pour tous leurs sacrifices, ... les mots s'épuisent sans doute, mais vous comprendrez que tout un univers de paroles ne pourrait suffire pour vous dire merci.*

*Nous remercions vivement notre promoteur monsieur Chafik BENSALEM, de nous avoir confié ce sujet, et de l'aide précieuse qu'il nous a toujours apporté. Qu'il trouve ici l'expression de notre sincère reconnaissance.*






## DEDICACE

*Ce modeste mémoire est dédié à :*

*Tous les membres de nos précieuses familles.*

*Tous nos professeurs pour leur soutien continu et leurs conseils  
tout au long de nos études.*

*À tous ceux qui nous ont aidés, nous sommes extrêmement  
reconnaisants.*



## RESUME

Cette étude s'intéresse à la protection thermique des sapeurs-pompiers face aux environnements extrêmes auxquels ils sont exposés lors des interventions. Il vise à analyser et simuler les transferts thermiques (conduction, convection, rayonnement) à travers les tenues de protection multicouches et la peau humaine. Un modèle numérique en 1D est développé sous COMSOL Multiphysics pour évaluer la distribution de la température et les risques de brûlures selon différents scénarios. L'étude combine une revue bibliographique, une modélisation thermique, et des simulations numériques afin de proposer des pistes d'optimisation pour la conception des équipements de protection. Les résultats permettent d'identifier l'effet de certains paramètres comme la porosité ou l'humidité sur la température de la peau et la performance thermique des tenues.

## ABSTRACT

This study focuses on the thermal protection of firefighters in the extreme environments to which they are exposed during interventions. It aims to analyze and simulate heat transfer (conduction, convection, radiation) through multi-layer protective clothing and human skin. A 1D numerical model is developed under COMSOL Multiphysics to evaluate the temperature distribution and the risks of burns under different scenarios. The study combines a literature review, thermal modeling, and numerical simulations to propose optimization avenues for the design of protective equipment. The results make it possible to identify the effect of certain parameters such as porosity or humidity on skin temperature and the thermal performance of the clothing.



## SOMMAIR

<i>List des figures .....</i>	<i>1</i>
<i>List de tableaux .....</i>	<i>1</i>
<i>List des symboles .....</i>	<i>1</i>
<b>INTRODUCTION GENERALE .....</b>	<b>1</b>
<b>I. CHAPITRE 1 : ÉTUDE TECHNOLOGIQUE DES FEUX ET INCENDIES.....</b>	<b>4</b>
<b>1. Introduction .....</b>	<b>4</b>
<b>2. Généralités sur les feux et incendies .....</b>	<b>4</b>
2.2 Evolution d'un incendie .....	4
2.3 Types de feux et classes d'incendies .....	7
2.4 Propagation de l'incendie .....	8
<b>3. Composition de la peau d'organisme.....</b>	<b>9</b>
3.1 Définition de la peau .....	9
3.2 Structure de la peau .....	9
<b>4. Effet Thermique du Feu sur l'Environnement et les Personnes.....</b>	<b>11</b>
4.1 Effets sur les Êtres Humains.....	11
4.2 Impact sur les bâtiments .....	12
<b>5. Les brûlures .....</b>	<b>12</b>
<b>6. Moyens de détection et d'intervention incendie.....</b>	<b>16</b>
6.1 Détection d'incendie.....	16
6.2 Prévention active .....	18
<b>7. Intervention des sapeurs-pompiers contre les incendies.....</b>	<b>26</b>
7.1 Définition de métier de sapeurs-pompier : .....	26
7.2 Définition de la protection civile.....	26
7.3 Définition de sapeurs-pompiers.....	26
7.4 Rôle des sapeurs-pompiers .....	27
7.5 Dispositifs pour faciliter l'action des sapeurs pompiers.....	27
7.6 Moyens pour faciliter l'intervention des sapeurs pompiers .....	28
7.7 Résistance à la température .....	28

<b>8. Equipement de protection des sapeurs-pompiers (dans le monde et en algérie).....</b>	<b>29</b>
8.1 Équipements de protection des sapeurs-pompiers dans le monde.....	29
8.2 Équipements de protection des sapeurs-pompiers en Algérie.....	32
<b>9. Conclusion.....</b>	<b>35</b>
<b><i>II. CHAPITRE 2 : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE.....</i></b>	<b><i>38</i></b>
<b>1. INTRODUCTION .....</b>	<b>38</b>
<b>2. ÉTUDES RÉCENTES DANS CE DOMAINE .....</b>	<b>38</b>
<b>3. LES EXPEIENCES .....</b>	<b>61</b>
<b>4. CONCLUSION.....</b>	<b>66</b>
<b><i>III. CHAPITRE 3 : EQUATIONS DES BILANS THERMIQUES ET LOGICIEL DE CALCUL.....</i></b>	<b><i>68</i></b>
<b>1. INTRODUCTION .....</b>	<b>68</b>
<b>2. EQUATIONS DES BILANS THERMIQUES.....</b>	<b>69</b>
2.1 La conduction .....	69
2.2 La convection .....	70
2.3 Le rayonnement.....	73
<b>3. SCHEMAS DES ÉTUDES DE CAS .....</b>	<b>75</b>
<b>4. BILANS THERMIQUES DANS CHAQUE COUCHE (VÊTEMENT / PEAU) .....</b>	<b>77</b>
4.1 Bilan thermique en régime instationnaire.....	77
4.2 Bilans sur la couche de vêtement .....	77
4.3 Bilans sur la couche de peau .....	81
<b>5. PRESENTATION DU LOGICIEL COMSOL MULTIPHYSICS.....</b>	<b>83</b>
5.1 Définition.....	83
5.2 Principe d'utilisation .....	85
5.3 Applications de COMSOL .....	85
5.4 Méthodologie de conception avec COMSOL-Multiphysics .....	86
5.5 Interface utilisateur de Comsol-Multiphysics .....	87
<b>6. Schémas des études de cas dans le logiciel.....</b>	<b>88</b>
<b>7. Conditions aux limites.....</b>	<b>89</b>
<b>8. conclusion .....</b>	<b>90</b>

<b>IV. CHAPITRE 4 : RÉSULTATS ET DISCUSSION .....</b>	<b>92</b>
<b>1. Introduction .....</b>	<b>92</b>
<b>2. Test de maillage .....</b>	<b>93</b>
<b>3. Comparaison de maillage.....</b>	<b>95</b>
<b>4. Résultats du cas 01 ( cas de base ) .....</b>	<b>96</b>
4.1 Etude temporel.....	97
Comparaison avec les résultats de référence .....	98
4.2 Etude stationnaire .....	99
Comparaison avec les résultats de référence .....	100
4.3 Impact du flux de flamme sur la température de la peau .....	101
<b>5. Résultats du cas 02.....</b>	<b>102</b>
5.1 Etude temporel.....	102
Comparaison avec le cas de base.....	103
5.2 Etude stationnaire .....	104
Comparaison avec le cas de base.....	105
5.3 Impact du la porosité sur la Température de la Peau.....	106
<b>6. Résultats du cas 03.....</b>	<b>107</b>
6.1 Etude temporel.....	107
Comparaison avec le cas de base.....	108
6.2 Etude stationnaire .....	109
Comparaison avec le cas de base.....	110
6.3 Impact du l'humidité relative sur la température de la peau .....	111
<b>7. Analyse et comparaison des résultats des trois cas étudiés.....</b>	<b>111</b>
7.1 Etude temporel.....	112
7.2 Etude stationnaire .....	113
<b>8. Conclusion .....</b>	<b>114</b>
<b>CONCLUSION GENERALE .....</b>	<b>116</b>
<b>LES REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUE .....</b>	<b>119</b>

## List des figures

FIGURE I-1 : PRINCIPALES CAUSES D'INCENDIE EN 2006 (HORS HABITATION) .....	6
FIGURE I-2 : LE TRIANGLE DU FEU .....	6
FIGURE I-3 : LES DIFFERENTES CLASSES DE FEU.....	8
FIGURE I-4 : MODES DE PROPAGATION D'UN INCENDIE .....	8
FIGURE I-5 : SCHEMA DE LA STRUCTURE DE LA PEAU. ....	10
FIGURE I-6 : EXEMPLES DE CONSEQUENCES DE LA DESTRUCTION DES BÂTIMENTS ET DES BIENS EFFET .....	12
FIGURE I-7 : BRÛLURE DE 1 <sup>ER</sup> DEGRE .....	14
FIGURE I-8 : BRÛLURES DU DEUXIEME DEGRE : SUPERFICIELLES SUR LE BRAS; ET PROFONDES SUR L'AVANT-BRAS ET SUR L'IMAGE DE DROITE .....	14
FIGURE I-9 : BRÛLURE DU TROISIEME DEGRE AVEC ZONES DE BOURGEONNEMENT .....	15
FIGURE I-10 : SCHEMA DE CATEGORISATION DES BRULURES .....	15
FIGURE I-11 : EXEMPLE D'UN DECLENCHEUR MANUEL .....	17
FIGURE I-12 : UTILISATION ET COMPORTEMENT DES DETECTEURS EN FONCTION DE L'EVOLUTION DU FEU .....	18
FIGURE I-13 : EXTINCTEUR A EAU (6 L) .....	21
FIGURE I-14 : EXTINCTEUR A POUDRE .....	21
FIGURE I-15 : EXTINCTEUR DOUCHE PORTATIVE .....	22
FIGURE I-16 : EXTINCTEUR AU CO2 .....	22
FIGURE I-17 : ROBINET D'INCENDIE ARME (R.I.A.) .....	23
FIGURE I-18 : POTEAU D'INCENDIE .....	24
FIGURE I-20 : SPRINKLER A AMPOULE .....	25
FIGURE I-19 : IMAGE D'UN SPRINKLEUR .....	25
FIGURE I-21 : L'EAU EN JET PLEIN .....	26
FIGURE I-22 : EQUIPEMENT « E1 » DIT DE L'ANCIENNE GENERATION .....	29
FIGURE I-23 : EQUIPEMENT « E2CO » DIT DE NOUVELLE GENERATION .....	30
FIGURE I-24 : REPRESENTATION SCHEMATIQUE DES DIFFERENTES COUCHES DU VÊTEMENT DE PROTECTION D'UN SAPEUR-POMPIER. ....	30
FIGURE I-25 : TENUE D'INTERVENTION INCENDIE.....	33
FIGURE I-26 : TENUE D'APPROCHE DU FEU.....	35
FIGURE II-1: MECANISMES SPECIFIQUES AUX BRULURES. DONNEES DESCRIPTIVES DE COMPTAGE DES VARIABLES BINAIRES RELATIVES AUX MECANISMES DES BRULURES. DONNEES = COMPTAGES ET %. ....	42
FIGURE II-2 : LA PROPORTION DES DIFFERENTES CAUSES DE BRULURES .....	43

FIGURE II-3 : EVOLUTION STATIONNAIRE DE LA TEMPERATURE A TRAVERS L'ASSEMBLAGE TISSUS-PEAU. ....	45
FIGURE II-4 : EVOLUTION DE LA TEMPERATURE AU COURS DE TEMPS SUR (A) LES TISSUS MULTICOUCHES (B) LES COUCHES DE PEAU .....	45
FIGURE II-5 : EVOLUTION DE LA TEMPERATURE AU COURS DU TEMPS SUR LES TISSUS MULTICOUCHES ET LA COUCHE DE PEAU .....	46
FIGURE II-6 : EFFET DE LA TEMPERATURE METABOLIQUE BASALE SUR LA TEMPERATURE DES COUCHES CUTANÉES. ....	46
FIGURE II-7 : EFFET DU FLUX D'EVAPORATION SUR LA TEMPERATURE DES COUCHES CUTANÉES. ....	46
FIGURE II-8 : SCHEMA DE PRINCIPE CAS 3 .....	47
FIGURE II-9 : CHAMPS DE TEMPERATURE OBTENUS EN REGIME PERMANENT .....	48
FIGURE II-10 : ÉVOLUTION DE $T_{E/D}$ POUR $2,3 \text{ KW.M}^{-2}$ .....	48
FIGURE II-11 : PROFIL DE TEMPERATURE A TRAVERS L'ÉPAISSEUR DE VÊTEMENT .....	50
FIGURE II-12 : POLYNÔMES PAR MORCEAUX POUR LA TEMPERATURE SUR L'ÉPAISSEUR DU VÊTEMENT .....	50
FIGURE II-13 : DISTRIBUTION STATIONNAIRE DE LA TEMPERATURE .....	51
FIGURE II-14 : ÉVOLUTION DE LA TEMPERATURE A L'INTERFACE EPIDERME-DERME .....	51
FIGURE II-15 : HISTOGRAMME DU NIVEAU DE TEMPERATURE ( $T_{E/D}$ , $TC1$ ) POUR PLUSIEURS CONDITIONS AMBIANTES .....	51
FIGURE II-16 : MODELE BIDIMENSIONNEL DE VETEMENT-PEAU (A GAUCHE) ET MAILLAGE PAR ELEMENTS FINIS (A DROITE).....	52
FIGURE II-17 : COMPARAISON DES PERFORMANCES ENTRE KEVLAR/PBI ET NOMEX 10S D'EXPOSITION A LA CHALEUR RADIANTE DE $80 \text{ KW/M}^2$ . ).....	53
FIGURE II-18 : PREDICTIONS DE BRÛLURES CUTANÉES ( $T_3$ ) POUR LA PROTECTION KEVLAR/PBI ET NOMEX. ....	53
FIGURE II-19 : VALEURS $TP_{\text{PRODUCT}}$ POUR LES ENSEMBLES DE VÊTEMENTS DE PROTECTION DES POMPIERS. ....	55
FIGURE II-20 : VALEURS $TP_{\text{SUM}}$ POUR LES ENSEMBLES DE VÊTEMENTS DE PROTECTION DES POMPIERS A DIFFÉRENTES VALEURS DE PONDERATION. ....	55
FIGURE II-21 : RELATION ENTRE $TP_{\text{PRODUIT}}$ ET $TP_{\text{SUM}}$ ( $A=0,07$ ET $B=0,93$ ) POUR CINQ ENSEMBLES DE VÊTEMENTS DE PROTECTION POUR POMPIERS. ....	55
FIGURE II-22 : ÉCHANTILLONS DE LA VESTE BLEUE 1 .....	58
FIGURE II-23 : COMPARAISON DE DIFFÉRENTES VESTES .....	58
FIGURE II-24 : ÉVOLUTION DE LA CONDUCTIVITE THERMIQUE DE LA VESTE BLEUE 1 .....	58
FIGURE II-25 : CONTOUR SPATIAL DE LA TEMPERATURE. ....	60
FIGURE II-26 : PROFIL DE TEMPERATURE A TRAVERS L'ÉPAISSEUR DE LA TENUE. ....	60
FIGURE II-27 : PROFILS DE TEMPERATURE POUR DIFFÉRENTS PARAMETRES RADIATIFS ( $C1$ ). ....	60

FIGURE II-28 : TEMPERATURE EN PREMIERE COUCHE DE PEAU POUR DIVERSES VALEURS DE H (C1-AIR). .....	60
FIGURE II-29 : TEMPERATURE DE LA PEAU POUR DIVERSES VALEURS DE $H_{PEAU}$ .....	60
FIGURE II-30 : TEMPERATURE DE PEAU POUR DIVERSES VALEURS DE $A_{PEAU}$ .....	60
FIGURE II-31 : LE MODELE PROPOSE POUR LA TENUE BICOUCHES. ....	61
FIGURE II-32 : EVOLUTION DE LA TEMPERATURE DANS LE MODELE DE TENUE BICOUCHES. ....	61
FIGURE II-33 : TEMPERATURE DE PEAU POUR DIVERSES VALEURS DE L'ABSORPTIVITE (MODELE BICOUCHES). ....	61
FIGURE II-34 : MONTAGE EXPERIMENTAL UTILISE POUR TESTER LES PERFORMANCES DE PROTECTION RADIANTE DU TISSU (STANDARD EN ISO 6942). ....	62
FIGURE II-35 : HENRY, MANNEQUIN AVEC CAPTEURS DE TEMPERATURE ET DE FLUX THERMIQUE DANS LA CHAMBRE DE COMBUSTION .....	62
FIGURE II-36 : SAM, MANNEQUIN ARTICULE THERMIQUE .....	64
FIGURE II-37 : MANNEQUIN SAM, REVÊTU D'UNE COUCHE HYDROPHILE .....	64
FIGURE II-38 : TENUE DE BASE (A GAUCHE), EQUIPEMENT E1 (AU CENTRE), EQUIPEMENT E2CO SUR MANNEQUIN (A DROITE) .....	64
FIGURE II-39 : CENTRALE D'ENREGISTREMENT ET MANNEQUIN INSTRUMENTE .....	65
FIGURE II-40 : TEMPERATURES MESUREES AVEC LA CAMERA THERMOGRAPHIQUE .....	65
FIGURE III-1 : LES TROIS MODES DE TRANSFERT DE CHALEUR .....	69
FIGURE III-2 : TRANSFERT DE CHALEUR PAR CONDUCTION .....	69
FIGURE III-3 : TRANSFERT THERMIQUE PAR CONVECTION D'UNE PLAQUE PLANE. ....	70
FIGURE III-4 : CONVECTION NATURELLE D'UNE PLAQUE CHAUDE .....	71
FIGURE III-5 : CONVECTION FORCEE D'UNE PLAQUE CHAUDE .....	71
FIGURE III-6 : TRANSFER DE CHALEUR PAR RAYONNEMENT SOLAIRE SUR UN MUR .....	74
FIGURE III-7 : SCHEMA DE PRINCIPE (CONFIGURATION GENERIQUE) – CAS 1 .....	75
FIGURE III-8 : CONFIGURATION AVANCEE – CAS 2 .....	75
FIGURE III-9 : CONFIGURATION AVANCEE – CAS 3 .....	76
FIGURE III-10 : COMSOL MULTIPHYSICS 6.2 .....	84
FIGURE III-11 : DIAGRAMME DES ETAPES DE CONCEPTION AVEC COMSOL. ....	87
FIGURE III-12 : L'INTERFACE DU LOGICIEL DE SIMULATION DE COMSOL-MULTIPHYSICS. ....	87
FIGURE III-13 : SCHEMAS DES ETUDES DE CAS DANS LE LOGICIEL .....	89
FIGURE IV-1 : LE TYPE DE MAILLAGE FIN .....	93
FIGURE IV-2 : LE TYPE DE MAILLAGE EXTRA GROSSIER .....	94
FIGURE IV-3 : LE TYPE DE MAILLAGE EXTRA FIN .....	94
FIGURE IV-4 : LA COMPARAISON DE LES TROIS MAILLAGE AVEC LES ETUDES DE REFERENCE .....	95
FIGURE IV-5 : PROFIL DE TEMPERATURE EN SURFACE .....	96
FIGURE IV-6 : ÉVOLUTION DE LA TEMPERATURE PAR RAPPORT LE TEMPS POUR LE CAS 1 .....	97

FIGURE IV-7 : ÉVOLUTION DE LA TEMPERATURE EN FONCTION DU TEMPS .....	98
FIGURE IV-8 : ÉVOLUTION DE LA TEMPERATURE PAR RAPPORT LA LONGUEUR POUR LA PREMIERE CAS .....	99
FIGURE IV-9 : COMPARAISON DES RESULTAT D'ETUDE STATIONNAIRE.....	100
FIGURE IV-10 : TEMPERATURE DE LA PEAU EN FONCTION DU FLUX DE FLAMME.....	101
FIGURE IV-11 : ÉVOLUTION DE LA TEMPERATURE PAR RAPPORT LE TEMPS POUR LE CAS 2.....	102
FIGURE IV-12 : ÉVOLUTION THERMIQUE COMPAREE AVEC ET SANS MILIEU POREUX (ETUDE TEMPOREL).....	103
FIGURE IV-13 : ÉVOLUTION DE LA TEMPERATURE PAR RAPPORT LA LONGUEUR POUR LE DEUXIEME CAS.....	104
FIGURE IV-14 : ÉVOLUTION THERMIQUE COMPAREE AVEC ET SANS MILIEU POREUX ( ETUDE STATIONNAIRE) .....	105
FIGURE IV-15 : HISTOGRAMME DE LA TEMPÉRATURE EN FONCTION DE LA POROSITÉ À T = 30 MIN .....	106
FIGURE IV-16 : ÉVOLUTION DE LA TEMPERATURE PAR RAPPORT LE TEMPS POUR LE CAS 3.....	107
FIGURE IV-17 : ÉVOLUTION THERMIQUE COMPAREE AVEC ET SANS FLUX D'EVAPORATION (ETUDE TEMPOREL).....	108
FIGURE IV-18 : ÉVOLUTION DE LA TEMPERATURE PAR RAPPORT LA LONGUEUR POUR LE TROISIEME CAS .....	109
FIGURE IV-19 : ÉVOLUTION THERMIQUE COMPAREE AVEC ET SANS FLUX D'EVAPORATION (ETUDE STATIONNAIRE) .....	110
FIGURE IV-20 : HISTOGRAMME DE LA TEMPERATURE EN FONCTION DE L'HUMIDITE RELATIVE A T = 30 MIN.....	111
FIGURE IV-21 : ÉVOLUTION DE LA TEMPERATURE EN FONCTION DU TEMPS POUR LES TROIS CAS	112
FIGURE IV-22 : ÉVOLUTION DE LA TEMPERATURE EN FONCTION DU LA LONGUEUR POUR LES TROIS CAS .....	113

## List de tableaux

TABLE I-1 : EFFETS DE LA TEMPÉRATURE SUR LES PERSONNES .	12
TABLE I-2 : EVOLUTION DES BRÛLURES DE LA PEAU	13
TABLE I-3 : LES CARACTÉRISTIQUES PRINCIPALES DES EXTINCTEURS	21
TABLE I-4 : CONDITIONS DE TRAVAIL DES POMPIERS	28
TABLE I-5 : BILAN MASSIQUE DE CHAQUE ÉQUIPEMENT	31
TABLE II-1: CARACTERISTIQUES SPECIFIQUES DES BLESSURES BASEES SUR LES CAUSES POTENTIELLES DES BRULURES	42
TABLE II-2: DUREES MAXIMALES D'EXPOSITION [S] AVANT BRULURE SOUS UN FLUX DE $2,3 \text{ kW.m}^{-2}$ .	48
TABLE II-3: DUREES MAXIMALES D'EXPOSITION [S] AVANT OBTENTION D'UNE BRULURE DU SECOND.....	49
TABLE II-4: NOUVEAUX COEFFICIENTS PROPOSES POUR LA PREDICTION DES BRULURES CUTANEEES. ).....	53
TABLE II-5 : CLASSIFICATION DES NIVEAUX D'EXPOSITION THERMIQUE	57
TABLE II-6: MESURE CALORIMETRIQUE ET COMPARAISON AVEC LA METHODE DU TRI-COUCHE	59
TABLE II-7: TESTS DES SPECIMENS ET PRINCIPAUX RESULTATS (IPB-PORTUGAL)	63
TABLE III-1 : LES CONDITIONS AUX LIMITES.	89



## List des symboles

### Symboles

$\Phi$	Flux thermique [W]
$Q$	Énergie [J]
$\lambda$	Conductivité thermique [ $\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ ]
$S$	Surface perpendiculaire au flux thermique [ $\text{m}^2$ ]
$T$	Température [K]
$\rho$	Masse volumique [ $\text{kg.m}^{-3}$ ]
$C_p$	Chaleur spécifique [ $\text{J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$ ]
$\delta$	Épaisseur [m] ou [mm]
$\alpha$	Coefficient d'absorption
$\varepsilon$	Émissivité
$G_f$	Flux de flamme [W]
$G_m$	Flux métabolique [W]
$G_{evp}$	Flux d'évaporation [W]
$T_{amb}$	température ambiant [K]
$T_m$	Température moyenne [K]
$THL$	Perte totale de chaleur [ $\text{W.m}^{-2}$ ]
$d$	Épaisseur du matériau [m]
$w$	Poids surfacique [ $\text{kg.m}^{-2}$ ] ou [ $\text{g.m}^{-2}$ ]
EPI	Équipement de Protection Individuelle
RIA	Robinet d'Incendie Armé

**Indices dans les équations et couches**

C1	Couche 1 (tissu externe)
C2	Couche 2 (tissu intermédiaire)
C3	Couche 3 (doublure interne)
S1	Epiderme
S2	Derme
S3	Hypoderme

# INTRODUCTION GENERALE

## **INTRODUCTION GENERALE**

La sécurité des sapeurs-pompiers constitue une préoccupation essentielle, en particulier face aux risques thermiques extrêmes auxquels ils sont exposés lors de leurs interventions. Les tenues de protection jouent un rôle crucial dans la préservation de leur intégrité physique. Cependant, les mécanismes complexes de transfert de chaleur comprenant la conduction, la convection et le rayonnement à travers les matériaux multicouches de ces tenues, ainsi que l'interaction avec un environnement hostile et le corps humain, rendent difficile l'évaluation précise de leur efficacité thermique et la prédiction des brûlures. Une compréhension approfondie de ces phénomènes est donc indispensable afin de concevoir des équipements plus performants et de garantir une protection optimale. La problématique centrale de cette étude repose ainsi sur la nécessité de développer des outils et des méthodes permettant de simuler et de prédire avec précision le comportement thermique des tenues de protection des sapeurs-pompiers, en vue d'en améliorer la conception et de réduire les risques de brûlures.

Dans ce contexte, plusieurs objectifs sont fixés. Il s'agit d'abord de comprendre en détail les mécanismes de transfert de chaleur, à travers une analyse approfondie des phénomènes de conduction, de convection et de rayonnement qui interviennent dans les échanges thermiques au sein des tenues de protection et entre celles-ci et leur environnement. Ensuite, il est prévu de développer un modèle numérique sous COMSOL Multiphysics, permettant la simulation du comportement thermique des matériaux multicouches et de la peau humaine dans des conditions extrêmes. Ce modèle, qu'il soit en 1D ou plus complexe selon les besoins, devra être capable de prédire la distribution de la température à travers les différentes couches et ainsi évaluer les risques de brûlures. Un autre objectif important est d'évaluer l'efficacité thermique des tenues de protection existantes, en quantifiant leurs performances et en étudiant l'impact de divers paramètres tels que les matériaux utilisés, leur épaisseur, ou encore les conditions aux limites. Enfin, l'étude vise à contribuer à l'amélioration de la sécurité des sapeurs-pompiers, en fournissant des données et des analyses utiles à l'optimisation de la conception des équipements de protection.

Pour atteindre ces objectifs, plusieurs démarches seront entreprises. Une analyse bibliographique exhaustive permettra dans un premier temps de faire le point sur l'état de l'art concernant les

transferts thermiques dans les matériaux textiles, la biothermie, les brûlures, ainsi que les méthodes de simulation numérique appliquées aux vêtements de protection. Ensuite, une modélisation physique et mathématique sera élaborée pour décrire les transferts de chaleur par conduction, convection et rayonnement à travers les couches de la tenue et de la peau. Ces équations seront adaptées à un modèle unidimensionnel, ou multidimensionnel si cela s'avère nécessaire. Ce modèle sera ensuite implémenté dans le logiciel COMSOL Multiphysics, en définissant la géométrie, les propriétés thermophysiques des matériaux, les modules physiques adaptés, et les conditions aux limites. Des simulations numériques seront alors réalisées pour différents scénarios thermiques, en variant les paramètres tels que l'intensité du flux de chaleur, la durée d'exposition ou les caractéristiques des matériaux. Les résultats obtenus seront analysés (profils de température, flux thermique, temps avant apparition de brûlures) puis comparés aux données expérimentales issues de la littérature ou de modèles similaires, afin de valider la précision du modèle. Enfin, une discussion critique des résultats permettra de tirer des conclusions sur l'efficacité des tenues et d'identifier des pistes d'amélioration.

# CHAPITRE I

# **I. CHAPITRE 1 : ÉTUDE TECHNOLOGIQUE DES FEUX ET INCENDIES**

## **1. Introduction**

Les incendies sont des événements destructeurs pouvant causer d'importants dégâts matériels, des pertes humaines et des catastrophes environnementales. Ils sont le résultat d'une réaction chimique de combustion qui se propage rapidement lorsqu'elle n'est pas maîtrisée. Face à ces risques, il est essentiel de comprendre les mécanismes des feux, leurs impacts sur l'environnement et les êtres vivants, ainsi que les moyens de protection et d'intervention.

Ce chapitre se concentre sur les aspects technologiques liés aux incendies, incluant les principes fondamentaux du feu, les effets thermiques sur l'environnement et les personnes, les types de brûlures, ainsi que les équipements de protection utilisés par les sapeurs-pompiers en Algérie et dans le monde.

## **2. Généralités sur les feux et incendies**

### **2.1 Définition**

**Le feu :** Le feu est une réaction visible résultant de la combustion, un processus où un corps combustible réagit avec un comburant sous l'effet d'une énergie d'activation. [1]

**L'incendies :** L'incendie est une combustion non maîtrisée qui dégage de la chaleur, des fumées et des gaz toxiques, résultant de la rencontre d'un combustible, d'un comburant et d'une source d'énergie. [2]

### **2.2 Evolution d'un incendie**

#### **2.2.1 Les causes d'incendie**

Les causes d'inflammation sont variées et peuvent être classées en plusieurs catégories : [3]

- Thermiques : surfaces chaudes, appareils de chauffage, flammes nues, travaux par points Chauds...etc.

Les travaux par points chauds (soudage au chalumeau, oxycoupage...) sont des sources majeures de sinistres : ils sont responsables d'environ un incendie sur trois;

- Electriques : étincelles, échauffement ....

La vétusté, le caractère improvisé ou la surcharge de certaines installations entraînent des

Échauffements à l'origine de bon nombre de départs d'incendies (environ un incendie sur Trois)

- Electrostatiques : décharges par étincelles...

L'électricité statique peut être à l'origine d'étincelles suffisamment énergétiques pour être une source d'inflammation;

- Mécaniques : étincelles d'origine mécanique, échauffement...

Les échauffements et les étincelles d'origine mécanique, résultant de friction, de choc et d'abrasion, ou de défaillances (roulements, paliers...) peuvent être à l'origine de températures très élevées et/ou de projections de particules incandescentes;

- Climatiques : foudre, soleil...

Un impact de foudre peut constituer une source d'inflammation directe ou à distance en induisant des surtensions ou des échauffements dans les équipements ;

- Chimiques : réactions exothermiques, auto-échauffement, emballement de réaction...

Les réactions chimiques peuvent dégager suffisamment de chaleur pour être une source d'inflammation;

- Bactériologiques : auto-échauffement

La fermentation bactérienne peut provoquer un dégagement de chaleur et favoriser les Conditions d'amorçage d'un auto-échauffement.

Les principales causes d'incendie en 2006 (hors habitation):



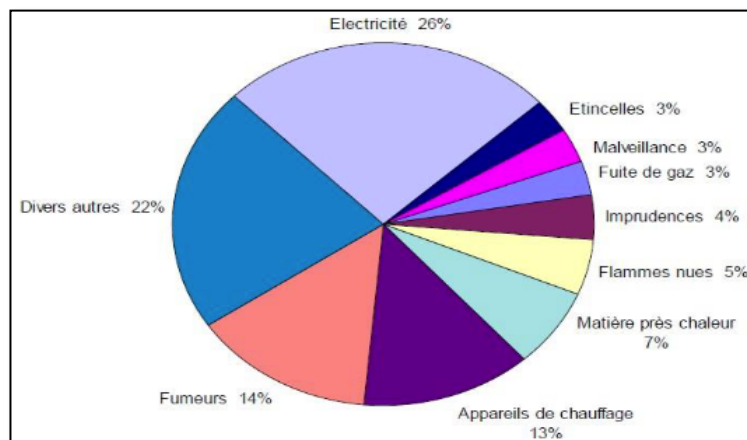


FIGURE I-1 : PRINCIPALES CAUSES D'INCENDIE EN 2006 (HORS HABITATION) [3]

Il est remarquable Statistiquement et particulièrement en 2006 que [3] :

- %57 des incendies sont dus à l'homme.
- %57 sont dus à des vices d'installation.

### 2.2.2 Le triangle du feu :

Le phénomène du feu est représenté par le triangle du feu, qui illustre les trois éléments essentiels à sa formation : le combustible, le comburant et l'énergie d'activation. [4]



FIGURE I-2 : LE TRIANGLE DU FEU

- **Le combustible ou matières inflammable** : ce qui brûle

Exemple :

- Solide : bois, charbon, papier
- Liquide : essence, alcools
- Gazeux: butane, propane

- **Le comburant** : oxydant pouvant favoriser un climat acceptable pour la création du feu.

Exemple:

- Oxygène
- Air
- Peroxyde

- **L'énergie d'activation ou source d'inflammation** : Énergie nécessaire pour la création du feu

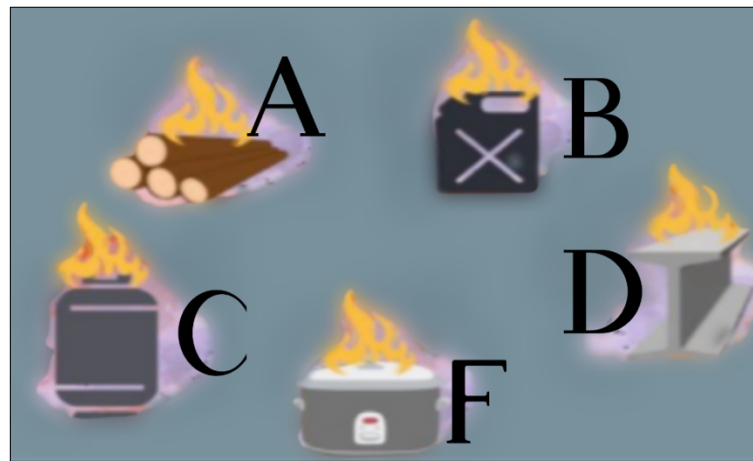
Exemple :

- La flamme
- L'étincelle
- La décharge électrique
- Une certaine énergie mécanique
- etc.

### **2.3 Types de feux et classes d'incendies**

Les incendies sont classés en plusieurs catégories selon le type de combustible impliqué :

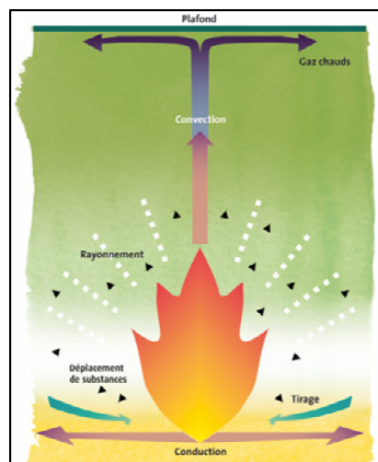
- **Classe A** : Feux de solides (bois, papier, textiles).
- **Classe B** : Feux de liquides inflammables (essence, solvants, alcool).
- **Classe C** : Feux de gaz inflammables (méthane, propane, butane).
- **Classe D** : Feux de métaux (aluminium, magnésium, sodium).
- **Classe F (ou K)** : Feux d'huiles et graisses de cuisson.



*FIGURE I-3 : LES DIFFERENTES CLASSES DE FEU*

## **2.4 Propagation de l'incendie**

La propagation de l'incendie désigne la manière dont un feu se propage dans un espace donné, influencé par divers facteurs physiques, chimiques et environnementaux. La vitesse et l'intensité de cette propagation dépendent de la nature des combustibles, des conditions météorologiques, de la ventilation et de la configuration du lieu.



*FIGURE I-4 : MODES DE PROPAGATION D'UN INCENDIE [5].*

### **2.4.1 Facteurs de propagation**

Les Principaux paramètres influençant le développement du feu :

- La quantité de combustibles qui détermine l'énergie disponible pour l'incendie.
- au pouvoir calorifique du combustible.
- Forme et nature des matériaux : impacte la propagation des flammes.
- aux produits de décomposition : certains matériaux, comme les plastiques, libèrent des gaz inflammables favorisant la propagation du feu.
- au degré hygrométrique : la sécheresse augmente les possibilités d'inflammation.
- à la ventilation et à la circulation des gaz qui sont fonctions de l'importance, de la forme et de la répartition des ouvertures (portes, fenêtres, exutoires de fumées...).
- à la nature du local en feu : les dimensions du local et la nature des parois vont conditionner son isolement thermique. [2]

### **2.4.2 Modes de propagation**

L'extension du feu s'effectue par transport d'énergie dû :

- au rayonnement : apport de chaleur aux matériaux voisins du foyer
- à la convection : transfert de chaleur par mouvement ascendant d'air réchauffé
- à la conduction : transfert de chaleur au sein d'un même matériau
- au déplacement de substances déjà en combustion (exemple: transmission du feu dans les systèmes de ventilation). [2]

## **3. Composition de la peau d'organisme**

### **3.1 Définition de la peau**

La peau, organe protecteur primordial, se compose de trois couches principales : l'épiderme, le derme et l'hypoderme. Elle constitue une barrière essentielle contre les risques extérieurs. Sa structure repose sur divers éléments biologiques, notamment des cellules, des protéines, des lipides et de l'eau, qui lui confèrent élasticité, résistance et capacité de régénération.

### **3.2 Structure de la peau**

La peau est composée de trois couches principales :

- **Épiderme** : Il s'agit de la couche la plus externe, innervée mais dépourvue de vaisseaux sanguins, qui se renouvelle en environ 28 jours. Elle est composée de divers types de cellules.[6]
- **Derme** : Le tissu conjonctif dense, riche en matrice extracellulaire (MEC) et en fibroblastes, présente une épaisseur variable selon les zones du corps, avec un maximum au niveau du dos et un minimum au niveau des paupières. Hautement vascularisé et innervé, le derme renferme entre 20 et 40 % de l'eau totale de l'organisme. [6]
- **Hypoderme** : Il s'agit de la couche la plus profonde de la peau, richement vascularisée et innervée. Principalement constitué de tissu adipeux (blanc et brun), il assure une fonction d'adaptation aux pressions et aux glissements, tout en contribuant à la répartition des charges. Il peut également jouer un rôle temporaire de comblement, comme au niveau des seins, servir de réserve énergétique et calorique, et intervenir dans la thermorégulation ainsi que dans l'équilibre hydrique de l'organisme. [6]

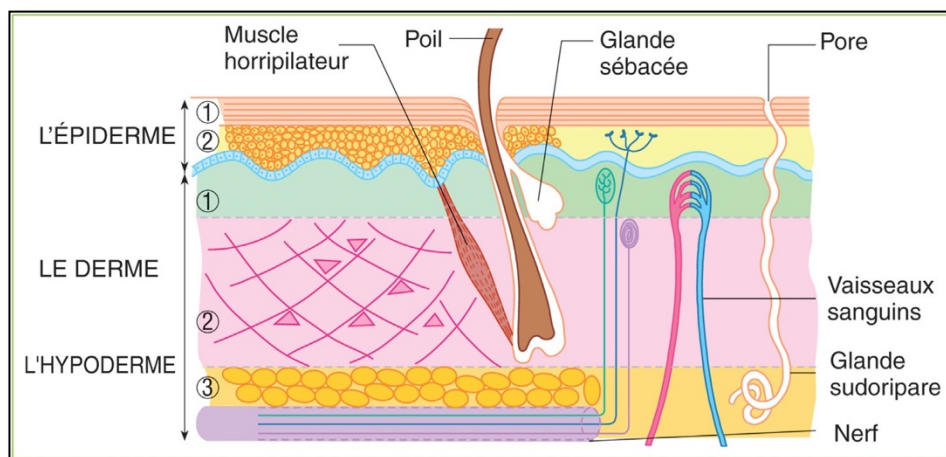


FIGURE I-5 : SCHEMA DE LA STRUCTURE DE LA PEAU. [6]

## **4. Effet Thermique du Feu sur l'Environnement et les Personnes**

### **4.1 Effets sur les Êtres Humains**

Les effets thermiques d'un incendie sur les personnes découlent principalement de trois sources distinctes :

- Un dérèglement de la thermorégulation entraînant une hausse de la température corporelle. Comme la fièvre, cette augmentation peut provoquer des maux de tête et devenir fatale au-delà de 42 °C. L'évacuation de la chaleur reposant sur l'évaporation de la sueur, le niveau d'humidité ambiant est un facteur déterminant.
- Une atteinte des voies respiratoires pouvant entraîner une asphyxie, se traduisant par un dessèchement ou des brûlures à divers niveaux, notamment la gorge, la trachée, les bronches et les alvéoles pulmonaires.
- Un effet direct sur la peau (brûlures) soit par un flux radiatif incident sans contact avec les fumées, soit par convection et au contact des tissus avec les fumées.

Ces brûlures peuvent résulter d'un contact direct avec les flammes ou d'une transmission indirecte de chaleur, par conduction ou par agression thermique des fumées. Elles peuvent entraîner des lésions cutanées ainsi que des inflammations des voies respiratoires, comme la trachéobronchite. L'exposition à une chaleur intense pouvant entraîner une hyperthermie suffisante pour altérer les facultés mentales, réduisant ainsi les capacités d'évacuation et de survie. Ce niveau est comparable à un effet subaigu, c'est-à-dire une exposition unique moyenne, mais prolongée. [7]

- **Effet de la température**

La température influence l'organisme humain de différentes manières sur le plan physiopathologique. Une exposition brève à des températures élevées peut provoquer des brûlures cutanées ou respiratoires, tandis qu'une chaleur plus modérée entraîne principalement une hyperthermie. Une table en croissante température, effet physiopathologique et durée tenabilité a été établie par la marine Américaine [8] comme mentionné au tableau I-1:

Table I-1 : Effets de la température sur les personnes [8].

Température (°C)	Incapacitation	Létalité
90	35 minutes	60 minutes
150	5 minutes	30 minutes
190	immédiate	15 minutes
200	Dommages irréversibles aux voies respiratoires	
340	Mort instantanée	

## 4.2 Impact sur les bâtiments

Les incendies entraînent des destructions majeures de bâtiments et de biens. Pour une protection optimale, il est essentiel de connaître la charge calorifique ainsi que le comportement des matériaux et des éléments de construction face au feu. [2]



FIGURE I-6 : EXEMPLES DE CONSÉQUENCES DE LA DESTRUCTION DES BÂTIMENTS ET DES BIENS EFFET [2]

## 5. Les brûlures

La protection contre le rayonnement thermique et les flammes repose sur deux scénarios principaux. Le premier concerne les situations où la chaleur et les flammes surviennent de manière intermittente et inattendue, comme lors d'accidents ou en temps de guerre. Le second scénario s'applique aux environnements professionnels où l'exposition est constante, notamment dans les laminoirs, les fonderies ou encore lors des interventions de sauvetage et de lutte contre les incendies. [9].

La peau humaine commence à ressentir la douleur dès 45 °C et subit une destruction totale à 72 °C, ce qui démontre sa grande sensibilité à la chaleur. Au-delà de 44 °C, la dégradation des protéines des tissus entraîne des dommages cellulaires, dont la vitesse et la profondeur de ces dommages augmentent avec l'augmentation de la température. Selon la profondeur des lésions, les brûlures se répartissent en trois catégories. [10] :

- Brûlure au premier degré
- Brûlure au deuxième degré
- Brûlure au troisième degré

*Table I-2 : Evolution des brûlures de la peau [11]*

Température de la peau (°C)	Brûlure
48	1 <sup>ère</sup> degré
55	2 <sup>ème</sup> degré
> 55	3 <sup>ème</sup> degré
72	Destruction immédiate de la peau

- **Brûlure au premier degré**

Il s'agit d'une brûlure ou d'une plaie superficielle. Cette brûlure correspond à une atteinte de la première couche de la peau. Généralement légère, elle ne nécessite pas de soins médicaux particuliers. Les brûlures au premier degré peuvent entraîner des échaudures et des coups de soleil [9]. Une brûlure au premier degré survient lorsque la peau est exposée à une température comprise entre 44 °C et 55 °C [12].





*FIGURE I-7 : BRÛLURE DE 1<sup>er</sup> DEGRÉ [13]*

- **Brûlure au deuxième degré**

Également appelées brûlures d'épaisseur partielle, elles affectent l'épiderme ainsi qu'une partie du derme. La peau touchée devient rouge, enflée et douloureuse, avec l'apparition de cloques. Ces brûlures de deuxième degré se manifestent par des rougeurs marquées, des ampoules et des lésions plus profondes. [9]. Les brûlures au deuxième degré surviennent généralement dans une plage de température comprise entre 55 °C et 60 °C. [12]



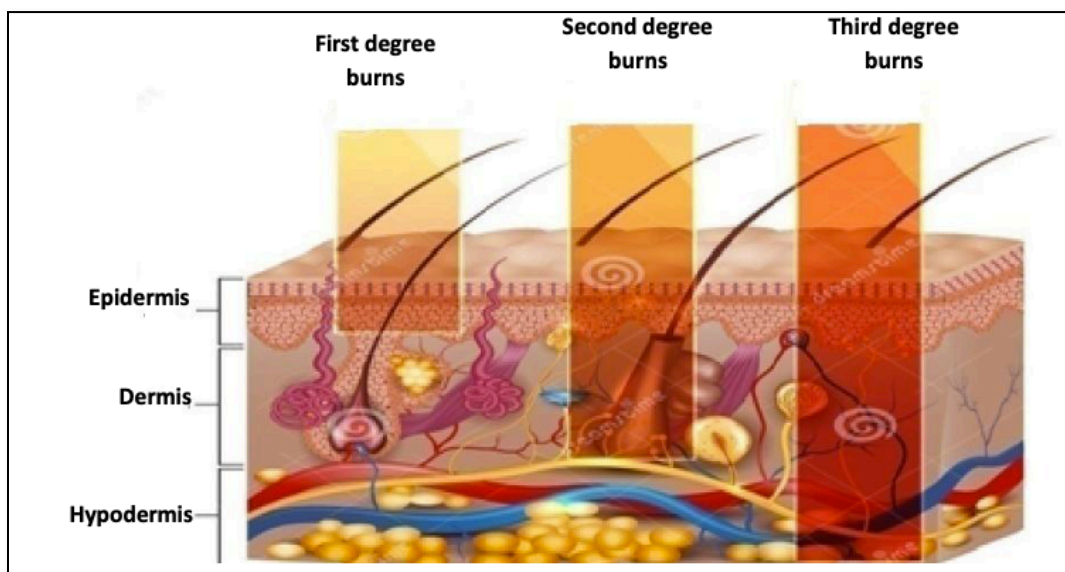
*FIGURE I-8 : BRÛLURES DU DEUXIÈME DEGRÉ : SUPERFICIELLES SUR LE BRAS; ET PROFONDES SUR L'AVANT-BRAS ET SUR L'IMAGE DE DROITE [14]*

- **Brûlure au troisième degré**

Il s'agit d'une brûlure de pleine épaisseur qui traverse le derme et affecte les tissus plus profonds. Une brûlure du troisième degré se caractérise par une peau blanchâtre, noircie ou carbonisée, souvent insensible en raison de la destruction des terminaisons nerveuses. La figure II-10 montre différents degrés de brûlure [9]. Les brûlures au troisième degré surviennent au-dessus de 60 °C [12].



*FIGURE I-9 : BRÛLURE DU TROISIÈME DEGRÉ AVEC ZONES DE BOURGEONNEMENT [14]*



*FIGURE I-10 : SCHEMA DE CATEGORISATION DES BRULURES [15]*

En générale, une personne dispose de 3 à 10 secondes pour évacuer une zone en feu exposée à un flux thermique d'environ 130 à 330 kW/m<sup>2</sup>. [16]. La majorité des fibres textiles sont plus faciles à brûler ou à dégrader.

Les vêtements de protection doivent être conçus pour résister aux flammes et capables de former une barrière thermique efficace. Ce dernier point est essentiel lorsque le porteur doit faire face à une exposition prolongée au feu. [16]. Il a été observé que les brûlures ne sont pas la principale cause de décès lors d'un incendie. Par conséquent, il est essentiel d'utiliser des matériaux combustibles à faible toxicité ou non toxiques afin de renforcer la protection. Pour des raisons de sécurité, les réglementations gouvernementales mentionnent que certains textiles, tels que les tapis, les tissus d'ameublement, la literie et les vêtements de nuit pour enfants, possèdent des propriétés ignifuges ou une résistance accrue aux flammes. [17].

## **6. Moyens de détection et d'intervention incendie**

### **6.1 Détection d'incendie**

Cette fonction est assurée par le système de détection incendie [3] qui gère toutes les informations reçues par les détecteurs automatiques et les déclencheurs manuels.

#### **6.1.1 Déclencheur manuel**

Il déclenche l'alarme après une pression sur la membrane du coffret. Il doit être placé

- A chaque étage;
- A proximité des escaliers;
- Au rez-de-chaussée;
- A proximité de chaque issue.

Le déclenchement se fait par pression sur la membrane. La déformation nette de celle-ci indique que le produit a été actionné.

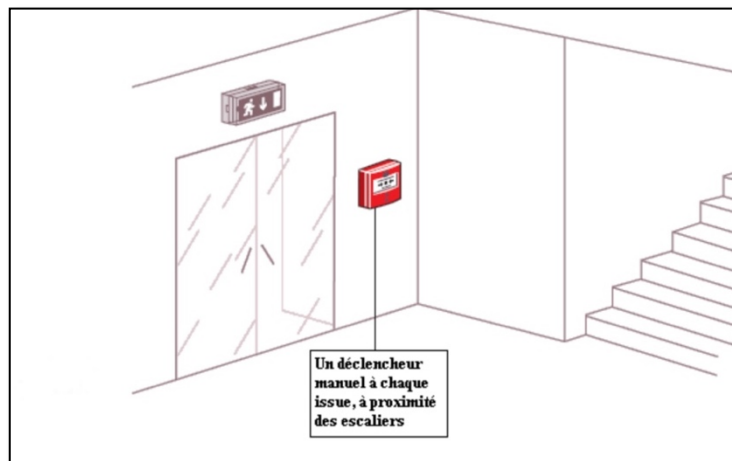


FIGURE I-11 : EXEMPLE D'UN DÉCLENCHEUR MANUEL [18]

### 6.1.2 Détection Automatique

Il permet la surveillance d'un bâtiment de façon automatique. Il existe différents types de détecteurs automatiques suivant le risque à surveiller:

- Le détecteur optique de fumée
  - Il est sensible (détection de particules) à tous les types de fumées et d'aérosols. Il n'est pas sensible au feu sans fumée (feu d'alcool)
  - Il détecte rapidement le début d'un incendie avant la formation de flamme.
- Le détecteur thermo-vélocimétrique
  - Il réagit à un seuil de température atteint à un temps donné, suivant la vitesse d'élévation de la température.
  - Il transmet également l'alarme dès que la température dépasse un seuil fixé (60°C)
- Le détecteur linéaire de fumée
  - Il est sensible aux fumées blanches ou noires qui traversent le faisceau laser émis par le boîtier et renvoyé par le réflecteur.
  - Son intérêt réside dans la couverture de grandes distances évitant ainsi l'emploi de plusieurs détecteurs de fumée ponctuels.
- Le détecteur de flamme
  - Il est sensible au rayonnement infrarouge émis par les flammes d'un foyer ainsi qu'à la présence du CO<sub>2</sub> résultant.

La figure ci-dessous résume l'utilisation et le comportement des détecteurs:

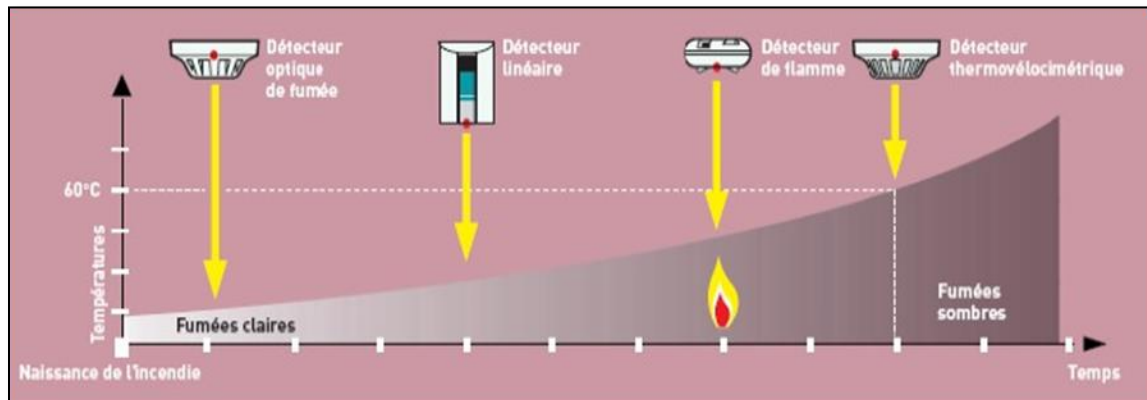


FIGURE I-12 : UTILISATION ET COMPORTEMENT DES DÉTECTEURS EN FONCTION DE L'ÉVOLUTION DU FEU [18]

## 6.2 Prévention active

### 6.2.1 Principe

La prévention active inclut la détection, l'alerte, l'extinction ainsi que l'évacuation des fumées. Elle est directement liée aux dispositifs installés dans le bâtiment. On peut résumer le principe de cette prévention dans les points suivants [3] :

- La détection et les moyens d'alerte permettent de signaler le début d'un incendie.
- Les dispositifs d'extinction offrent aux occupants la possibilité d'intervenir sans délai et avec efficacité afin de maîtriser un départ de feu.
- Le sprinkler constitue une intervention automatique sur un incendie naissant.
- La signalisation et l'éclairage de sécurité facilitent l'évacuation et l'intervention.

### 6.2.2 Les agents extincteurs

Selon la classification des feux, on utilise différents agents extincteurs [3]

- L'eau
- Les mousses
- Les poudres
- Les Gaz

### **L'eau**

Cet agent est principalement utilisé pour éteindre les incendies de classe A. Elle peut être utilisée à l'état naturel ou combiné à un additif afin d'améliorer ses performances d'extinction. [19]

### **La mousse**

C'est un agent extincteur qui agit par isolement par rapport à l'air, par étouffement et dans une certaine mesure par refroidissement. Il est efficace pour lutter contre les feux de classe B. Il est produit par le mélange d'un flux d'air et d'un jet d'eau sous pression auquel une quantité spécifique d'émulseur a été ajoutée. [199]

### **Les poudres**

Les poudres extinctrices arrêtent presque instantanément les flammes, mais elles sont inefficaces contre les braises. elles sont donc essentiellement efficaces sur les feux de classes B et C. Composées généralement de bicarbonate de sodium ou de potassium, elles sont couramment utilisées dans les extincteurs portables. Elles ne sont pas toxiques mais sont légèrement piquantes pour les yeux et ne doivent pas être respirées. Elles constituent des nuages diminuant fortement la visibilité et se déposent partout, après extinction, nécessitant un nettoyage très minutieux ultérieur. Les poudres A, B, C, appelées parfois « poudres polyvalentes » sont à base de sels d'ammonium, phosphates et sulfates ; l'effet sur les feux de classe A est obtenu par formation d'une sorte de gangue sur les braises [3]

### **Les gaz**

Les gaz extincteurs peuvent être classés en deux catégories [3]:

- Les gaz inhibiteurs, composés de substances chimiques telles que les halogènes, qui agissent sur les flammes à faible concentration;
- Les gaz inertes ainsi que le dioxyde de carbone ( $\text{CO}_2$ ) éteignent l'incendie en réduisant la concentration en oxygène de l'air ambiant. Les halons ont longtemps été les gaz extincteurs les plus couramment employés, mais leur usage a été restreint après la découverte de leur impact négatif sur l'environnement, notamment sur la couche d'ozone.

Les gaz inhibiteurs actuellement utilisables sont des hydrocarbures halogénés dont les appellations commerciales sont FM 200, FE 13, CEA 410, etc.

Les gaz inertes utilisés dans des volumes plus importants, susceptibles d'être occupés par des personnes, sont des produits contenant une proportion d'oxygène pouvant être tolérée

temporairement par un homme, mais qui arrête la réaction de combustion des feux de surface. Il s'agit des produits dont l'appellation commerciale est Inergen, Aragonite, Argotec, etc. Ces gaz sont généralement utilisés en noyage complet (extinction automatique à gaz).

Le dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>) agit à la fois par étouffement et par refroidissement. Il est utilisé en noyage total, en noyage partiel ou en extincteurs manuels. C'est l'agent extincteur généralement recommandé pour les feux dit « électriques », c'est-à-dire pour éteindre un incendie prenant naissance dans un appareil pouvant être sous tension (armoire électrique notamment)

**Remarque :** L'agent extincteur est à choisir en fonction des classes de feu A, B, C

### **6.2.3 Les procédés d'extinction (Mode d'action des agents extincteurs)**

Pour répondre efficacement face à un incendie, on peut agir de différentes façons sur un ou plusieurs éléments du triangle du feu:

- Refroidissement : L'eau se vaporise au contact du foyer en absorbant une grande quantité de chaleur.
- Souffle : L'effet mécanique obtenu par pression d'un jet de liquide ou de gaz provoque le décollement de la flamme.
- Etouffement : L'action des mousses par exemple qui diminue le pourcentage d'oxygène et augmente la teneur en vapeur d'eau.
- Inhibition : L'extinction par inhibition permet de stopper la réaction en chaîne responsable de la combustion, en diffusant un produit qui réduira l'affinité des combustibles avec l'air.

### **6.2.4 Le matériel de première intervention**

#### **6.2.4.1 Les extincteurs**

C'est le matériel de première intervention le plus couramment utilisé dans l'attente de moyens d'intervention plus puissants. Il doit être mis en action rapidement et de manière efficace par toute personne constatant un début d'incendie. [2].

L'extincteur doit être facilement maniable et obligatoirement de couleur rouge. Pour les extincteurs à eau, sa capacité minimale est de 6 litres. Il doit être placé de manière à rester visible et accessible en toutes circonstances, notamment dans les zones de circulation et à proximité des

risques spécifiques. Ils doivent faire l'objet d'une vérification annuelle et d'une révision tous les 10 ans, attestés par une étiquette sur l'appareil par une personne ou un organisme compétent. L'implantation des extincteurs ainsi que le suivi des contrôles doivent être consignés dans le registre de sécurité. [20]

Deux critères caractérisent les extincteurs:

- L'agent extincteur qu'ils renferment (eau, poudre, CO<sub>2</sub>)
- Leur capacité exprimée en litre ou en kilogramme (5 à 9 kg)

Table I-3 : Les caractéristiques principales des extincteurs [3]

Types d'extincteurs	Capacité	Durée	Portée
<b>Eau</b>	6 et 9 l	12 à 20 s	2 à 3 m
<b>Poudre</b>	6 et 9 kg	12 à 20 s	2 à 4 m
<b>CO<sub>2</sub></b>	6 et 9 l	6 à 10 s	1 à 2 m

Les figures suivantes représentent quelques exemples de catégories d'extincteurs:



FIGURE I-13 : EXTINCTEUR À EAU (6 L) [3]



FIGURE I-14 : EXTINCTEUR À POUDRE [3]





*FIGURE I-16 :  
EXTINCTEUR AU CO<sub>2</sub> [3]*



*FIGURE I-15 :  
EXTINCTEUR DOUCHE  
PORTATIVE [3]*

#### **6.2.4.2 Les robinets d'incendie armés (R.I.A)**

Un robinet d'incendie armé est un dispositif de première intervention, alimenté en eau, destiné à la lutte contre les incendies et pouvant être utilisé aussi bien par du personnel qualifié ou non

Un R.I.A. se compose [19] :

- D'un dévidoir à alimentation axiale;
- D'un robinet d'arrêt pour fermeture de l'alimentation;
- D'une longueur élémentaire de tuyau semi-rigide de 20 à 30 mètres;
- D'une clé tricoises et de son support, le cas échéant;
- D'un seau et de son support;
- Eventuellement d'une hache d'incendie;
- Numéroté en une série unique.



*FIGURE I-17 : ROBINET D'INCENDIE ARMÉ (R.I.A.)*

Les R.I.A. doivent remplir les conditions suivantes [19] :

- La pression minimale de fonctionnement ne doit pas être inférieure à 2,5 bars et supérieure à 4,5 bars;
- Un manomètre avec robinet 3 voies doit être mis en place pour le contrôle de cette pression;
- Le R.I.A. doit être placé à l'intérieur des locaux à protéger;
- Le nombre et le choix de leur emplacement doivent être tels que toute la surface puisse être efficacement atteinte;
- On doit pouvoir atteindre tout point par au moins 2 jets de R.I.A. dans les locaux présentant des risques importants;
- Le R.I.A est alimenté par une canalisation d'eau desservie par une conduite publique ou par réservoir élevé ou sous pression;
- Des essais mensuels doivent être effectués et la pression relevée doit être inscrite dans un registre de sécurité.

**Remarque:**

Un réseau de R.I.A. doit obligatoirement inclure au minimum deux pompes : Une pompe de fonctionnement normal et une pompe de secours automatique [2]

## **6.2.5 Le matériel de deuxième intervention**

### **6.2.5.1 Bouche et poteau incendie**

Les poteaux et les bouches d'incendie sont utilisés pour raccorder les tuyaux. Les poteaux d'incendie, visibles dans les rues et généralement rouges, contrastent avec les bouches d'incendie, qui sont enfouies sous terre dans un coffre et signalées par une plaque. [2]

Les bouches et poteaux d'incendie [20] permettent aux sapeurs-pompiers de mettre en œuvre leurs moyens d'extinction.

Les emplacements des points d'eau doivent être:

- Facilement accessibles en permanence;
- Signalés conformément aux normes en vigueur;
- Situés à 5 mètres au plus du bord de la chaussée ou de l'aire de stationnement des engins d'incendie.



*FIGURE I-18 : POTEAU  
D'INCENDIE*

### **6.2.5.2 Les tuyaux anti-incendie : [3]**

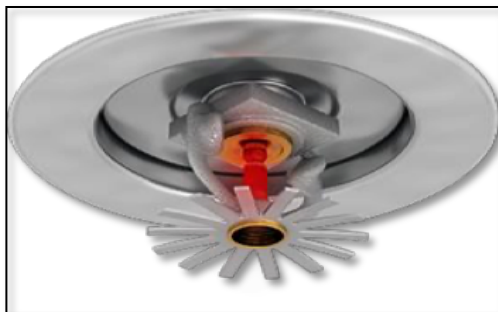
Les tuyaux d'incendie sont des conduits flexibles conçus pour acheminer l'eau au sein des systèmes hydrauliques dédiés à la lutte contre le feu. Ils sont équipés de raccords normalisés pour assurer une connexion efficace. Il est également possible d'intégrer une division afin de répartir l'alimentation vers plusieurs lances à partir d'un unique tuyau relié au fourgon.

### **6.2.5.3 Extinction automatique à eau « les sprinkleurs»**

Ce système est constitué d'un réseau de canalisations permettant de projeter rapidement de l'eau sous pression, un foyer d'incendie qui se déclare. Les plafonds des zones à protéger sont équipés de conduits munis de dispositifs d'extinction ou "sprinkleurs". [21].

A partir d'une certaine température, le ou les sprinkleurs exposés s'ouvrent brusquement, diffusant de l'eau sous forme de pluie pour une extinction localisée efficace. L'ouverture d'un sprinkler provoque une chute de pression dans le réseau, un mécanisme utilisé pour activer une alarme sonore. [21].

Les sprinkleurs ne sont pas soumis à une réglementation stricte, mais ils sont encadrés par la règle A.P.S.A.D. R1, qui concerne l'installation des systèmes d'extinction automatique à eau de type sprinklers. En installant un réseau de sprinkleur conforme à cette norme peut permettre à une entreprise de réduire sa prime de risque jusqu'à 80 %. [2].



*FIGURE I-20 : IMAGE D'UN  
SPRINKLEUR [21]*



*FIGURE I-19 : SPRINKLER À AMPOULE [3]*

## **7. Intervention des sapeurs-pompiers contre les incendies**

### **7.1 Définition de métier de sapeurs-pompier :**

Pour mieux comprendre la profession de pompier, il est important d'explorer plusieurs termes fondamentaux liés à ce domaine. Ces concepts, qui nous aideront à mieux définir notre sujet d'étude, incluent la protection civile, le rôle du pompier [22]



*FIGURE I-21 : L'EAU EN JET PLEIN [23].*

### **7.2 Définition de la protection civile [22]**

La sécurité civile a pour objectif de prévenir les risques quels qu'ils soient, d'informer et d'alerter la population, ainsi que d'assurer la protection des personnes, des biens et de l'environnement face aux accidents, sinistres et catastrophes. par la préparation et la mise en œuvre de moyens appropriées relevant de l'état, des collectivités territoriales et des autres personnes publiques ou privées.

### **7.3 Définition de sapeurs-pompiers**

Selon le petit dictionnaire Larousse illustré, « le pompier est une personne faisant partie d'un corps organisé pour combattre les incendies, intervenir en cas de sinistre et effectuer des opérations de sauvetage ».

Le métier de pompier se perfectionne au quotidien, les agents sont en formation continue, les techniques évoluent en permanence. Être pompier implique de se maintenir à niveau, au risque de mettre en péril la sécurité des usages ou des collègues. Puis le métier de sapeur-pompier est aussi question de savoir faire, les agents improvisent à chaque intervention, plus ou moins, selon la

particularité de la mission à accomplir. Il faut savoir adapter les moyens et les hommes aux situations, mais aussi inventer de nouveaux moyens, de nouvelles techniques, donner des consignes à la hâte à des civils pour qu'ils prêtent main forte pour que l'objectif, en général urgent. Parmi les pompiers civils, on distingue les pompiers professionnels et les pompiers volontaires, des lois les plus nombreux. Les pompiers professionnels sont des fonctionnaires territoriaux rattachés à des SDIS (services départementaux d'incendie et de secours). Certains pompiers professionnels sont également employés soit directement par des entreprises soit par des sociétés de sécurité privée. Pompiers professionnels ou pompiers d'entreprise, ils assurent la sécurité, la prévention, la maintenance des appareils et la formation des personnels. Les pompiers volontaires remplissent leurs mission (missions de secours à victimes, des activités incendie et des interventions diverses) tout en exerçant leur propre métier en parallèle. Qu'ils soient professionnels ou militaires, les sapeurs pompiers sont astreints à un service de 24h ou de 48h d'affilée pour pouvoir intervenir à tout moment. Cette permanence est compensée par un système de repos. Le mode de vie des sapeurs pompiers professionnels et celui des militaires sont voisins (casernement, hiérarchie, grades...). Les pompiers volontaires, de leur côté, doivent organiser leur vie afin de pouvoir se libérer immédiatement en cas d'alerte, ils participent aux entraînements et aux tours de garde.

#### **7.4 Rôle des sapeurs-pompiers**

Les sapeurs-pompiers assurent la protection des personnes, des biens et de l'environnement. Leur rôle consiste à intervenir lors d'incendies pour les contrôler et porter secours aux victimes et leur prodiguer les premiers soins. Par ailleurs, ils jouent un rôle crucial dans la prévention des risques en sensibilisant la population et en maîtrisant les appareils de sécurité. Leur réactivité et leur dévouement sont indispensables pour limiter les dommages et préserver des vies.

#### **7.5 Dispositifs pour faciliter l'action des sapeurs pompiers**

Chaque bâtiment de l'établissement dispose, à son entrée, d'un plan schématique visant à guider les usagers pour permettre une meilleure orientation à travers les différents niveaux (chaussé, chaque étage et l'étage courant). Ce plan comporte: [24]

- Les divers locaux techniques et autres locaux à risque particulier.
- Les dispositifs et commande de sécurité.
- Les organes de coupures des fluides.

- Les organes ,les arrêts ,les sources d'énergie.
- Les moyens fixes d'extinction et d'alarme

### 7.6 Moyens pour faciliter l'intervention des sapeurs pompiers [25]

- Les balcons, passerelles, échelles et terrasses permettent d'atteindre facilement les espaces dégagés des bâtiments.
- Les tours d'incendie permettent aux pompiers d'atteindre directement un étage d'un immeuble sans être entravés par les flammes.
- Les trémies intégrées dans les planchers facilitent l'accès aux zones inférieures pour la lutte contre les incendies au niveau des sous-sols.

### 7.7 Résistance à la température

Lorsqu'un pompier est impliqué dans une mission de sauvetage d'urgence ou de lutte contre un incendie, il se peut qu'il ne puisse pas quitter immédiatement la zone d'intervention. Dans ce cas, leurs vêtements de protection sont les seuls moyens de survie.

Les vêtements de protection offrent aux pompiers un temps précieux pour se retirer des situations à haut risque. L'exposition typique aux conditions thermiques pour un pompier se situe entre 1,3 et 12,6 kW/m<sup>2</sup>, avec des pics pouvant atteindre 210 kW/m<sup>2</sup> [5]. En fonction de leurs activités, les conditions de travail des pompiers peuvent être classées en trois catégories, comme le montre le tableau I-4.

Table I-4 : Conditions de travail des pompiers [5].

Conditions de travail	Température	Temps	Flux de chaleur [kW/m <sup>2</sup> ]	Risque
Condition de travail courante	30°C - 100°C	25 - 60 min	0,83 – 1,67	Rien
Condition dangereuse	100°C - 300°C	≤ 20 min	2 – 12,5	Stress thermique
Etat d'urgence	Jusqu'à 1200°C	< 1 min	12 - 200	Brûlures



## **8. Equipement de protection des sapeurs-pompiers (dans le monde et en algérie)**

### **8.1 Équipements de protection des sapeurs-pompiers dans le monde**

Les avancées dans le domaine des textiles techniques permettent de réaliser des vêtements de protection toujours plus élaborés (figures 22 et 23). Les sapeurs-pompiers étant déjà fortement chargés lors de leurs interventions, il est essentiel que leur équipement reste aussi léger que possible, d'autant plus qu'ils n'utilisent pas la même tenue pour chaque type de mission. Aussi, ces textiles permettent aux fabricants de créer des doublures résistantes au feu, des enveloppes extérieures et des accessoires qui non seulement résistent aux risques thermiques auxquels les sapeurs-pompiers peuvent être exposés, mais en plus leur permettent d'intervenir sans nuire à la mobilité. [5]

Même si les tenues actuellement utilisées ont été préalablement testées par les fabricants, les comparaisons avec des tenues plus anciennes n'ont jamais été totalement délaissées. Cela permet notamment d'évaluer l'évolution de la qualité au fil du temps, si les tenues très récentes sont meilleures que par exemple des tenues créées il y a dix ans ou des cuirs anciens, si les qualités de résistance à la chaleur dépendent des tissus, de la taille de la maille, ...etc. [5]



*FIGURE I-22 : EQUIPEMENT « E1 » DIT DE L'ANCIENNE GÉNÉRATION [26].*





FIGURE I-23 : EQUIPEMENT « E2CO » DIT DE NOUVELLE GÉNÉRATION [26].

### 8.1.1 Les différentes couches du vêtement de protection d'un sapeur-pompier.

Les différentes couches du vêtement de protection (EPI) du pompier utilisées sont schématisées dans la figure I-24.

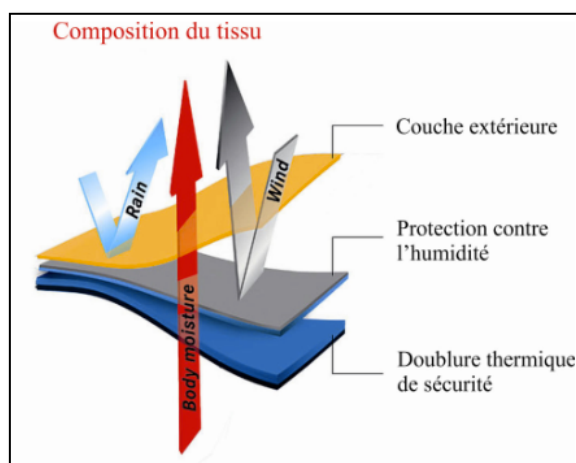


FIGURE I-24 : REPRÉSENTATION SCHÉMATIQUE DES DIFFÉRENTES COUCHES DU VÊTEMENT DE PROTECTION D'UN SAPEUR-POMPIER. [5]

Comme montré dans la figure I-24, le vêtement de protection se compose d'une couche extérieure résistante au feu, conçue pour protéger contre les radiations thermiques et les flammes, d'une couche imperméable pour bloquer les liquides et les vapeurs, en particulier les composés

chimiques, et d'une couche doublure thermique qui réduit le transfert de chaleur vers l'individu. [5].

### 8.1.2 Bilan massique des équipements E1 et E2Co

Les deux équipements évalués sont de taille identique et, la masse de chaque élément mesurée avec une balance Mettler ID1S équipée d'un moyennneur statistique est reportée dans le tableau I-5

Table I-5 : Bilan massique de chaque équipement [27].

Eléments	Equipement E1	Equipement E2Co
Slip	0.06	0.06
Chemise F1 MC	0.30	0.30
Mi-bas en laine	0.14	0.14
Pantalon F1	0.47	0.47
Bottes d'incendie	2.47	2.47
Tour de cou	0.14	sans objet
Cagoule en textile	sans objet	0.04
Veste d'intervention	Cuir 3.10	Textile 1.77
Sur-pantalon	0.44	Textile 0.73
Ceinturon d'incendie	0.42	0.63
Gants de protection	Cuir 0.28	Cuir 0.28
Casque F1	1.25	1.25
Poids total des effets d'habillement	9.05	8.13
Masque d'ARI	0.54	0.62
ARI	15.37 bi-bouteilles (8 litres – 200 bar)	13.76 mono-bouteille (9 litres – 300 bar)
<b>Poids total de l'équipement (en kg)</b>	<b>25.00</b>	<b>22.5</b>

Pour les deux catégories de protections vestimentaires, la tenue dite « de base » comprenant slip et soutien-gorge pour les femmes, mi-bas, bottes, pantalon F1 et chemise F1 présente une masse totale identique. Par contre, une différence de poids d'environ 18 % est observée entre les deux modèles de tenues d'intervention. Cette différence s'explique principalement par le poids du veston en cuir, évalué à  $3,10 \pm 0,05$  kg, nettement plus lourd que la veste en tissu qui pèse  $1,77 \pm 0,05$  kg. En configuration opérationnelle, l'ensemble des vêtements de l'équipement E1 atteint un poids approximatif de 9,05 kg, tandis que celui associé à l'équipement E2Co est d'environ 8,13 kg. La nouvelle génération de tenues offre donc un gain de poids d'environ 10% par rapport à celle jusque là, en dotation dans les unités.

En ce qui concerne la protection respiratoire, on constate également une différence de masse de plus de 10 % entre les deux appareils avec un ARI bi-bouteilles qui pèse  $15,37 \pm 0,01$  kg et un ARI mono-bouteille qui pèse  $13,76 \pm 0,02$  kg. [27]

## **8.2 Équipements de protection des sapeurs-pompiers en Algérie**

En Algérie, les sapeurs-pompiers de la Protection Civile Algérienne disposent d'équipements conformes aux standards internationaux, bien que leur modernisation soit progressive.

Comme nous n'avons pas pu obtenir des équipements de sapeur-pompier (en Algérie) pour cette recherche, nous avons utilisé un équipement de Sonatrach (station pompage de Béni Mansour), qui similaire beaucoup à la tenue de sapeur-pompier par sa forme et sa conception. Il convient de noter que ce choix est uniquement à titre indicatif et n'affecte pas le contenu ou les objectifs de la recherche.

### **8.2.1 Tenue d'intervention incendie**

Cette tenue est spécialement conçue pour protéger l'utilisateur contre les risques thermiques extrêmes, tels que les flammes, la chaleur rayonnante, les projections de liquides chauds, ainsi que les dangers mécaniques comme les chocs ou les coupures. Elle est constituée de plusieurs composants, un manteau et un pantalon ignifugés, un casque de protection thermique, une cagoule, des gants résistants au feu et des bottes renforcées. L'ensemble permet de préserver l'intégrité physique du pompier, de limiter les brûlures et de garantir sa sécurité lors d'opérations de sauvetage, d'évacuation ou d'extinction de feu. Outre sa fonction protectrice, cette tenue améliore aussi la visibilité du porteur grâce à des bandes rétroréfléchissantes, ce qui est crucial dans les

environnements enfumés ou à faible éclairage. Elle est utilisée non seulement dans les incendies urbains et industriels, mais aussi dans les interventions en milieu naturel, chimique ou routier.

La tenue doit permettre une mobilité optimale malgré sa protection renforcée. Elle est conçue pour résister à des températures supérieures à 800 °C pendant plusieurs secondes, ce qui permet au pompier de franchir une zone de danger ou d'évacuer une victime en sécurité. La visibilité, la ventilation et l'ergonomie sont aussi des éléments cruciaux, intégrés dès la conception



*FIGURE I-25 : TENUE D'INTERVENTION INCENDIE*

### **8.2.2 Vêtements ou tenue d'approche du feu.**

Une tenue aluminisée de protection thermique est un équipement de protection individuelle (EPI) conçu pour protéger les intervenants contre des températures extrêmement élevées, des projections de flammes, de chaleur radiante et parfois de produits chimiques légers. Elle est couramment utilisée dans les environnements à risque thermique élevé comme les fonderies, les aciéries, les raffineries, les opérations de lutte contre l'incendie en milieu industriel.

**a. Caractéristiques principales :**

- Revêtement aluminisé : réfléchit la chaleur rayonnante.
- Isolation thermique : multicouches pour retarder la transmission de chaleur.
- Casque avec visière dorée : protège les yeux et le visage contre les fortes luminosités thermiques.
- Gants et bottes intégrés ou assortis : protection complète du corps.

**b. Les éléments de la tenue**

- **Matière extérieure** : Tissu aluminisé (généralement en fibre de verre ou aramide aluminisé)
- **Couche intermédiaire** : Isolants thermiques multicouches
- **Doublure intérieure** : Matériaux confortables et résistants à la chaleur
- **Visière** : Verre doré ou plaqué or, anti-rayonnements infrarouges
- **Gants** : Intégrés ou séparés, également aluminisés
- **Capuche ou casque** : Pour protéger tête, cou et visage
- **Chaussures/Bottes** : Résistantes aux hautes températures, souvent avec semelle antidérapante



*FIGURE I-26 : TENUE D'APPROCHE DU FEU.*

## **9. Conclusion**

L'étude technologique des feux et incendies met en évidence la complexité des phénomènes impliqués ainsi que l'importance de la prévention et de l'intervention rapide. Les incendies, résultant de la combustion incontrôlée, peuvent causer des pertes humaines et matérielles considérables, en plus d'avoir un impact significatif sur l'environnement.

L'analyse des types de feux, de leur propagation et de leurs effets thermiques permet de mieux comprendre les dangers liés aux incendies. De plus, les moyens de détection et de prévention, allant des détecteurs aux équipements d'extinction, jouent un rôle crucial dans la réduction des risques.

Le rôle des sapeurs-pompiers est fondamental dans la lutte contre les incendies, non seulement en intervenant rapidement sur le terrain, mais aussi en sensibilisant la population aux bonnes pratiques

de sécurité. Enfin, les avancées technologiques en matière d'équipements de protection et de lutte contre le feu contribuent à améliorer l'efficacité des interventions et à minimiser les conséquences des incendies.

Ainsi, la prévention, l'éducation et l'innovation restent les piliers essentiels pour limiter les risques et mieux gérer les situations d'urgence liées aux incendies.

# CHAPITRE II



## **II. CHAPITRE 2 : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE**

### **1. INTRODUCTION**

Avant de lancer un projet de recherche ou de développement, il est essentiel de s'appuyer sur les travaux antérieurs afin de mieux cerner le sujet et d'éviter toute redondance. Ce chapitre présente l'état de l'art, c'est-à-dire une synthèse des connaissances actuelles, des solutions techniques mises en œuvre, ainsi que des recherches menées dans le domaine concerné. Il permet de dégager les tendances, d'identifier les limites des approches existantes et de situer notre propre contribution dans un contexte plus large. Cette analyse critique constitue ainsi la base sur laquelle reposera la suite de notre travail.

### **2. ÉTUDES RÉCENTES DANS CE DOMAINE**

Dans l'article "Les incendies de forêt catastrophiques", Éric RIGOLOT et les autres analysent l'augmentation préoccupante des méga-feux à l'échelle mondiale, en s'appuyant sur des exemples concrets récents (Australie, Californie, Amazonie, etc.). ils ont découvert que une nette augmentation mondiale de la fréquence et de l'intensité des feux de forêt extrêmes, alimentée par trois principaux facteurs aggravants : l'expansion démographique et l'étalement urbain à proximité des zones forestières, les changements d'affectation des sols qui augmentent la disponibilité de la biomasse combustible, et l'impact croissant du changement climatique, qui intensifie les sécheresses et crée des conditions favorables aux incendies de grande ampleur. Les auteurs expliquent comment ces incendies provoquent non seulement des destructions immédiates, mais déclenchent également des risques en cascade tels que les glissements de terrain, la dégradation des sols et le rejet massif de gaz à effet de serre, qui accélèrent à leur tour le changement climatique. L'article souligne que les stratégies actuelles de lutte contre les incendies perdent en efficacité dans des conditions météorologiques extrêmes et que les méthodes traditionnelles ne suffisent plus.

les auteurs estiment que prévenir les feux de forêt dévastateurs exige une réorientation des politiques actuelles. Il ne s'agit plus seulement de réduire l'étendue des zones brûlées, mais de limiter les répercussions sociales et écologiques des incendies. Ils recommandent une gestion des combustibles à grande échelle (comme les brûlages dirigés), une planification intégrée de l'utilisation des terres et une plus grande participation citoyenne par l'éducation et l'application de la loi. L'article prévient que sans de telles approches proactives et globales, des pays comme la

France, bien que gérant relativement bien la situation actuellement, pourraient bientôt être confrontés à des incendies géants incontrôlables aux conséquences graves. [28]

Dans l'article « Comment le risque d'incendie de forêt est lié à l'urbanisme et à l'indice météo-incendie dans le sud-est de la France (1990-2013) », les auteurs analysent l'influence des politiques d'urbanisme et des risques d'incendie liés aux conditions météorologiques sur la fréquence des incendies de forêt dans le sud-est de la France sur deux décennies. Ils ont cartographié les zones d'interface forêt-urbaine (WUI) pour les années 1990, 1999 et 2012 et les ont comparées aux données météorologiques afin de comprendre la dynamique des incendies.

Les résultats de l'article montrent qu'entre 1990 et 2013, le nombre de bâtiments dans les zones étudiées du sud-est de la France a augmenté de près de 30 %, mais que la surface totale de l'interface urbaine sauvage (WUI) n'a augmenté que d'environ 5 %. Cela indique une évolution vers une densité de logements plus élevée plutôt qu'un étalement urbain, influencée par les lois nationales d'urbanisme et de prévention des incendies. L'étude a révélé que le risque d'incendie est resté stable au fil du temps malgré l'augmentation du nombre de bâtiments, en raison de la densification de l'habitat, qui est généralement moins vulnérable aux incendies de forêt que les habitations dispersées ou isolées. De plus, l'analyse de l'indice météo-incendie (FWI) a révélé une relation non linéaire entre les conditions météorologiques et l'activité des incendies. La plupart des incendies et des zones brûlées se sont produits pendant les périodes où le FWI dépassait 90, mettant en évidence un seuil critique au-delà duquel le risque d'incendie augmente significativement. La discussion souligne qu'une planification urbaine efficace peut réduire significativement l'exposition aux incendies de forêt, et que les zones exposées au sud sont plus vulnérables en raison d'un rayonnement solaire plus important et de valeurs FWI plus élevées. L'étude conclut que la combinaison de politiques intelligentes d'utilisation des terres avec des stratégies ciblées de prévention des incendies peut être un moyen très efficace de gérer les risques d'incendies de forêt, d'autant plus que le changement climatique devrait augmenter la fréquence des incendies extrêmes. [29]

L'article « Burn injury » de Jeschke et al. (2020), publié dans Nature Reviews Disease Primers, offre une synthèse complète et actualisée des connaissances sur la physiopathologie, la prise en charge clinique et les conséquences à long terme des brûlures. Les auteurs établissent que

le traumatisme par brûlure n'est pas seulement une lésion localisée, mais déclenche une réponse systémique profonde et soutenue, marquée par une hyperinflammation, un dysfonctionnement immunitaire et un état hypermétabolique persistant. Les meilleures pratiques actuelles pour les soins aux brûlés, telles que décrites par les auteurs, vont au-delà de la simple survie aiguë et se concentrent sur la réduction des séquelles physiques et psychologiques à long terme grâce à des soins intensifs intégrés, une chirurgie précoce, un contrôle des infections et une rééducation intensive. De nouvelles stratégies thérapeutiques visent à moduler la réponse systémique excessive et à améliorer la régénération tissulaire, marquant ainsi un changement de paradigme vers une guérison holistique et centrée sur le patient. Ces travaux témoignent d'une compréhension approfondie et en constante évolution de la prise en charge des brûlures, illustrant que la réussite dépend de démarches interdisciplinaires et d'une innovation continue. [30]

Les avancées récentes de la recherche sur les brûlures, telles que décrites par Abraham et al en 2018, reflète une intégration sophistiquée de la modélisation biothermique, de la validation clinique et de méthodologies affinées de classification des lésions. Les auteurs vont au-delà des catégorisations phénoménologiques traditionnelles (par exemple, brûlures du premier, du deuxième et du troisième degré) en adoptant un système de classification histologiquement fondé brûlures superficielles, brûlures superficielles partielles, brûlures profondes partielles et brûlures profondes qui caractérise plus précisément l'étendue des lésions tissulaires. Au cœur de ces travaux se trouve l'application de l'équation de biochaleur de Pennes augmentée pour prendre en compte les effets de perfusion dynamique, la génération de chaleur métabolique et le transfert de chaleur par conduction, permettant ainsi des simulations numériques haute fidélité de la progression des lésions thermiques. L'étude valide rigoureusement ces modèles informatiques par rapport aux observations cliniques, démontrant une précision prédictive exceptionnelle (22/22 cas) pour les brûlures profondes partielles. Une contribution essentielle réside dans la quantification des seuils temps-température pour la gravité des brûlures, opérationnalisés à la fois par des intégrales de lésions basées sur la loi d'Arrhenius et par la dosimétrie en minutes équivalentes cumulées à 43 °C (CEM43). [31]

Sur le plan thérapeutique, ces travaux soulignent l'importance d'un refroidissement rapide ( $\leq 5$  s) avec des fluides à 10-20 °C, tout en décrivant les risques d'exacerbation cryogénique et d'hypothermie systémique. L'article corrige également les interprétations erronées courantes des

études fondamentales sur les brûlures (par exemple, Moritz et Henriques, 1947), précisant que les données antérieures concernaient la nécrose transépidermique plutôt que les lésions dermiques profondes. Les futures pistes de recherche, telles que proposées, privilégient l'intégration de la vascularisation spécifique du patient dans les modèles biothermiques, en fonction des progrès de l'imagerie médicale. Dans leur ensemble, ces travaux établissent un paradigme rigoureux et fondé sur des données probantes pour l'évaluation et la prise en charge des brûlures, reliant la thermodynamique computationnelle à la pratique clinique. [31]

L'étude de Pais et al. (2025) fournit une analyse complète et à la pointe des connaissances sur les brûlures graves, soulignant le rôle crucial de la santé mentale et de la toxicomanie dans l'évolution des soins. S'appuyant sur une analyse rétrospective de sept ans portant sur 438 patients admis à l'unité de soins intensifs (USI) du principal centre de traitement des brûlés de Suisse, les résultats révèlent que 38,8 % des patients présentaient des troubles psychiatriques préexistants, tandis que 24,4 % étaient sous l'influence de substances contrôlées au moment de la blessure. Ces facteurs étaient significativement associés à des taux de complications plus élevés, à une augmentation des interventions chirurgicales, à des séjours hospitaliers prolongés et à une réduction des taux de survie, avec un taux global de mortalité hospitalière de 15,8 %. L'étiologie des brûlures présentée dans le tableau II-1 a démontré que la plupart des blessures se sont produites à la maison ou au cours d'activités de loisirs (43,4 %), les incidents liés à la cuisine (10,5 %) et aux incendies de maison (9,8 %) étant les causes les plus fréquentes. En ce qui concerne le mécanisme de blessure décrit dans la figure II-1, les brûlures par flamme (64,2 %) étaient la principale cause, suivies des échaudures (15,1 %). Les patients avec >20% de surface corporelle brûlée (51,8% des cas) présentaient un risque particulièrement élevé, avec une mortalité de 8,1% dans ce sous-groupe. Les résultats ont également démontré que les troubles psychiatriques préexistants étaient significativement corrélés à des taux de complications plus élevés et à une hospitalisation plus longue, tandis que la consommation contrôlée de substances était associée à des taux de survie plus faibles. Les variations saisonnières et hebdomadaires, indiquent des admissions légèrement plus élevées les jeudis et en mars, bien que sans signification statistique. Collectivement, les résultats soulignent que les problèmes de santé mentale et la toxicomanie sont des facteurs de risque majeurs qui ont un impact sur le pronostic des patients brûlés et soulignent la nécessité de stratégies de soins intégrées. [32]

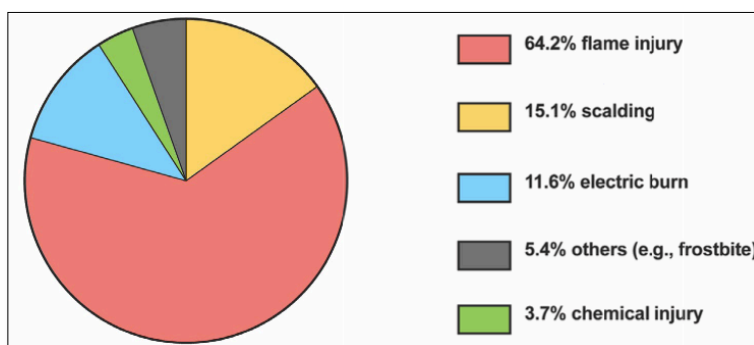


FIGURE II-1: MECANISMES SPECIFIQUES AUX BRULURES. DONNEES DESCRIPTIVES DE COMPTAGE DES VARIABLES BINAIRES RELATIVES AUX MECANISMES DES BRULURES. DONNEES = COMPTAGES ET %. [32]

Table II-1: Caractéristiques spécifiques des blessures basées sur les causes potentielles des brûlures [32]

Caractéristiques spécifiques au groupe ou à la cause (n = 438)	Percentage (%)
Blessures domestiques ou de loisirs	43.4
Liées au carburant ou au pétrole	7.5
Liées à une explosion	7.8
Liées à un barbecue	6.4
Brûlures liées à la cuisine	10.5
Brûlures liées aux incendies de maison	9.8
Lié à la consommation d'alcool	5.5
Lié à la consommation de nicotine	14.4
Lié à l'état psychiatrique actuel	24.9
Blessures liées à des tentatives de suicide	14.8
Affection neurologique/médicale	13.3
Brûlures liées au travail	21.2
Brûlures liées à la circulation	2.3
Blessures liées à des conditions extrêmes	2.3
Prendre le train	2.1
Foudre	0.5
Sauna	1.6

L'étude menée par Li et al en 2024 analyse de manière approfondie les caractéristiques épidémiologiques des brûlures de cause spéciale dans un centre régional majeur en Chine sur une période de 18 ans entre 2004 et 2021. Sur les 33 619 patients brûlés examinés, 13,3 % souffraient de brûlures de cause spéciale, les brûlures électriques constituant la majorité environ 60,98 %. Les patients brûlés de cause spéciale étaient généralement plus âgés (âge médian de 38 ans) et majoritairement de sexe masculin, contrairement au groupe des brûlures thermiques. De plus, ces patients ont subi des blessures plus graves, 78,1 % souffrant de brûlures de degré 3-4 et 50,8 % présentant des brûlures localisées aux membres supérieurs, un schéma détaillé plus en détail dans la figure II-2. Les résultats du traitement, indiquent que les patients atteints de brûlures de cause spéciale avaient des séjours hospitaliers médians plus longs (15 jours contre 11 jours) et des dépenses médicales significativement plus élevées, avec des coûts médians de 13 372 RMB contre 9 665 RMB pour les brûlures thermiques. Malgré ces caractéristiques cliniques graves, l'analyse de régression logistique a montré que les brûlures de cause spéciale n'étaient pas indépendamment associées à un risque de mortalité accru. Au contraire, des facteurs tels que l'âge avancé, le sexe masculin, le célibat, les brûlures survenant en hiver, une gravité plus élevée des brûlures et une plus grande surface corporelle totale étaient significativement associés à des risques de mortalité plus élevés. Ce travail comble un manque important dans la littérature en provenance des pays à revenu intermédiaire et apporte un fondement empirique essentiel à l'amélioration des stratégies de prévention, de prise en charge et d'allocation des ressources en matière de brûlures graves [33]

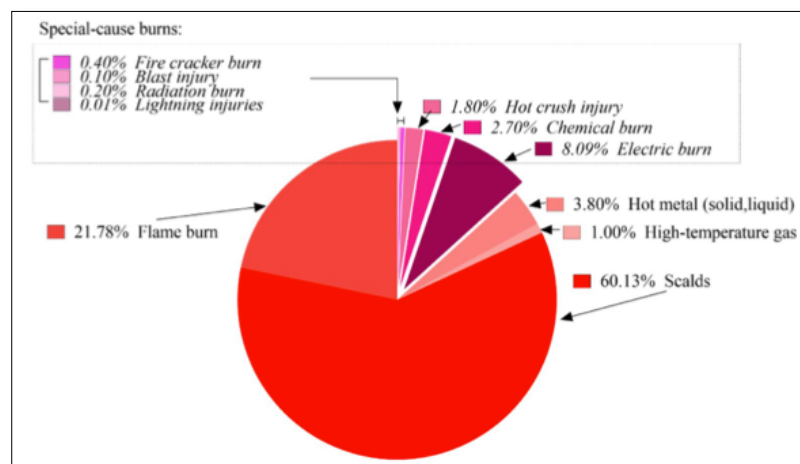


FIGURE II-2 : LA PROPORTION DES DIFFERENTES CAUSES DE BRULURES [33]

Les avancées récentes en matière de modélisation des brûlures se sont concentrées sur la compréhension de la dynamique des lésions cutanées causées par des déversements de liquides chauds sur les vêtements. L'étude menée par Torgrim Log en 2017 constitue une avancée notable en intégrant des paramètres tels que la température du liquide, l'épaisseur du textile et le délai d'élimination du vêtement imbibé, afin d'évaluer l'évolution des lésions thermiques. En résolvant numériquement l'équation bio-thermique de Pennes, l'auteur analyse le transfert de chaleur à travers un tissu humide en contact direct avec la peau, en tenant compte du métabolisme et de la perfusion sanguine. L'étude démontre que, lors d'un déversement d'eau à 85 °C, le tissu mouillé atteint une température de 80,9 °C, provoquant une rapide élévation thermique de la couche basale de l'épiderme, entraînant un développement du dommage thermique essentiellement dans les cinq premières secondes suivant l'exposition. Le calcul du damage integral  $\Omega$  montre que sans retrait du tissu, la valeur atteint 0,973, correspondant à une brûlure superficielle de second degré. Toutefois, le retrait du tissu au bout de 2,5 secondes réduit  $\Omega$  à 0,475, passant ainsi à une simple brûlure superficielle. L'impact du refroidissement immédiat à l'eau tempérée reste marginal par rapport au simple retrait du vêtement, comme le confirment les comparaisons entre les courbes de la température de la couche basale et du développement du dommage thermique. [34]

Dans cette étude Bensalem et les autres analysent le comportement thermique des vêtements de protection des pompiers lors d'une exposition à des températures élevées, en modélisant le transfert de chaleur à travers les différentes couches de la tenue et de la peau à l'aide d'un modèle unidimensionnel sous MATLAB. Ce modèle intègre la conduction, la convection et le rayonnement pour prédire l'évolution de la température. Les résultats montrent une chute significative de température de 188 °C au niveau du tissu extérieur à 44 °C près de la peau comme le montre la figure II-3, confirmant une bonne isolation. Dans la Figure II-4, l'évolution de la température sur 30 minutes montre que les couches de peau atteignent l'équilibre thermique, tandis que les couches de tissu n'y parviennent pas. La figure II-5 compare la modélisation de la peau en trois couches distinctes par rapport à une couche équivalente, prouvant que le modèle détaillé donne des résultats plus précis. L'étude montre également comment la conductivité thermique affecte la température de la peau : lorsque la conductivité des première et deuxième couches de la peau augmente, la température de toutes les couches de la peau diminue. L'effet est plus

perceptible dans les couches plus fines, en raison de la façon dont la chaleur se propage sur différentes épaisseurs. [35]

De plus, La figure II-6 montre qu'une augmentation de la température métabolique causés par l'activité physique, influencent la température de la peau. Enfin, la Figure II-7 illustre l'impact de l'évacuation de la chaleur par évaporation de la sueur. Les auteurs démontrent que permettre l'évaporation avec des flux de chaleur de 9,16 W et 15,27 W réduit considérablement la température de la peau d'environ 0,5 °C à 1 °C, ce qui peut contribuer à réduire le risque de stress thermique. Ces résultats soulignent l'importance d'une modélisation thermique détaillée et le rôle de divers facteurs physiologiques et matériels dans l'amélioration de la sécurité des pompiers. [35]

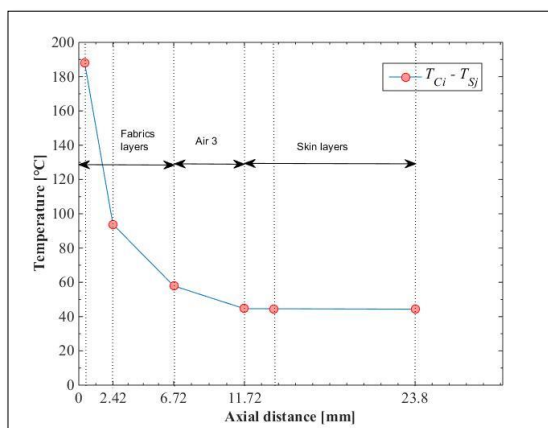


FIGURE II-3 : EVOLUTION STATIONNAIRE DE LA TEMPERATURE A TRAVERS L'ASSEMBLAGE TISSUS-PEAU. [35]

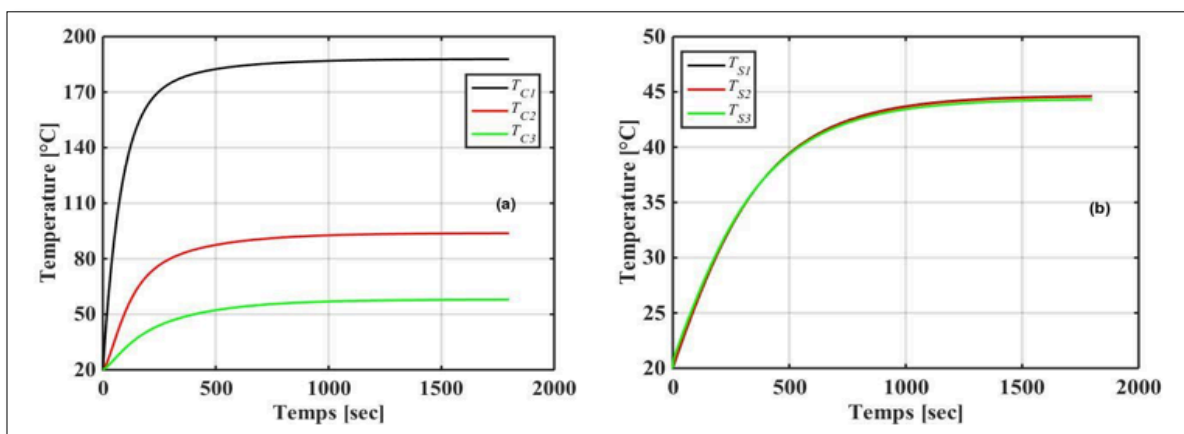


FIGURE II-4 : EVOLUTION DE LA TEMPERATURE AU COURS DE TEMPS SUR (A) LES TISSUS MULTICOUCHE (B) LES COUCHES DE PEAU [35]



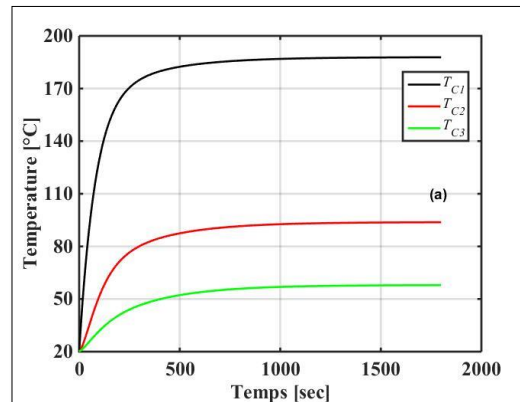


FIGURE II-5 : EVOLUTION DE LA TEMPERATURE AU COURS DU TEMPS SUR LES TISSUS MULTICOUCHES ET LA COUCHE DE PEAU [35]

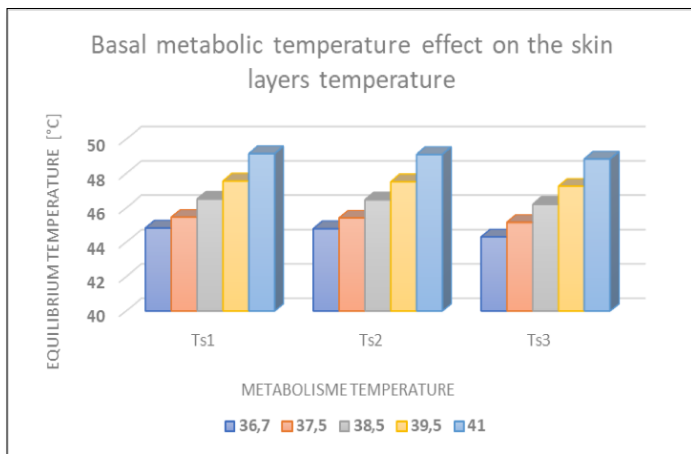


FIGURE II-6 : EFFET DE LA TEMPERATURE METABOLIQUE BASALE SUR LA TEMPERATURE DES COUCHES CUTANÉES. [35]

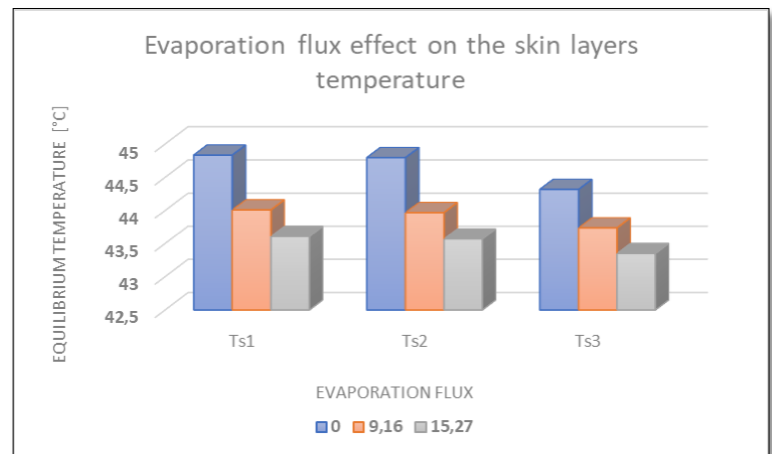


FIGURE II-7 : EFFET DU FLUX D'EVAPORATION SUR LA TEMPERATURE DES COUCHES CUTANÉES. [35]

Collin et les auteurs étudient le transfert de chaleur à travers les vêtements de protection des pompiers, notamment les vestes, lors d'une exposition au feu. Il présente un modèle numérique détaillé simulant le transfert de chaleur d'une source d'incendie vers le corps du pompier, en tenant compte de la structure multicouche de la veste et de la régulation thermique du corps humain (Figure II-8). L'étude explore l'influence de différentes configurations vestimentaires sur la température cutanée et le risque de brûlure. L'objectif principal est de déterminer les durées d'exposition maximales avant l'apparition de brûlures à différents degrés sous des flux de chaleur spécifiques. [36]

Les résultats présentés dans cet article mettent en évidence l'efficacité des vestes de protection des pompiers pour réduire le transfert de chaleur vers le corps lors d'une exposition au feu. La Figure II-9-a montre les profils de température en régime stationnaire du corps dans trois configurations : sans vêtements (Cas 1), avec un maillot de corps en coton (tricot)(Cas 2) et avec la veste de pompier complète(Cas 3). Exposée uniquement à l'air ambiant à 20 °C, la température de surface de la peau est d'environ 32 °C en raison de la thermorégulation naturelle du corps, et elle augmente légèrement avec le port de vêtements de protection. Cependant, la Figure II-9-b montre qu'exposée à un flux de chaleur de 2,3 kW/m², la veste de protection limite significativement l'augmentation de la température à la surface de la peau, la maintenant autour de 47 °C, contre 65 °C pour le corps non protégé. [36]

Cette différence est cruciale pour l'évaluation des risques de brûlure. À l'aide du modèle de prédiction des brûlures de Henriques et Moritz, la Figure II-10 montre l'évolution de la température à l'interface entre l'épiderme et le derme au fil du temps. Il montre qu'une brûlure au premier degré survient presque immédiatement sur une peau non protégée, après environ 7 minutes avec un tricot, et après 21 minutes avec la veste. Le Tableau II-2 résume les durées d'exposition maximales avant chaque degré de brûlure sous un flux de 2,3 kW/m², montrant comment la veste prolonge considérablement le temps d'exposition sans danger. De plus, le Tableau II-3 montre comment le temps jusqu'aux brûlures au deuxième degré diminue fortement à mesure que le flux thermique augmente, passant de 3273 secondes à 2,3 kW/m² à seulement 8 secondes à 8,4 kW/m². Ces résultats démontrent que si les vestes de pompier actuelles sont efficaces dans des conditions modérées, leur protection diminue rapidement en cas d'exposition intense au feu. [36]

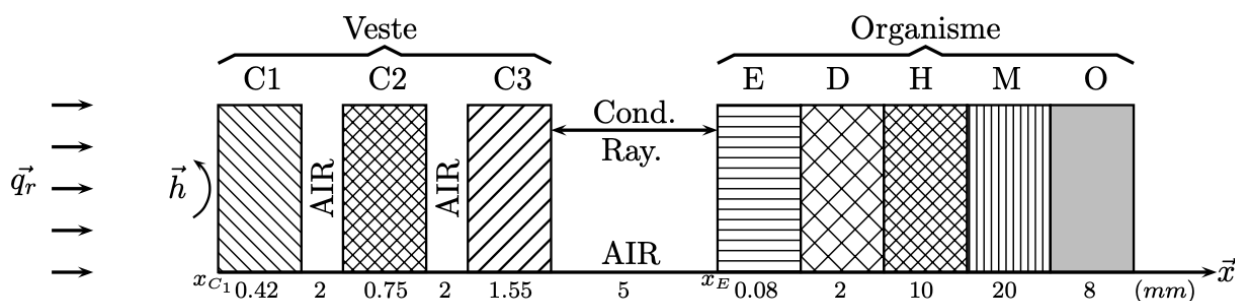


FIGURE II-8 : SCHÉMA DE PRINCIPE CAS 3 [36]

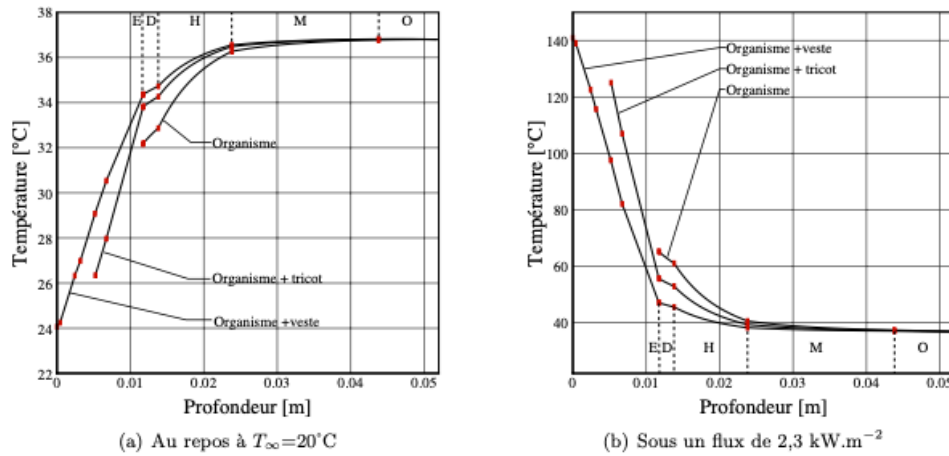


FIGURE II-9 : CHAMPS DE TEMPERATURE OBTENUS EN REGIME PERMANENT [36]

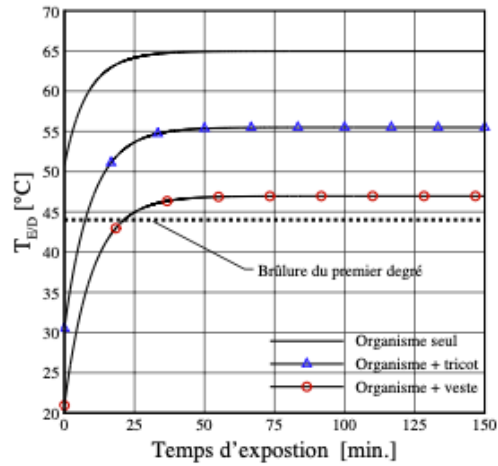


FIGURE II-10 : ÉVOLUTION DE  $T_{E/D}$  POUR  $2,3 \text{ KW.m}^{-2}$  [36]

Table II-2: Durées maximales d'exposition [s] avant brulure sous un flux de  $2,3 \text{ kW.m}^{-2}$ . [36]

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

Table II-3: Durées maximales d'exposition [s] avant obtention d'une brulure du second degré pour différentes densités de flux reçues [36]

Densité de flux [kW.m <sup>-2</sup> ]	2.3	6.3	7	8.4	10
Brulure du 2nd degré	3273	280	175	8	0

En 2020 Salim Dahamni, et ses collaborateurs, réalisent une analyse thermique des vêtements de protection des pompiers à l'aide d'un modèle numérique unidimensionnel. Leur objectif est de simuler et de comprendre comment la chaleur se transmet à travers la structure multicouche du vêtement et affecte la peau du pompier lors d'une exposition au feu. L'étude utilise un modèle numérique unidimensionnel simulant les couches du vêtement et de la peau, prenant en compte différents modes de transfert thermique, tels que la conduction, la convection et le rayonnement. En implémentant ce modèle dans COMSOL Multiphysics, les auteurs analysent la distribution de la température entre les différentes couches de tissu et la peau, examinant ainsi l'influence des propriétés du tissu et des conditions extérieures sur l'isolation thermique. [37]

Les résultats présentés dans cet article soulignent l'efficacité des vêtements de protection des pompiers en matière d'isolation thermique et l'influence des propriétés du tissu sur la sécurité cutanée. La Figure II-11 présente le profil de température à travers les couches du vêtement en conditions stables, mettant en évidence une baisse significative de la température de la surface extérieure (~126 °C) vers la peau (~60 °C). Cela confirme que la majeure partie de la chaleur est absorbée ou rejetée par les couches de tissu extérieures et intermédiaires, en particulier dans les lames d'air qui jouent un rôle crucial dans l'isolation. les auteurs introduisent la Figure II-12, qui présente des expressions polynomiales par morceaux qui approximent la chute de température à travers l'épaisseur du vêtement. Ces expressions montrent que les gradients de température les plus prononcés se produisent dans les zones de lame d'air, démontrant ainsi leur rôle crucial dans l'isolation thermique. [37]

En élargissant l'analyse à la peau, la Figure II-13 compare la distribution de température stationnaire du modèle aux simulations 2D précédentes, révélant une bonne concordance avec

seulement de légères surestimations (environ 4 à 6 %) dans l'épiderme dues à l'utilisation de propriétés cutanées moyennes. L'évolution de la température au fil du temps est illustrée à la Figure II-14, qui suit la température à l'interface épiderme-derme. Les résultats indiquent qu'après environ 25 minutes d'exposition, la peau atteint une température stable inférieure au seuil de brûlure de 44 °C, ce qui suggère la capacité du modèle à prédire la durée d'exposition sans danger. Enfin, la Figure II-15 illustre l'influence des variations de température ambiante et environnementale sur le profil thermique du vêtement. Elle montre que des températures extérieures plus élevées peuvent réduire le gradient thermique, améliorant légèrement l'isolation, bien que l'étude précise que cela ne tient pas compte des effets du stress thermique. Dans l'ensemble, ces chiffres et résultats soutiennent la conclusion selon laquelle l'optimisation des propriétés thermiques et radiatives des tissus, en particulier des espaces d'air et de l'absorptivité de la couche extérieure, peut améliorer considérablement la sécurité des pompiers. [37]

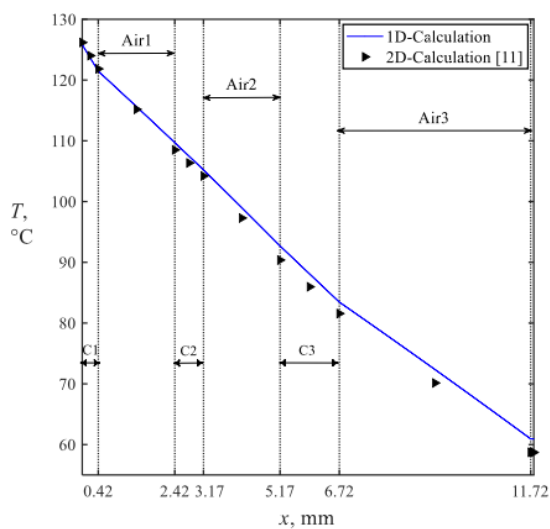


FIGURE II-11 : PROFIL DE TEMPÉRATURE À TRAVERS L'ÉPAISSEUR DE VÊTEMENT [37]

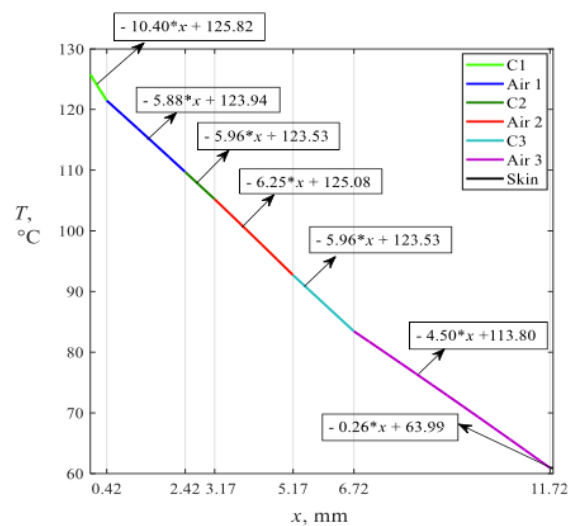


FIGURE II-12 : POLYNÔMES PAR MORCEAUX POUR LA TEMPÉRATURE SUR L'ÉPAISSEUR DU VÊTEMENT [37]

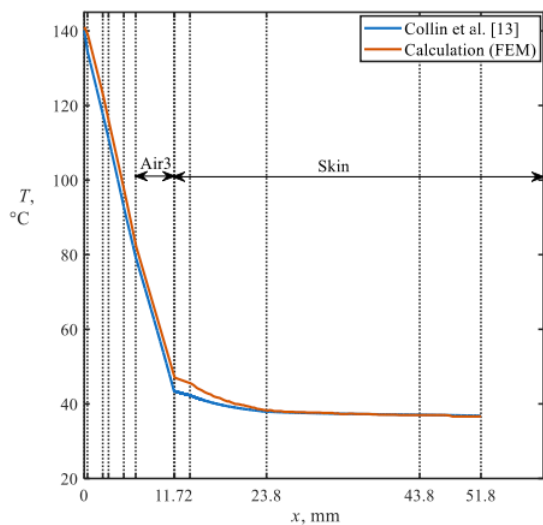


FIGURE II-13 : DISTRIBUTION STATIONNAIRE DE LA TEMPERATURE [37]

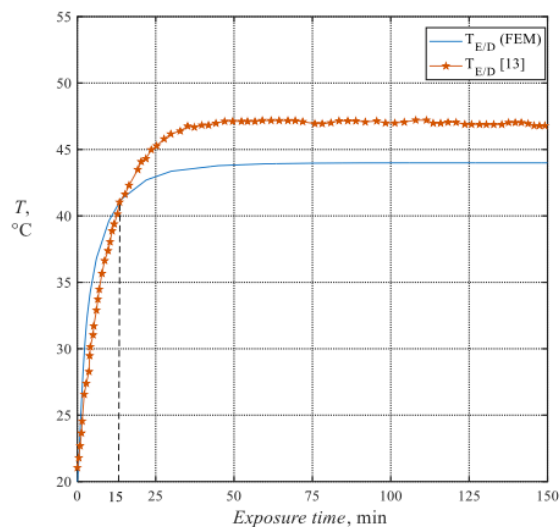


FIGURE II-14 : ÉVOLUTION DE LA TEMPERATURE A L'INTERFACE EPIDERME-DERME [37]

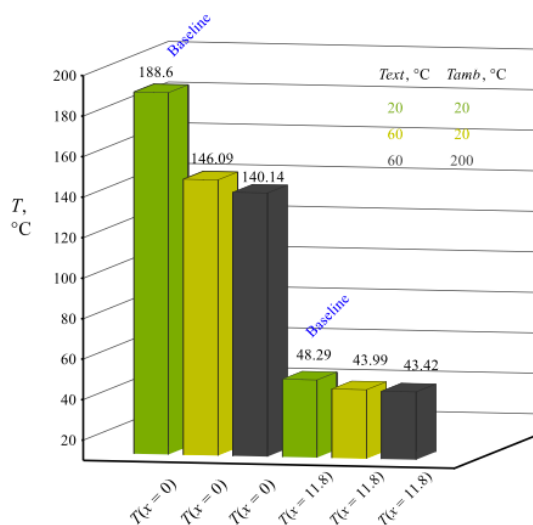


FIGURE II-15 : HISTOGRAMME DU NIVEAU DE TEMPERATURE (TE/D, TC1) POUR PLUSIEURS CONDITIONS AMBIANTES [37]

Dans son mémoire, Rahmani (2021) analyse l'impact de la couche d'air emprisonnée entre le vêtement et la peau sur la performance thermique, en tenant compte de la conductivité thermique, de l'épaisseur du tissu et de l'intensité du rayonnement incident. Son étude repose sur

des modélisations numériques par éléments finis sous ANSYS, validées par des essais expérimentaux. À travers une modélisation par éléments finis (Figure II-16), combinant tissu protecteur, couche d'air et peau humaine, il a été observé que l'augmentation de l'épaisseur de la couche d'air retardait significativement l'apparition des brûlures du premier ( $t_1$ ) et du second degré ( $t_2$ ), jusqu'à une certaine limite critique au-delà de laquelle la convection naturelle commençait à réduire l'efficacité thermique. [38]

Les résultats numériques validés expérimentalement montrent que la température maximale au niveau de la peau (basale et derme) augmente rapidement sous une exposition thermique intense. De plus, la prédiction des brûlures de différents degrés a été réalisée à l'aide du modèle d'intégrale de Henriques, où le temps d'apparition des brûlures est finement calculé. L'analyse paramétrique révèle que, sous une exposition de  $80 \text{ kW/m}^2$  pendant 20 secondes, les tissus en Kevlar/PBI surpassent ceux en Nomex en termes de performance thermique, en raison de leur conductivité thermique plus faible à haute température (Figure II-17). Le temps d'apparition de la brûlure du troisième degré ( $t_3$ ) est également comparé pour les deux types de tissus en Figure II-18, mettant en évidence une protection supérieure pour le Kevlar/PBI. [38]

Enfin, Rahmani propose une nouvelle méthode de prédiction du temps nécessaire pour atteindre les différents degrés de brûlure, en affinant les coefficients du modèle de blessure thermique, comme indiqué dans Table II-4. Ce travail fournit ainsi des bases solides pour l'optimisation future des vêtements de protection, en intégrant systématiquement l'effet de la couche d'air, souvent négligé dans les recherches antérieures. [38]

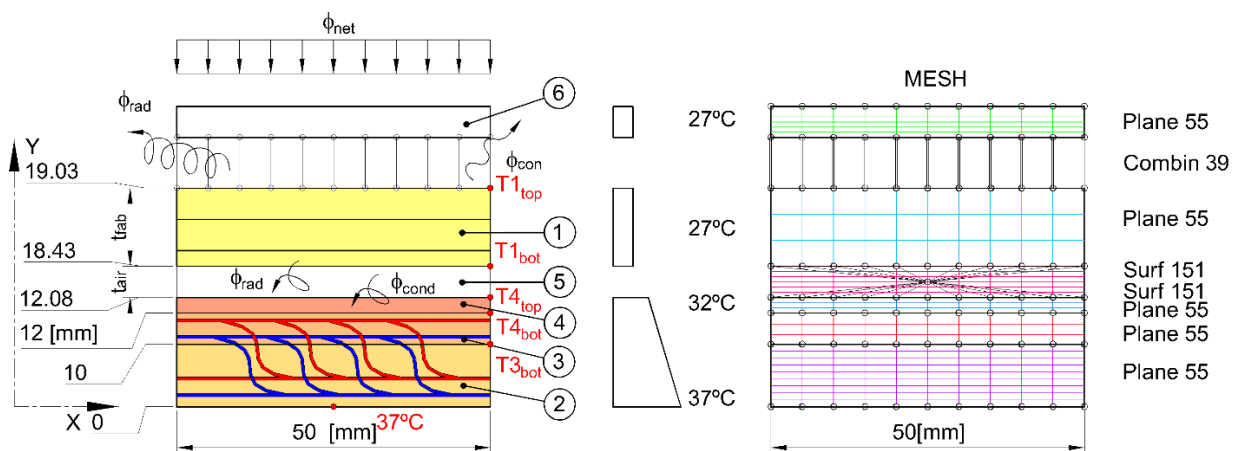


FIGURE II-16 :MODELE BIDIMENSIONNEL DE VETEMENT-PEAU (A GAUCHE) ET MAILLAGE PAR ELEMENTS FINIS (A DROITE).[38]

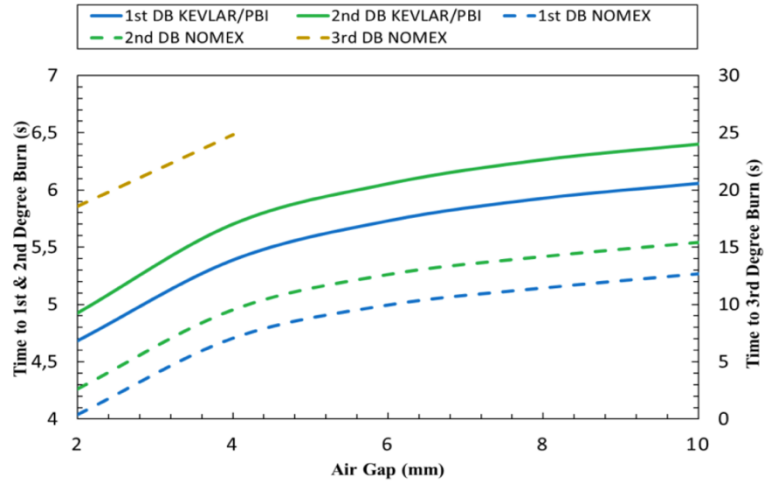


FIGURE II-17 : COMPARAISON DES PERFORMANCES ENTRE KEVLAR/PBI ET NOMEX 10S D'EXPOSITION À LA CHALEUR RADIANTE DE 80 KW/M2. ).[38]

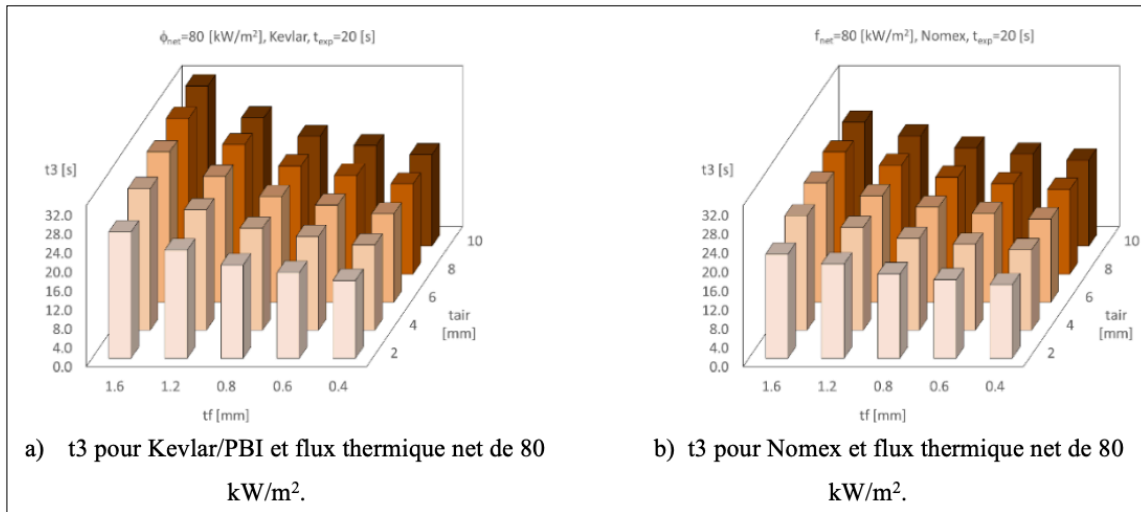


FIGURE II-18 : PRÉDICTIONS DE BRÛLURES CUTANÉES (T3) POUR LA PROTECTION KEVLAR/PBI ET NOMEX. [38]

Table II-4: Nouveaux coefficients proposés pour la prédiction des brûlures cutanées. ).[38]

Material	Kevlar /PBI					Nomex				
Time	A	B	C	D	SSR	A	B	C	D	SSR
t1	5.63	0.08	0.14	1.2	1	3.49	0.06	0.14	1.89	1
t2	5.83	0.10	0.13	1.30	1	3.66	0.07	0.14	2.0	1
t3	7.97	0.11	0.42	13.10	11	5.23	0.24	0.15	13.32	4



La conception des vêtements de protection pour les pompiers implique un compromis délicat entre deux exigences contradictoires : la protection thermique et la réduction du stress thermique. L'article de Jin et al en 2018, proposent une méthode d'évaluation innovante basée sur deux indices de performance globale (TP\_sum) et (TP\_product) combinant les performances de protection thermique (P-TP), mesurées via l'indice TTI, et celles de dissipation thermique (P-AHS), évaluées à partir du rapport  $THL/(d \times w)$ , où THL est la perte totale de chaleur, d l'épaisseur et w le poids surfacique du matériau. proposent une méthode d'évaluation innovante basée sur deux indices de performance globale TP\_sum et TP\_product combinant les performances de protection thermique (P-TP), mesurées via l'indice TTI, et celles de dissipation thermique (P-AHS), évaluées à partir du rapport  $THL/(d \times w)$ , où THL est la perte totale de chaleur, d l'épaisseur et w le poids surfacique du matériau. Contrairement aux approches antérieures qui traitaient ces paramètres séparément, cette méthode facilite la sélection du matériau optimal en tenant compte de la sécurité contre les brûlures ainsi que du confort physiologique du porteur. [39]

Les résultats montrent que l'assemblage B présente la meilleure performance globale, avec un bon compromis entre protection thermique ( $TTI = 1132 \text{ J/m}^2$ ) et confort physiologique ( $THL = 266,2 \text{ W/m}^2$ ), comme l'illustre la Figure II-19, qui représente graphiquement les indices TP\_product sous forme de surfaces rectangulaires. La Figure II-20, quant à elle, montre la hiérarchisation des échantillons selon l'indice TP\_sum, et confirme que l'échantillon B surpasse les autres en conditions pondérées réalistes (poids 7 % pour la protection, 93 % pour le confort). Enfin, la Figure II-21 établit une forte corrélation linéaire ( $R^2 = 0,98$ ) entre les deux indices proposés, renforçant la validité du modèle. Cette étude met en évidence la nécessité de réviser les normes actuelles, telles que l'ISO 11999-3:2015, en intégrant des approches multicritères permettant une évaluation plus réaliste et fonctionnelle des matériaux destinés aux interventions à haut risque thermique [39]

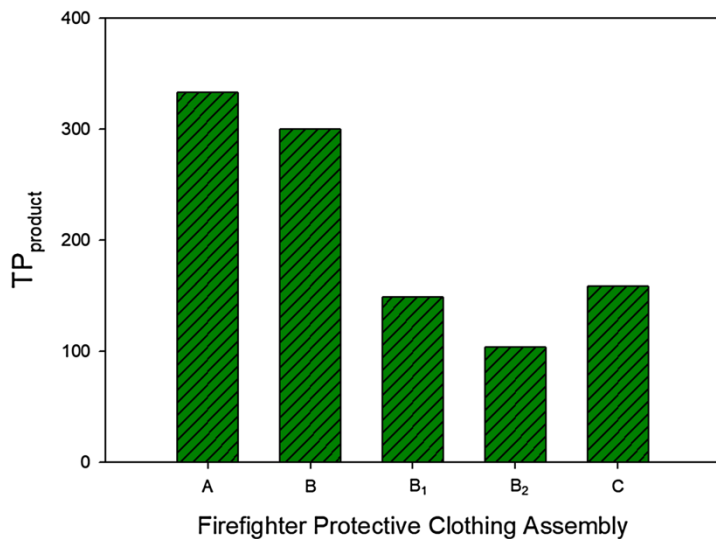


FIGURE II-19 : VALEURS  $TP_{PRODUCT}$  POUR LES ENSEMBLES DE VÊTEMENTS DE PROTECTION DES POMPIERS. [39]

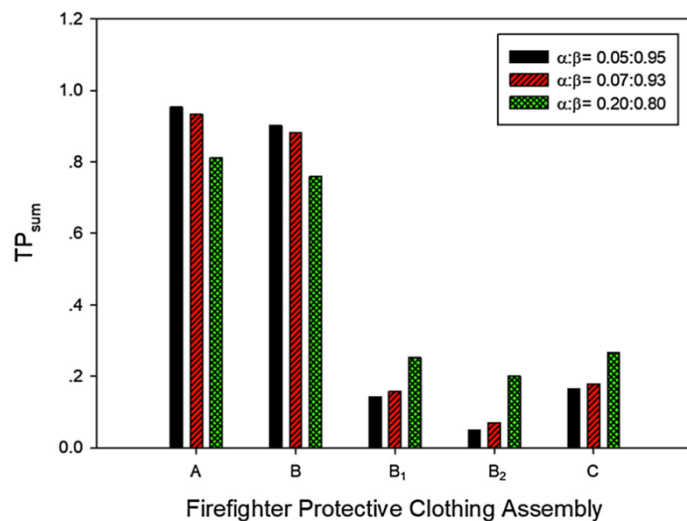


FIGURE II-20 : VALEURS  $TP_{SUM}$  POUR LES ENSEMBLES DE VÊTEMENTS DE PROTECTION DES POMPIERS À DIFFÉRENTES VALEURS DE PONDÉRATION. [39]

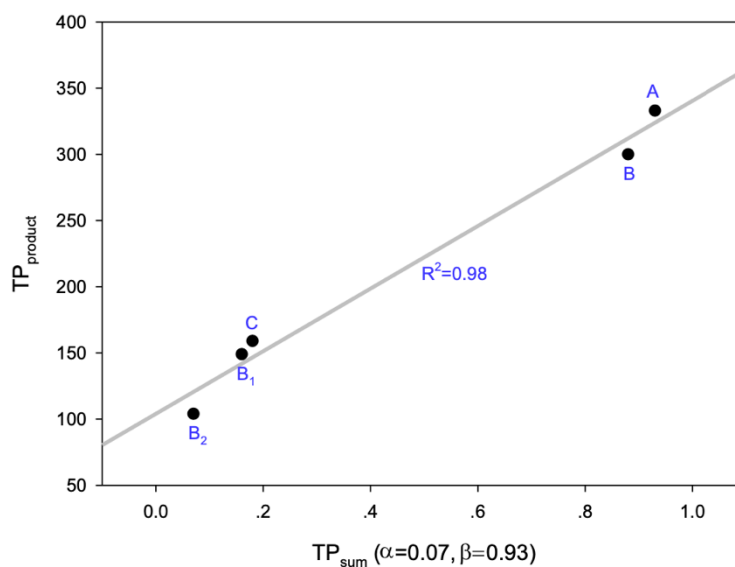


FIGURE II-21 : RELATION ENTRE  $TP_{PRODUIT}$  ET  $TP_{SUM}$  ( $A = 0.07$  ET  $B = 0.93$ ) POUR CINQ ENSEMBLES DE VÊTEMENTS DE PROTECTION POUR POMPIERS. [39]

Dans leur étude publiée en 2025, Susan S. Xu et al. ont conduit une modélisation tridimensionnelle du transfert de chaleur et d'humidité visant à évaluer l'amélioration des performances thermiques des gants de sapeurs-pompiers par l'intégration de matériaux à changement de phase. L'intégration segmentée de ces matériaux, conçue pour éviter les articulations digitales et ainsi préserver les fonctions motrices de la main, a permis de retarder

significativement l'atteinte du seuil de brûlure au second degré (60 °C), avec une augmentation du temps de protection d'un facteur compris entre 1,5 et 2 par rapport aux gants conventionnels. [40] Les résultats obtenus indiquent une amélioration significative de la protection thermique : les zones de la main recouvertes de matériau à changement de phase voient leur temps d'atteinte de la température critique de brûlure du second degré (60 °C) étendu de plus du double par rapport aux gants classiques, tandis que les zones non couvertes bénéficient également d'une protection prolongée. Les simulations révèlent que la température à la surface externe du gant est réduite de 50 à 100 °C selon la condition thermique, attestant de l'effet isolant global du matériau à changement de phase. les meilleurs résultats sont obtenus avec un matériau à changement de phase ayant un point de fusion de 100 °C, une épaisseur de 1 mm, et une position optimisée selon le type d'exposition (proche de la main pour les scénarios de type flashover, proche de l'extérieur pour les expositions modérées). Ces résultats confirment l'intérêt d'une conception thermorégulée des gants de protection, capable de prolonger de manière substantielle le temps de tolérance cutanée face à des flux thermiques extrêmes, tout en maintenant les capacités fonctionnelles indispensables en intervention. [40]

L'étude de Zhang et al. (2024), issue d'une analyse systématique de 106 publications, met en lumière les principaux déterminants des brûlures cutanées chez les pompiers. mettent en évidence trois facteurs clés influençant ces brûlures : la source de chaleur (flux thermique, type), les vêtements de protection (matériaux, structure, conception) et la couche d'air sous le vêtement (épaisseur, caractéristiques dynamiques). L'un des facteurs les plus critiques est l'intensité du flux thermique. Par exemple, sous un feu flash standardisé à 84 kW/m<sup>2</sup> (selon les normes NFPA), les vêtements de protection ne retardent l'apparition de brûlures au second degré que pendant 17,32 secondes. Cette vulnérabilité s'explique par une relation exponentiellement décroissante entre le flux thermique et le temps de protection. Concernant la conception des vêtements, la couche interne joue un rôle prédominant en assurant à elle seule environ 70 % de la protection thermique, surpassant largement la contribution de la couche externe et de la membrane imperméable. L'utilisation de matériaux innovants tels que les aérogels ou les matériaux à changement de phase permettrait d'accroître le temps de protection de 15 à 20 %, selon les données du Tableau II-5. L'efficacité thermique est également influencée par l'épaisseur de la couche d'air présente entre la peau et le tissu : une épaisseur de 6 mm semble optimale, car au-delà, la convection naturelle

diminue l'isolation. De plus, certaines zones d'ouverture du vêtement, comme le col ou les poignets, présentent des points critiques où la température interne dépasse les 44 °C en 30 % moins de temps, augmentant ainsi le risque de brûlure localisée. Du point de vue de la modélisation, le couplage des modèles de Pennes et d'Henriques présente une erreur moyenne de 12 % par rapport aux données expérimentales, tandis que les tests réalisés sur mannequins montrent une forte corrélation ( $r = 0,91$ ) avec les modèles de dynamique des fluides (CFD) pour des flux supérieurs à 20 kW/m<sup>2</sup>. L'ensemble de ces résultats plaide en faveur d'une approche intégrée, combinant l'optimisation des textiles (épaisseur, perméabilité), le contrôle dynamique de la couche d'air via des capteurs intelligents, et l'adaptation des modèles prédictifs aux conditions réelles, notamment les mouvements du pompier.[41]

Table II-5 : Classification des niveaux d'exposition thermique [41]

Condition	Flux de chaleur (kW/m <sup>2</sup> )	Température de l'air (°C)
Routine	0.42–1.26	10–60
Dangereux	1.26–8.37	60–300
Urgence	8.37–125.6	300–1000

L'étude expérimentale menée par Collin et al en 2013 fournit des résultats clés sur le comportement thermique des tenues de sapeurs-pompiers. Les analyses spectrales (Figure II-22, Figure II-23) révèlent que ces vestes absorbent en moyenne 80 % du flux radiatif incident, avec des différences notables selon leur couleur et leur méthode de teinture. Par exemple, la veste orange présente une réflectivité supérieure, tandis que la teinture en surface (veste bleue 1) améliore la protection par rapport à une teinture dans la masse (veste bleue 2). Les mesures de conductivité thermique (Figure II-24), confirment que ces matériaux multicouches sont d'excellents isolants ( $\approx 0,04$  W/m/K), une propriété renforcée par la présence de couches d'air entre les textiles. Enfin, les valeurs de capacité calorifique (Tableau II-6), bien que soumises à certaines incertitudes expérimentales, s'établissent autour de 1200 J/kg/K. Ces résultats, obtenus via des protocoles rigoureux (spectrométrie, plaque chaude, calorimétrie), soulignent l'importance d'optimiser à la fois les propriétés radiatives (réflectivité) et conductives pour améliorer la sécurité des pompiers. Les travaux antérieurs de Quintière (1974) sur les textiles ignifugés trouvent ici un

prolongement actualisé, tout en identifiant des pistes pour de futures recherches, notamment sur la modélisation fine des transferts thermiques en conditions réelles. [42]

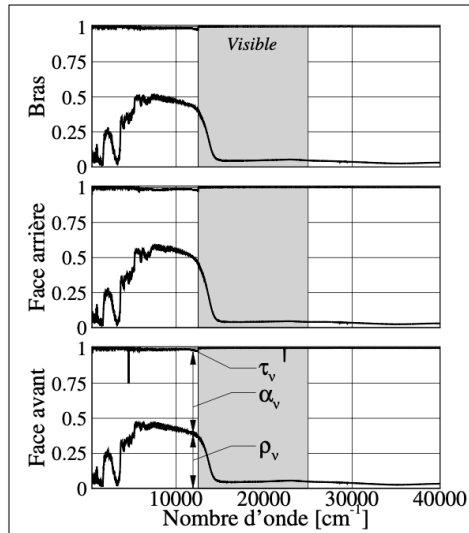


FIGURE II-22 : ÉCHANTILLONS DE LA VESTE BLEUE 1 [42]

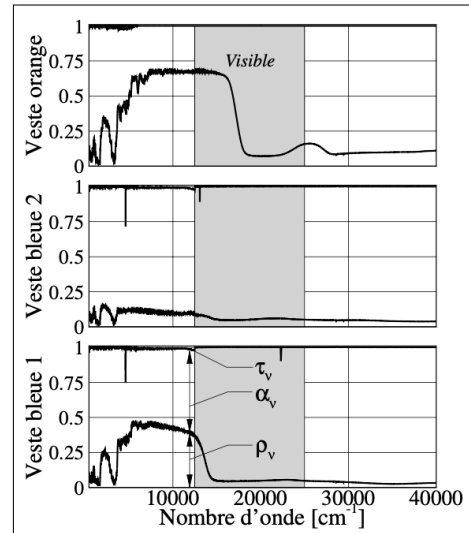


FIGURE II-23 : COMPARAISON DE DIFFÉRENTES VESTES [42]

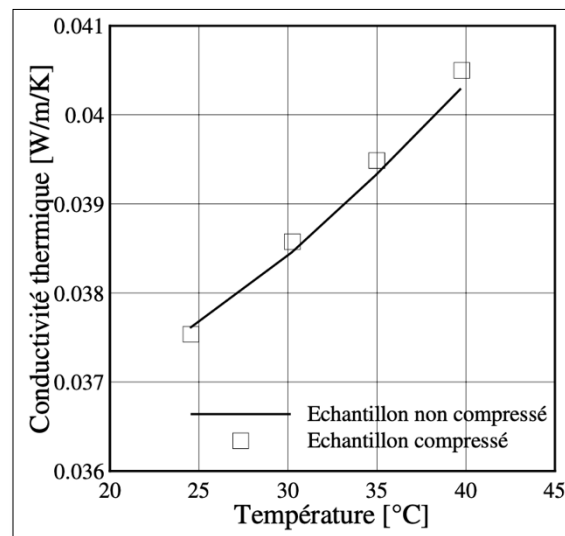


FIGURE II-24 : ÉVOLUTION DE LA CONDUCTIVITE THERMIQUE DE LA VESTE BLEUE 1 [42]

Table II-6: Mesure calorimétrique et comparaison avec la méthode du tri-couche [42]

Échantillons Couche :	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$c_p$ (J/kg/K)	Écart (%)
extérieure	605	1187,5	1,3
milieu	212	1296,2	30
intérieure	112	1219,1	19

En 2018, Dahamni et Benarous présentent des résultats détaillés démontrant le transfert de chaleur à travers les couches protectrices d'une combinaison de pompier. Le courbe de température (Figure II-25) et le profil de température sur l'épaisseur de la combinaison (Figure II-26) montrent une baisse significative de la surface externe ( $\sim 126$  °C) à la première couche de peau ( $\sim 58,73$  °C), soulignant la forte résistance thermique offerte par la combinaison tissu-air. Les auteurs observent que la couche d'air adjacente au tissu extérieur (C1) joue un rôle crucial dans la réduction du flux thermique, comme le montre un gradient de température prononcé. En analysant l'effet de l'absorptivité du tissu (Figure II-27), ils constatent qu'une augmentation de l'absorptivité de la couche extérieure du tissu a une influence minime sur la température de la peau (+0,65 %), ce qui suggère une bonne protection contre la chaleur radiative. Cependant, la figure II-28 révèle qu'une diminution de 50 % du coefficient de transfert thermique convectif entre C1 et l'air ambiant entraîne une augmentation significative ( $\sim 10$  %) de la température cutanée, dépassant potentiellement les limites de sécurité. [43]

De plus, la figure II-29 montre qu'une augmentation de la convection entre la peau et l'intérieur du corps (simulant le stress ou la transpiration) diminue la température cutanée d'environ 9,5 %, améliorant ainsi le confort. Dans la figure II-30, les auteurs testent l'effet du port d'un maille intérieure fine pour réduire l'absorptivité cutanée, ce qui ne diminue que légèrement la température dans le modèle à trois couches ( $\sim 1,4$  %), mais montre un impact plus important dans le modèle à deux couches proposé dans la figure II-31. Dans cette conception simplifiée, la température cutanée augmente de 9,2 % par rapport à la configuration à trois couches initiale (figure II-32). Cependant, comme le montre la Figure II-33, l'application d'une réduction de 50 % de l'absorptivité cutanée dans le modèle à deux couches peut ramener la température à un seuil tolérable de  $\sim 60$

°C. Ces résultats soulignent l'importance du choix des matériaux et des propriétés thermiques, en particulier la convection et le rayonnement, pour concevoir des tenues de pompier plus efficaces et plus confortables. [43]

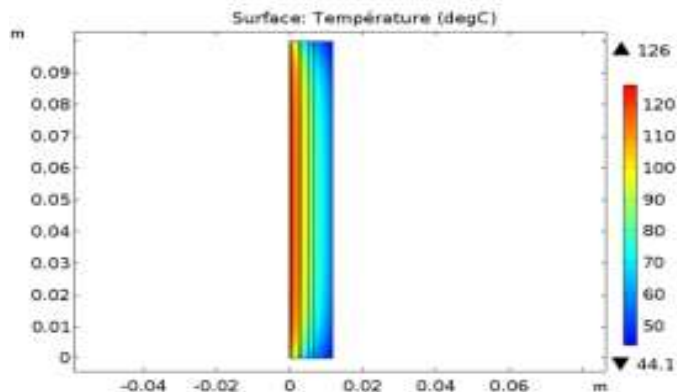


FIGURE II-25 : CONTOUR SPATIAL DE LA TEMPÉRATURE. [43]

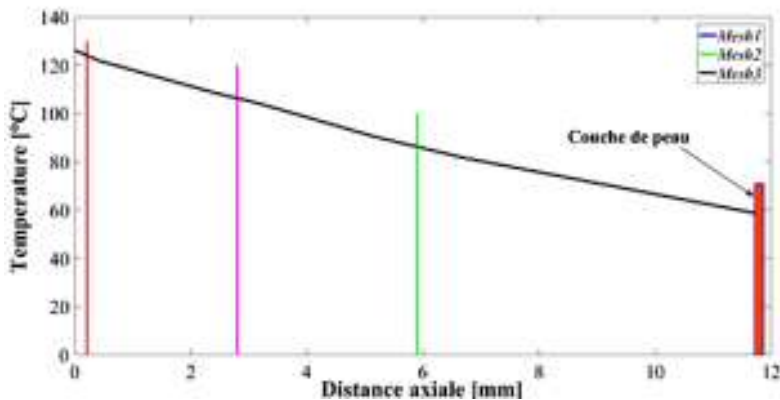


FIGURE II-26 : PROFIL DE TEMPÉRATURE À TRAVERS L'ÉPAISSEUR DE LA TENUE. [43]

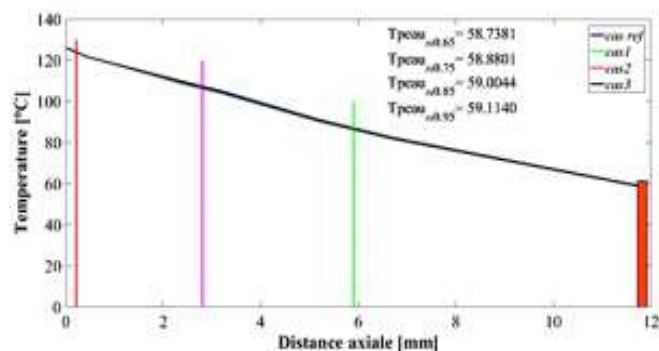


FIGURE II-27 : PROFILS DE TEMPÉRATURE POUR DIFFÉRENTS PARAMÈTRES RADIATIFS (C1). [43]

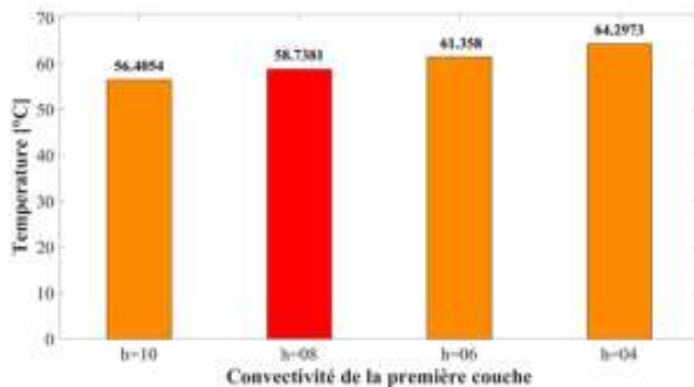


FIGURE II-28 : TEMPÉRATURE EN PREMIÈRE COUCHE DE PEAU POUR DIVERSES VALEURS DE H (C1-AIR). [43]

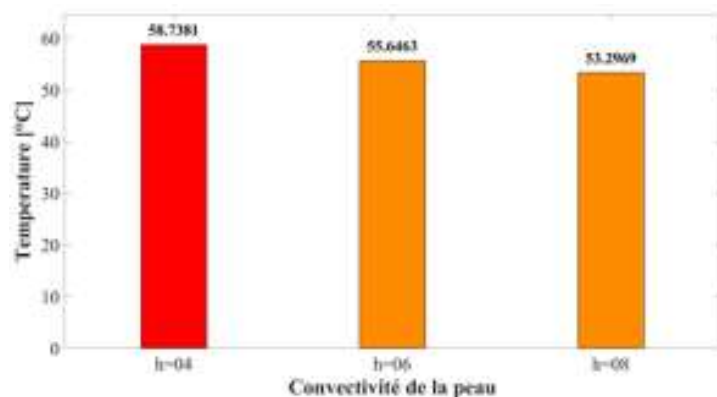


FIGURE II-29 : TEMPÉRATURE DE LA PEAU POUR DIVERSES VALEURS DE  $H_{PEAU}$  [43]

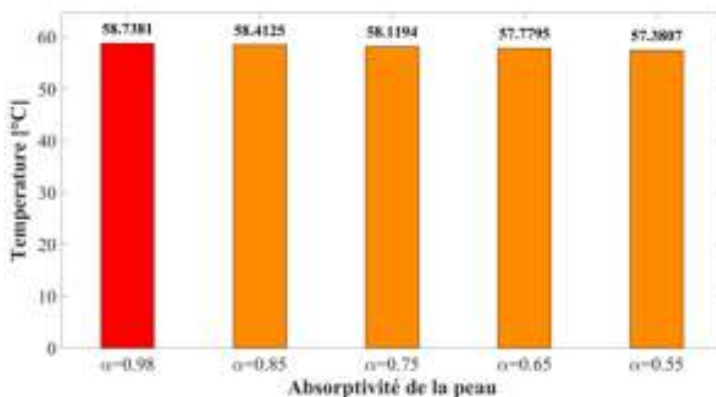


FIGURE II-30 : TEMPÉRATURE DE PEAU POUR DIVERSES VALEURS DE  $A_{PEAU}$  [43]

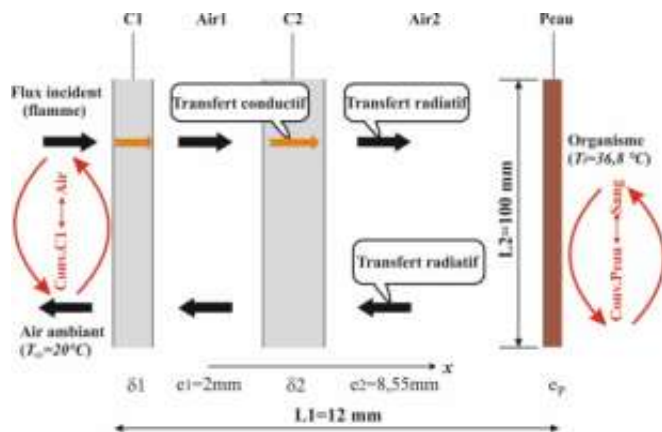


FIGURE II-31 : LE MODÈLE PROPOSÉ POUR LA TENUE BICOUCHES. [43]

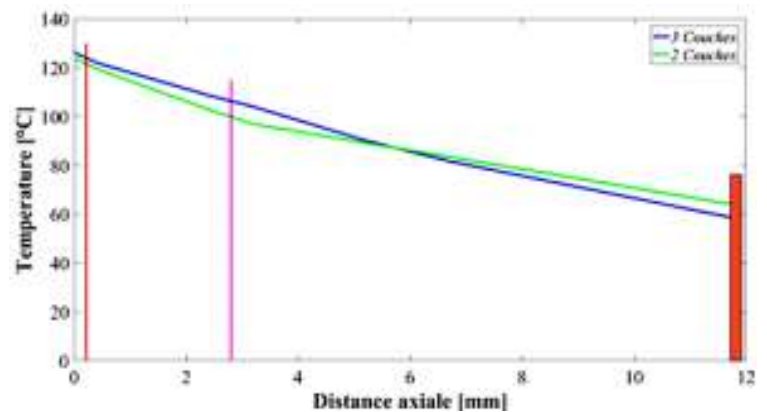


FIGURE II-32 : ÉVOLUTION DE LA TEMPÉRATURE DANS LE MODÈLE DE TENUE BICOUCHES. [43]

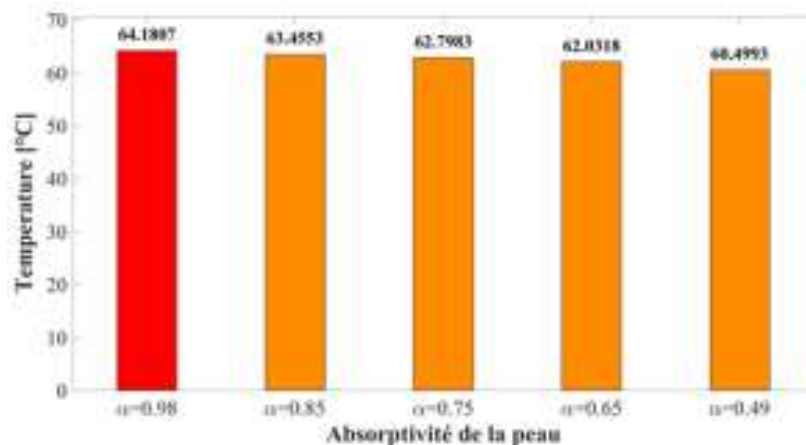


FIGURE II-33 : TEMPÉRATURE DE PEAU POUR DIVERSES VALEURS DE L'ABSORPTIVITÉ (MODÈLE BICOUCHES).[43]

### 3. LES EXPEIENCES

DAHAMNI Salim Dans son étude expérimentale, les chercheurs ont utilisé un montage conforme à la norme EN ISO 6942 pour tester les performances thermiques des tissus destinés aux tenues de sapeurs-pompiers. Ce montage, illustré dans la (Figure II-34), permet d'exposer des échantillons de tissu à un flux de chaleur radiante contrôlé, en vue de mesurer leur comportement face à une source thermique intense. Les essais ont été réalisés en collaboration avec l'Institut Polytechnique de Bragança au Portugal, ce qui a permis d'avoir accès à un laboratoire spécialisé. Parmi les équipements utilisés, on trouve notamment le mannequin Henry, un dispositif



instrumenté avec des capteurs de température et de flux thermique (Figure II-35), placé dans une chambre de combustion pour reproduire des conditions réelles d'exposition au feu. Les propriétés thermophysiques des tissus testés (comme la conductivité thermique et la résistance à la vapeur d'eau) ont été analysées à l'aide de spécimens normalisés, dont les résultats sont présentés dans le Tableau II-7. Ce matériel permet de simuler les conditions extrêmes que les pompiers rencontrent sur le terrain, et d'évaluer la capacité des tenues à protéger efficacement contre les brûlures, tout en tenant compte du confort thermique du porteur. [5]

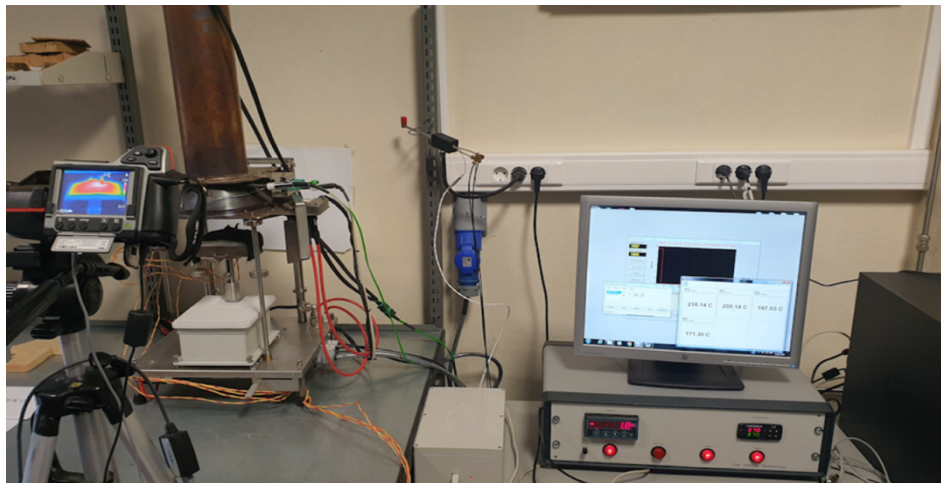


FIGURE II-34 : MONTAGE EXPÉRIMENTAL UTILISÉ POUR TESTER LES PERFORMANCES DE PROTECTION RADIANTE DU TISSU (STANDARD EN ISO 6942). [5]

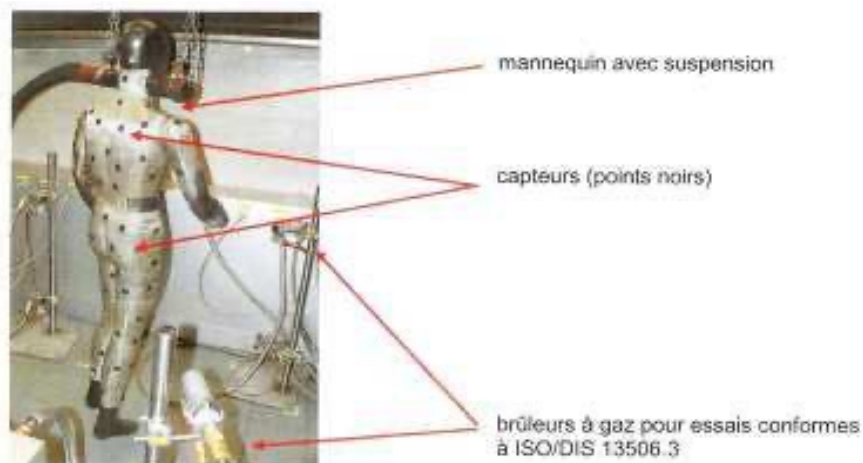


FIGURE II-35 : HENRY, MANNEQUIN AVEC CAPTEURS DE TEMPÉRATURE ET DE FLUX THERMIQUE DANS LA CHAMBRE DE COMBUSTION [5]

Table II-7: Tests des spécimens et principaux résultats (IPB-Portugal) [5]

Assemblage Id	Densité de Flux [kW/m <sup>2</sup> ]	t <sub>12</sub> [s]	t <sub>24</sub> [s]	t <sub>24</sub> - t <sub>12</sub> [s]	Q <sub>c</sub> [kW/m <sup>2</sup> ]	TF <sub>(Q0)</sub> [%]
01	5	39,3	81,9	42,0	1,57	31,6
02	5	63,4	101,1	37,7	1,75	35,2
03	5	64,2	101,8	37,6	1,76	35,3
01	20	15,9	28,4	12,5	5,31	26,6
02	20	16,0	25,4	9,4	7,08	35,4
03	20	29,3	38,5	9,2	7,23	36,1

Dans le cadre de l'étude expérimentale de Francis Jacques sur les équipements de protection individuelle des sapeurs-pompiers, un matériel scientifique et technique particulièrement avancé a été mobilisé pour évaluer les performances thermiques et physiologiques des tenues. Le mannequin thermique articulé SAM (Specific Anthropomorphic Mannequin) a joué un rôle central dans les tests de résistance thermique et d'évaporation. Ce dispositif, représenté en Figure II-36, est capable de simuler la transpiration humaine grâce à 125 buses réparties sur sa surface, et est chauffé à une température constante de 34 °C. Revêtu d'une couche hydrophile comme illustré en Figure II-37, il permet de mesurer de façon réaliste le comportement thermique des vêtements lors de l'exposition à des conditions extrêmes. [27]

Pour les simulations de flash thermique, les chercheurs ont utilisé un second mannequin, le Thermo-manmd, conçu pour résister à des températures extrêmes allant jusqu'à 1000 °C. Doté de 122 capteurs répartis sur tout le corps, il permet une cartographie précise des zones brûlées après exposition à un embrasement éclair. [27]

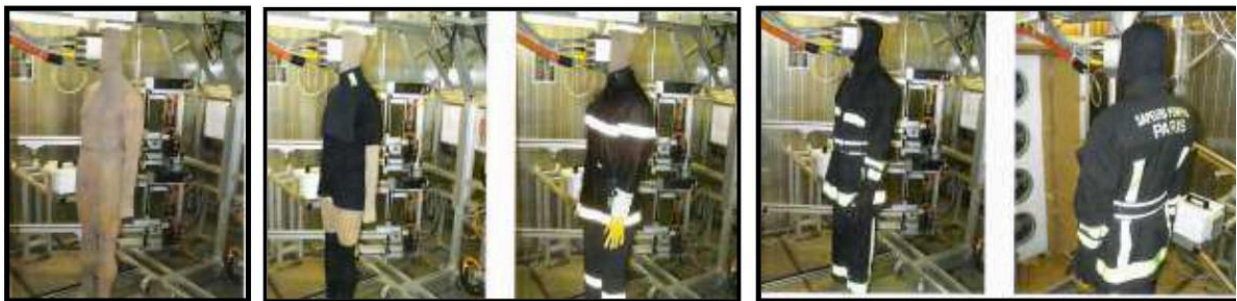
Par ailleurs, différents équipements de protection ont été testés, notamment l'équipement E1 l'E2Co. Ces tenues sont présentées dans la Figure II-38, avec la comparaison visuelle entre les trois ensembles sur mannequin. [27]

Les propriétés physiques des textiles ont également été mesurées à l'aide d'un perméabilimètre à l'air FX 3300 qui permet d'évaluer la capacité des tissus à laisser passer l'air. Une centrale d'enregistrement couplée à un logiciel DaqBook 200 a servi à collecter les données issues des capteurs thermiques installés sur les mannequins (Figure II-39). Enfin, une caméra infrarouge

FLIR Thermovision A40M (Figure II-40) a permis de suivre en temps réel l'évolution des températures en surface lors des essais. [27]



*FIGURE II-36 : SAM, MANNEQUIN ARTICULÉ THERMIQUE [27]*



*FIGURE II-37 : MANNEQUIN SAM, REVÊTU D'UNE COUCHE HYDROPHILE [27]*



*FIGURE II-38 : TENUE DE BASE (À GAUCHE), EQUIPEMENT E1 (AU CENTRE), EQUIPEMENT E2CO SUR MANNEQUIN (À DROITE) [27]*

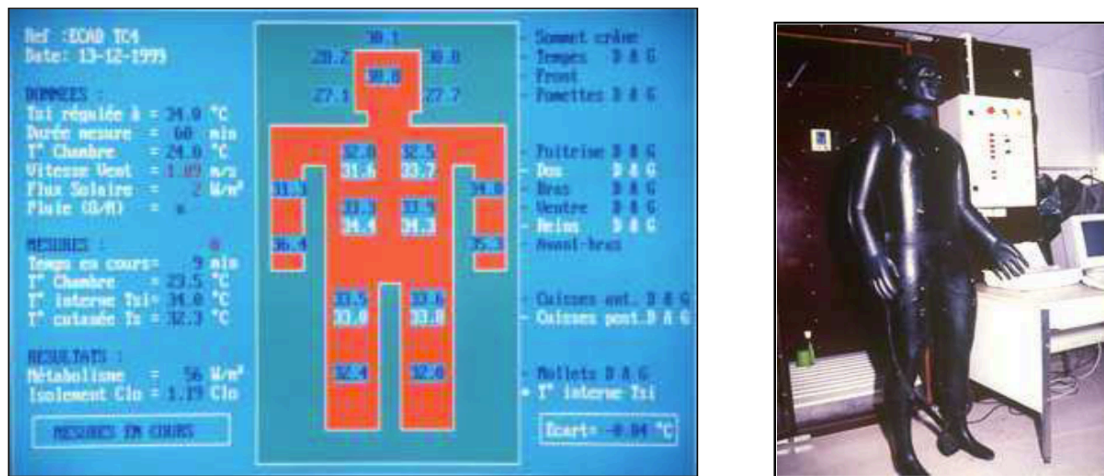


FIGURE II-39 : CENTRALE D'ENREGISTREMENT ET MANNEQUIN INSTRUMENTÉ [27]



FIGURE II-40 : TEMPÉRATURES MESURÉES AVEC LA CAMÉRA THERMOGRAPHIQUE [27]

#### **4. CONCLUSION**

Ce chapitre consacré à l'état de l'art a permis de situer notre problématique dans son contexte scientifique et technique, en mettant en évidence les contributions majeures et les approches développées jusqu'à présent. L'analyse critique de la littérature a révélé des pistes prometteuses, mais également des limites qui justifient pleinement l'intérêt de notre démarche de recherche. En synthétisant les travaux existants, ce chapitre constitue une assise théorique solide sur laquelle repose notre étude, tout en orientant nos choix méthodologiques pour la suite du mémoire.

# CHAPITRE III



### **III. CHAPITRE 3 : EQUATIONS DES BILANS THERMIQUES ET LOGICIEL DE CALCUL**

#### **1. INTRODUCTION**

Le confort thermique et la sécurité des intervenants exposés à des environnements à haute température, tels que les sapeurs-pompiers, exigent une compréhension approfondie des phénomènes de transfert de chaleur à travers les matériaux constituant leurs équipements. Dans ce contexte, le présent chapitre est consacré à l'étude des bilans thermiques dans un système multicouche représentant un vêtement de protection thermique en interaction avec la peau humaine. Cette analyse repose sur les trois modes fondamentaux de transfert thermique conduction, convection et rayonnement, dont la combinaison influence fortement la performance thermique globale du système étudié.

Nous présentons dans un premier cas les équations régissant ces mécanismes, en intégrant les coefficients spécifiques et les grandeurs adimensionnelles permettant de caractériser les conditions d'échange thermique. Ensuite, nous détaillons plusieurs configurations géométriques simulées, représentant différents cas d'exposition thermique, avant d'établir les équations bilancielle pour chaque couche du système (vêtements et peau). Enfin, nous introduisons le logiciel COMSOL Multiphysics, utilisé pour la modélisation numérique des scénarios thermiques, en exposant son fonctionnement, ses possibilités de couplage multi-physiques, ainsi que les étapes méthodologiques permettant de construire un modèle cohérent et réaliste.

## 2. EQUATIONS DES BILANS THERMIQUES

Trois processus physiques interviennent dans le transfert de chaleur entre deux corps lorsque ceux-ci ne sont pas en équilibre thermique (c'est-à-dire lorsqu'ils présentent des températures différentes) : la conduction, la convection et le rayonnement [44] (Figure III-1).

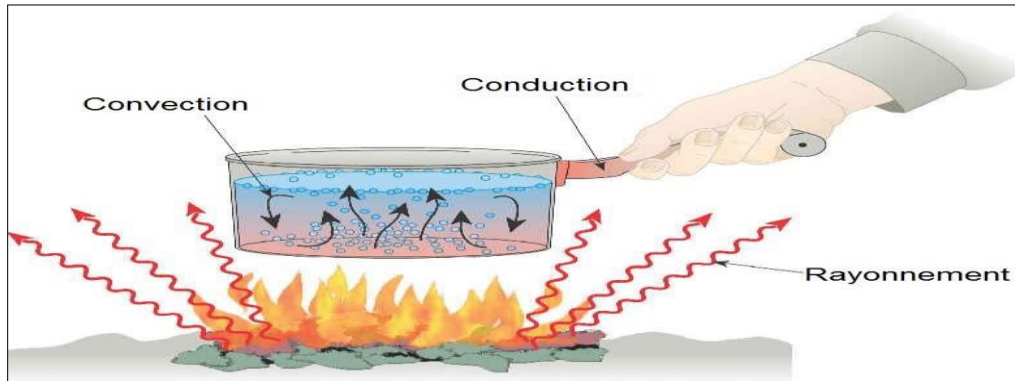


FIGURE III-1 : LES TROIS MODES DE TRANSFERT DE CHALEUR [44] .

### 2.1 La conduction

La conduction est le processus par lequel la chaleur se propage par contact direct entre les particules d'un matériau ou entre des matériaux possédant des niveaux d'énergie différents (donc des températures différentes), en raison du mouvement des particules élémentaires. Le flux thermique par conduction qui traverse un élément dépend de sa forme, de son épaisseur, de la nature du matériau et de la différence de température à travers cet élément. Ce transfert de chaleur est provoqué par la différence de température entre deux zones d'un même milieu en contact physique, sans déplacement significatif des atomes ou des molécules [45] (Figure III-2).

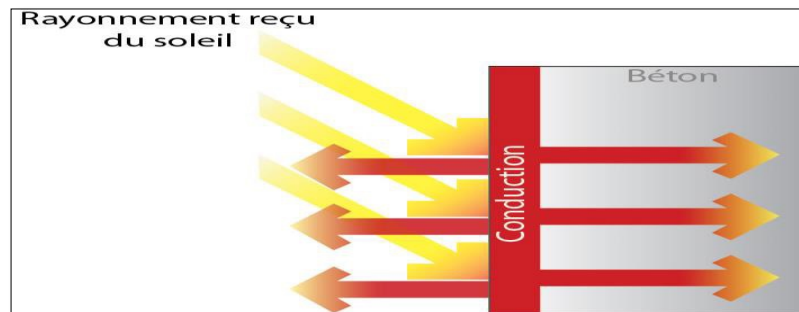


FIGURE III-2 : TRANSFERT DE CHALEUR PAR CONDUCTION [46] .



### ❖ La loi de Fourier

En 1822, Joseph Fourier a formulé expérimentalement une loi qui lie le flux de chaleur traversant une surface par unité de temps à la différence de température des deux côtés de cette surface. L'équation (III.1) illustre mathématiquement la relation entre ce flux thermique et la variation de température au niveau de la surface.

$$\phi = \frac{dQ}{dt} = \lambda S \frac{dt}{dx} \quad (III.1)$$

Avec

$\Phi$  : Flux thermique (W).

Q : Energie (J).

$\lambda$  : Conductivité thermique ( $W.m^{-1} .K^{-1}$  ). Les coefficients de conductivité sont des propriétés physiques intrinsèques des matériaux.

S : surface perpendiculaire au flux thermique ( $m^2$ ).

T : Température (K).

### 2.2 La convection

La convection désigne un phénomène de transfert de chaleur où l'énergie thermique est transférée d'une surface solide à un fluide (ou gaz) en mouvement. Ce processus comporte deux éléments :

- Le transfert d'énergie dû à un mouvement moléculaire aléatoire (diffusion).
- Le transfert d'énergie par un mouvement macroscopique ou global du fluide (advection).

Le coefficient de transfert thermique par convection (h) varie en fonction du mouvement du fluide, de la forme géométrique et des propriétés physiques et thermodynamiques du système (figure III-3). [47]

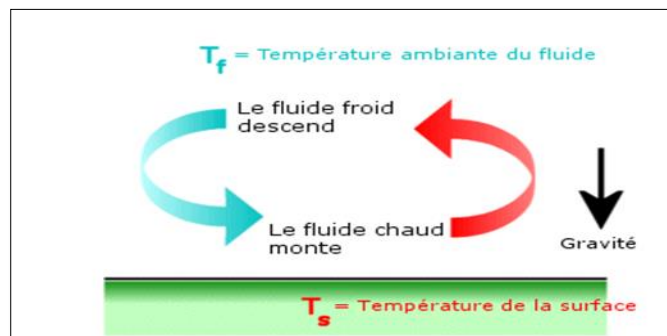


FIGURE III-3 : TRANSFERT THERMIQUE PAR CONVECTION D'UNE PLAQUE PLANE. [48]

En principe, il existe deux modes de transfert thermique par convection :

**a. La convection libre ou naturelle :**

Le fluide se déplace le long de la surface solide en raison des forces provoquées par les variations de densité du fluide, elles-mêmes engendrées par la différence de température entre le solide et le fluide. Lorsqu'une plaque chaude est plongée dans un fluide froid, les particules de fluide situées au contact de la plaque augmentent leur température, ce qui diminue leur densité et les fait monter (figure III-4).

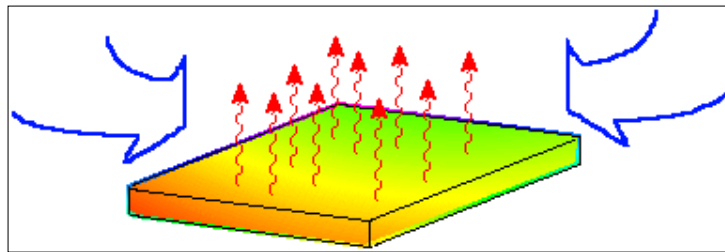


FIGURE III-4 : CONVECTION NATURELLE D'UNE PLAQUE CHAUDE [48]

**b. La convection forcée :**

Pour augmenter la vitesse de déplacement du fluide à la surface d'un solide, on utilise un dispositif externe comme un ventilateur ou une pompe. Cette accélération du mouvement des particules fluides le long de la surface solide permet d'atteindre un gradient de température élevé, ce qui optimise le transfert de chaleur. Dans la figure suivante, l'air est dirigé de manière forcée au-dessus d'une plaque chaude (figure III-5). [48]

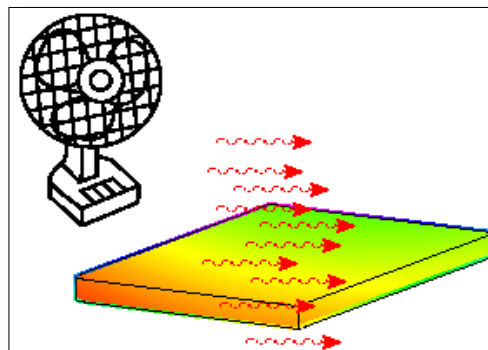


FIGURE III-5 : CONVECTION FORCÉE D'UNE PLAQUE CHAUDE [48]

La loi de Newton représentée par l'équation III.2 introduit la relation entre le flux échangé entre la surface et le fluide et la surface d'échange :

$$\phi = hS(T_p - T_s) \quad (\text{III.2})$$

Avec

$\Phi$  : Flux thermique (W).

$h$  : Le coefficient de convection (W.K-1.m-2).

$S$  : La surface de contact solide/fluide(m2).

$T_p$  : La température de paroi (K).

$T_f$  : la température du fluide loin de la surface du solide (K).

❖ **Les nombre adimensionnels** [49]

Le coefficient de transfert de chaleur par convection ( $h$ ) dépend de la nature du fluide, de sa température, de sa vitesse ainsi que des propriétés géométriques de la surface de contact solide/fluid. En appliquant le théorème de Vaschy-Buckingham, il est possible d'exprimer le coefficient de convection ( $h$ ) en fonction de 5 nombres sans dimension (unités adimensionnels).

**Le nombre de Nusselt  $Nu$**  : c'est le rapport du flux de chaleur échangé par convection à la quantité de flux de chaleur échangé par conduction à travers le fluide.

$$Nu = \frac{hL}{\lambda} \quad (\text{III.3})$$

Avec

$h$  : Le coefficient de convection (W.K<sup>-1</sup>.m<sup>-2</sup>).

$L$  : Une longueur caractéristique (m).

$\lambda$  : La conductivité thermique (W.m<sup>-1</sup>.K<sup>-1</sup>).

**Le nombre de Reynolds  $Re$**  caractérisant le régime de l'écoulement,  $Re < 2000$  pour les écoulements laminaire et  $Re > 3000$  pour les écoulements turbulents.

$$Re = \frac{\rho VL}{\mu} \quad (\text{III.4})$$

Avec

$\rho$  : La masse volumique du fluide (kg.m<sup>-3</sup>).

$V$  : La vitesse du fluide en (m.s<sup>-1</sup>).

L : Une longueur caractéristique (m).

$\mu$  : La viscosité dynamique du fluide ( $\text{kg.m}^{-1}.\text{s}^{-1}$ ).

**Le nombre de Prandtl Pr** caractérisant les propriétés thermiques du fluide.

$$\text{Pr} = \frac{\mu C_p}{\lambda} \quad (\text{III.5})$$

Avec

$\mu$  : La viscosité dynamique du fluide ( $\text{kg.m}^{-1}.\text{s}^{-1}$ ).

$\lambda$  : La conductivité thermique ( $\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ ).

$C_p$  : la capacité thermique massique ( $\text{J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$ ).

Pour un fluide s'écoulant à l'intérieur d'un tube, le calcul du coefficient de convection h s'effectue en établissant la relation entre trois nombres sans dimension : Nu, Re et Pr, conformément à la formule de Colburn (équation 6).

$$\text{Nu} = 0.023 \text{Re}^{0.8} \text{Pr}^{0.33} \quad (\text{III.6})$$

**Nombre de Grashof(Gr):** Caractérise l'écoulement en convection naturelle (remplace le nombre de Reynolds, pour le régime de l'écoulement)

$$\text{Gr} = \frac{g\beta D^3 \Delta T}{\nu^2} \quad (\text{III.7})$$

$\beta$ : Coefficient de dilatation thermique [ $\text{K}^{-1}$ ]

$\Delta T$ : Différence de température fluide-paroi

**Nombre de Rayleigh (Ra) :** Caractérise aussi le type de l'écoulement en convection naturelle (remplace Re)

$$\text{Ra} = \text{Pr} . \text{Gr} \Rightarrow \text{Ra} = \frac{g\beta D^3 \Delta T}{\nu \alpha} \quad (\text{III.8})$$

### 2.3 Le rayonnement

Le rayonnement thermique est l'émission de rayonnement électromagnétique par un objet chauffé. Ce type de rayonnement peut se déplacer à travers le vide, comme c'est le cas pour la lumière solaire. L'énergie électromagnétique reçue par le système est convertie en énergie thermique (chaleur)[44].

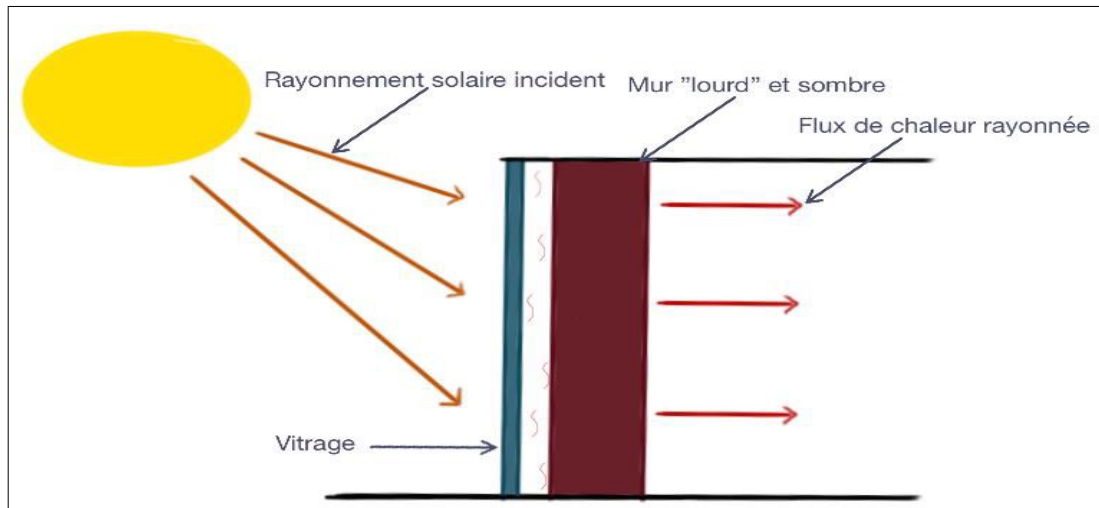


FIGURE III-6 : TRANSFER DE CHALEUR PAR RAYONNEMENT SOLAIRE SUR UN MUR [50].

La relation entre le flux thermique et la température de la paroi :

$$\Phi = \sigma \varepsilon S (T_S^4 - T_a^4) \quad (\text{III.9})$$

Avec

$\Phi$  : Flux thermique (W).

$\sigma$  : Constante de Stéphan Boltzmann  $5,67 \cdot 10^{-8} \text{ (W K}^{-4} \text{ m}^{-2} \text{)}$ .

$\varepsilon$  : Facteur d'émission de la surface.

$S$  : La surface de contact solide/fluide ( $\text{m}^2$ ).

$T_s$  : Température de la surface (K).

$T_a$  : Température du milieu environnant la surface (K)

### 3. SCHEMAS DES ÉTUDES DE CAS

Notre étude utilise deux modèles. Le premier représente le modèle de base du corps et les couches du costume. Le deuxième type est représenté le flux de vapeur de sueur s'élevant de la peau.

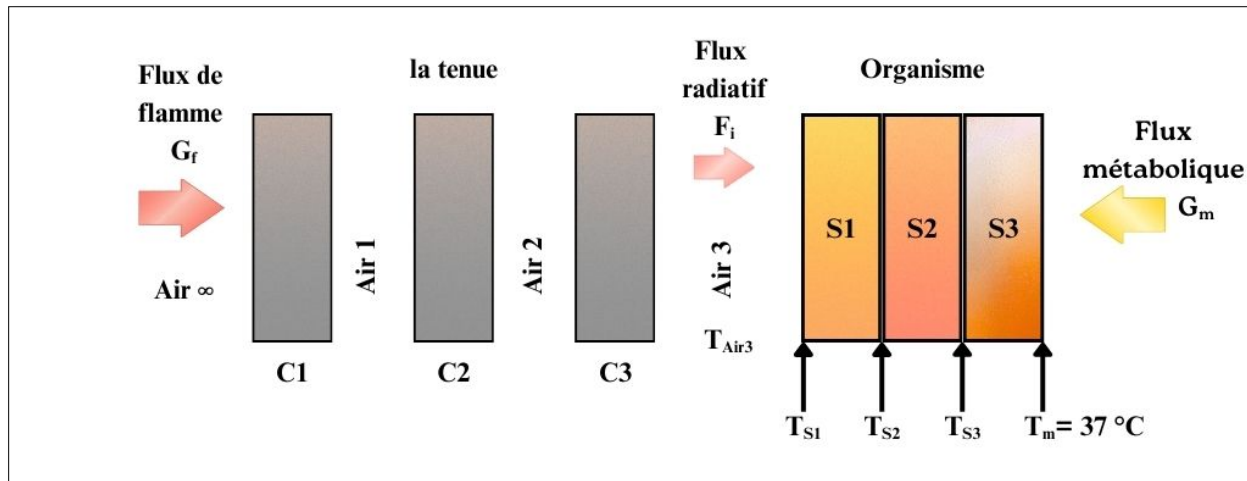


FIGURE III-7 : SCHEMA DE PRINCIPE (CONFIGURATION GÉNÉRIQUE) – CAS 1

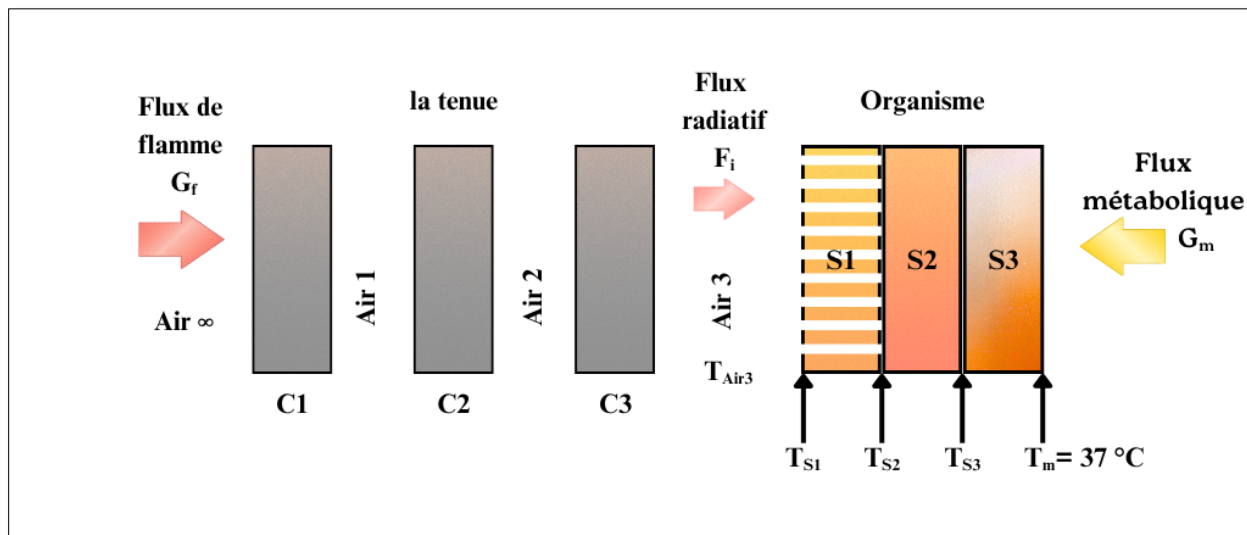


FIGURE III-8 : CONFIGURATION AVANCÉE – CAS 2

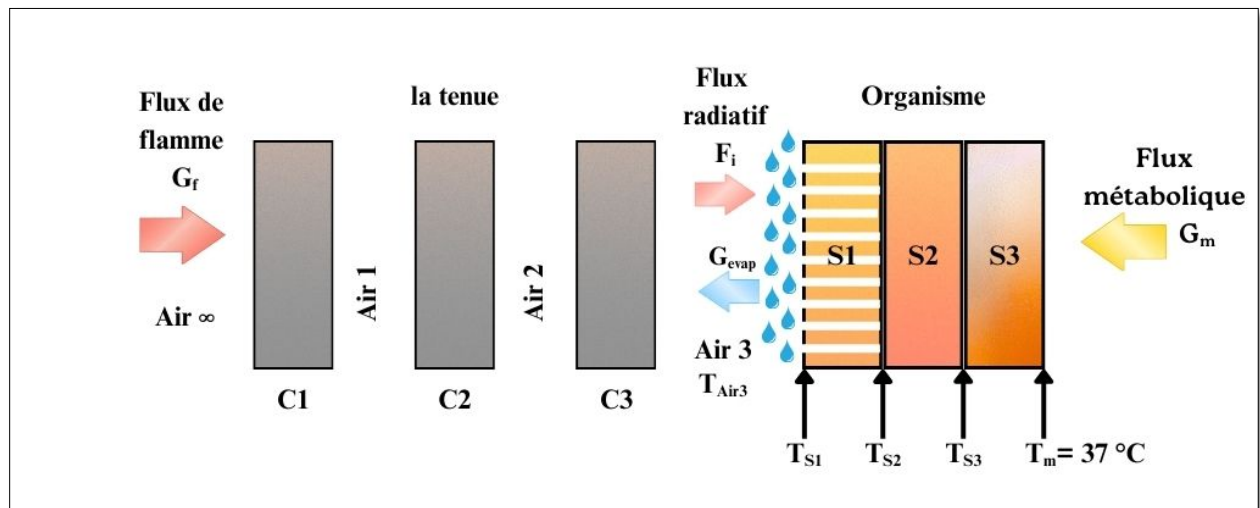


FIGURE III-9 : CONFIGURATION AVANCÉE – CAS 3

- La figure III-7 illustre le processus de transfert de chaleur à travers un vêtement de protection exposé à une flamme, montrant comment les flux thermiques externes affectent le corps humain. Le flux thermique de la flamme  $G_f$  impacte l'environnement extérieur (Air  $\infty$ ), traverse plusieurs couches, dont les couches d'air (Air 1, Air 2) et la tenue de protection, et se poursuit sous forme de flux thermique radiatif  $F_i$  vers le corps. Avant d'atteindre la peau, il traverse une couche d'air interne (Air 3) à une température  $T_{Air3}$ . Le corps humain est modélisé en trois compartiments (S1, S2, S3), chacun ayant des températures correspondantes ( $T_{S1}$ ,  $T_{S2}$ ,  $T_{S3}$ ), finalement équilibrés par le flux thermique métabolique interne  $G_m$  qui maintient une température corporelle stable à 37 °C.
- la figure III-8 illustre les transferts thermiques dans la tenue de sapeur-pompier avec les couches de l'organisme impliquant un milieu poreux (S1). Le schéma met en évidence plusieurs flux, notamment un flux de flamme ( $G_f$ ) et un flux radiatif ( $F_i$ ), qui interagissent avec différentes composantes du système. Ce dernier est également soumis à un flux métabolique ( $G_m$ ), suggérant une interaction entre les processus biologiques et les transferts de chaleur externes.
- La figure III-9 illustre les mécanismes de transfert thermique à travers le vêtement de protection exposés aux flammes, En se concentrant sur le flux d'évaporation  $G_{evap}$ . Lorsque le flux de flamme  $G_f$  et la flux radiatif  $F_i$  atteignent les couches extérieures du vêtement (C1, C2, C3), la chaleur pénètre vers la peau, augmentant la température et provoquant l'évaporation

de la sueur. Le flux d'évaporation  $G_{evap}$ , représenté par des gouttelettes bleues, représente le transfert massique de vapeur d'eau (sueur) de la peau à travers la couche d'air (Air 3) et les couches du vêtement. Ce flux joue un rôle essentiel dans la thermorégulation corporelle et refroidissant la couche S1, limitant ainsi l'élévation de température des tissus plus profonds (S2 et S3)

## 4. BILANS THERMIQUES DANS CHAQUE COUCHE (VÊTEMENT / PEAU)

### 4.1 Bilan thermique en régime instationnaire

En régime instationnaire, le bilan thermique s'écrit :

$$\Phi_{reçu} - \Phi_{perdu} = \frac{d}{dt}(\text{chaleur accumulée}) \quad (\text{III.10})$$

La chaleur accumulée par unité de surface :

$$\frac{d}{dt}(\text{chaleur accumulée}) = \frac{d}{dt}(\rho * cp * T) * \Delta x \quad (\text{III.11})$$

Le bilan instationnaire général :

$$\sum \Phi_{reçus} - \sum \Phi_{perdu} = (\rho_{Ci} * cp_{Ci} * ep_{Ci}) * \frac{dT_{Ci}}{dt} \quad (\text{III.12})$$

$\rho_{Ci}$ : Masse volumique des tissus de la couche Ci/peau

$cp_{Ci}$ : Chaleur spécifique des tissus de la couche Ci/peau

$ep_{Ci}$ : Epaisseur de la couche Ci/peau

$T_{Ci}$ : Température de la couche Ci/peau

### 4.2 Bilans sur la couche de vêtement

#### 4.2.1 Couche C1 (Tissu externe)

❖ Flux reçus :

$$\Phi_{f \rightarrow C1} = \alpha_{C1} * G_f \quad (\text{III.13})$$



❖ **Flux perdus :**

a. Rayonnement C1↔C2 :

$$\Phi_{C1 \rightarrow C2}^{Ray} = \sigma * \varepsilon_{C1C2} (T_{C1}^4 - T_{C2}^4) \quad (III.14)$$

b. Convection C1→C2 :

$$\Phi_{C1 \rightarrow C2}^{Conv} = h_{C1C2} (T_{C1} - T_{C2}) \quad (III.15)$$

c. Rayonnement : Réflexion G<sub>f</sub>

$$\Phi_{C1 \rightarrow flamme} = R_{C1} * G_f \quad (III.16)$$

d. Convection C1→∞ :

$$\Phi_{C1 \rightarrow \infty}^{Conv} = I_{Conv\infty} * h_{C1\infty} (T_{C1} - T_{\infty}) \quad (III.17)$$

e. Rayonnement C1→∞ :

$$\Phi_{C1 \rightarrow \infty}^{Ray} = I_{ray\infty} * \sigma * \varepsilon_{C1} (T_{C1}^4 - T_{\infty}^4) \quad (III.18)$$

f. Conduction C1↔C2 :

$$\begin{cases} \Phi_{C1 \rightarrow C2}^{Cond} = I_{Cond1} * \frac{T_{C1} - T_{C2}}{R_1} \\ R_1 = \frac{ep_{C1}}{\lambda_{air1}} \end{cases} \quad (III.19)$$

❖ **Équation compacte pour C1 :**

En appliquant le bilan I à la couche C1 on aura :

$$\begin{aligned} \alpha_{C1} * G_f - I_{Conv\infty} * h_{C1\infty} (T_{C1} - T_{\infty}) - I_{ray\infty} * \sigma * \varepsilon_{C1} (T_{C1}^4 - T_{\infty}^4) - I_{Cond1} * \frac{T_{C1} - T_{C2}}{R_1} - \sigma \\ * \varepsilon_{C1C2} (T_{C1}^4 - T_{C2}^4) - h_{C1C2} (T_{C1} - T_{C2}) - R_{C1} * G_f = (\rho_{C1} * cp_{C1} * ep_{C1}) * \frac{dT_{C1}}{dt} \end{aligned}$$

En écriture compacte nous aurons :

$$\begin{aligned} \frac{dT_{C1}}{dt} = \left[ \frac{1}{\rho_{C1} * cp_{C1} * ep_{C1}} \right] * \{ (\alpha_{C1} - R_{C1}) * G_f - I_{Conv\infty} * h_{C1\infty} (T_{C1} - T_{\infty}) \\ - I_{ray\infty} * \sigma * \varepsilon_{C1} (T_{C1}^4 - T_{\infty}^4) - \sigma * \varepsilon_{C1C2} (T_{C1}^4 - T_{C2}^4) - \left( \frac{I_{Cond1}}{R_1} + h_{C1} \right) * (T_{C1} - T_{C2}) \} \end{aligned} \quad (III.20)$$

#### 4.2.2 Couche C2 (Tissu intermédiaire)

##### ❖ Flux reçus :

a. Flamme→C2 :

$$\Phi_{f \rightarrow C2} = \alpha_{C2} * \tau_{C1} * G_f \quad (III.21)$$

b. Convection C1→C2 :

$$\Phi_{C1 \rightarrow C2}^{Conv} = h_{C2C1} * (T_{C1} - T_{C2}) \quad (III.22)$$

c. Rayonnement C1→C2 :

$$\Phi_{C1 \rightarrow C2}^{Ray} = \sigma * \varepsilon_{C2C1} * (T_{C1}^4 - T_{C2}^4) \quad (III.23)$$

##### ❖ Flux perdus :

a. Rayonnement C2→C3 :

$$\Phi_{C2 \rightarrow C3}^{Ray} = \sigma * \varepsilon_{C2C3} * (T_{C2}^4 - T_{C3}^4) \quad (III.24)$$

b. Convection C2→C3

$$\Phi_{C2 \rightarrow C3}^{Conv} = h_{C2C3} * (T_{C2} - T_{C3}) \quad (III.25)$$

c. Conduction air2 C2→C3

$$\begin{cases} \Phi_{C2 \rightarrow C3}^{Cond} = \frac{T_{C2} - T_{C3}}{R_2} * I_{Cond2} \\ R_2 = \frac{ep_{C2}}{\lambda_{air2}} \end{cases} \quad (III.26)$$

##### ❖ Équation compacte pour C2 :

En appliquant le bilan I à la couche C 2

$$\frac{dT_{C2}}{dt} = \left[ \frac{1}{\rho_{C2} * cp_{C2} * ep_{C2}} \right] * \{ (\alpha_{C2} * \tau_{C1} * G_f) + h_{C2C1} * (T_{C1} - T_{C2}) + \sigma * \varepsilon_{C2C1} * (T_{C1}^4 - T_{C2}^4) + \sigma * \varepsilon_{C2C3} * (T_{C2}^4 - T_{C3}^4) + \left( h_{C2C3} + \frac{I_{Cond2}}{R_2} \right) * (T_{C3} - T_{C2}) \} \quad (III.27)$$

#### 4.2.3 Couche C3 (Tissu interne)

##### ❖ Flux reçus

a. Flamme→C3

$$\Phi_{f \rightarrow C3} = \alpha_{C3} * (\tau_{C2} * \tau_{C1}) * G_f \quad (III.28)$$

b. Peau  $\rightarrow$  C3

$$\Phi_{P \rightarrow C3} = \alpha_{C3} * G_i \quad (III.29)$$

c. Convection C2  $\rightarrow$  C3

$$\Phi_{C2 \rightarrow C3}^{Conv} = h_{C3C2} * (T_{C2} - T_{C3}) \quad (III.30)$$

d. Rayonnement C2  $\rightarrow$  C3

$$\Phi_{C2 \rightarrow C3}^{Ray} = \sigma * \varepsilon_{C2C3} * (T_{C2}^4 - T_{C3}^4) \quad (III.31)$$

#### ❖ Flux perdus

a. Conduction air3 C3  $\rightarrow$  Peau

$$\begin{cases} \Phi_{C2 \rightarrow C3}^{Cond} = I_{Cond3} * \frac{T_3 - T_p}{R_3} \\ R_3 = \frac{ep_{C3}}{\lambda_{air3}} \end{cases} \quad (III.32)$$

b. Convection C3  $\rightarrow$  Peau

$$\Phi_{C3 \rightarrow P}^{Conv} = h_{C3P} * (T_3 - T_p) \quad (III.33)$$

c. Rayonnement C3  $\rightarrow$  Peau

$$\Phi_{C3 \rightarrow P}^{Ray} = \sigma * \varepsilon_{C3P} * (T_{C3}^4 - T_p^4) \quad (III.34)$$

#### ❖ Équation compacte pour C3 :

$$\frac{dT_{C3}}{dt} = \left[ \frac{1}{\rho_{C3} * cp_{C3} * ep_{C3}} \right] * \{ (\alpha_{C3} * \tau_{C2} * \tau_{C1}) * G_f + \alpha_{C3} * G_i + h_{C3C2} * (T_{C2} - T_{C3}) + \sigma * \varepsilon_{C2C3} * (T_{C2}^4 - T_{C3}^4) - \sigma * \varepsilon_{C3P} * (T_{C3}^4 - T_p^4) - \left( h_{C3P} + \frac{I_{Cond3}}{R_3} \right) * (T_{C3} - T_p) \} \quad (III.35)$$

### 4.3 Bilans sur la couche de peau

#### 4.3.1 Couche S1 (Épiderme)

##### ❖ Flux reçus

- a. Flux Convection : C3→S1

$$\Phi_{C3 \rightarrow S1}^{conv} = h_{S1} * (T_{C3} - T_{S1G}) \quad (III.36)$$

- b. Flux Rayonnement C3 →S1

$$\Phi_{C3 \rightarrow S1}^{ray} = \sigma * \varepsilon_{C3C1} * (T_{C3}^4 - T_{S1G}^4) \quad (III.37)$$

- c. flamme→S1

$$\Phi_{f \rightarrow S1} = \alpha_{S1*} (\tau_{C3} * \tau_{C2} * \tau_{C1}) * G_f \quad (III.38)$$

- d. métabolisme →S1

$$\Phi_{m \rightarrow S1} = \alpha_{S1} * (\tau_{S3} * \tau_{S2}) * G_m \quad (III.39)$$

##### ❖ Flux perdus

- a. Flux Evaporation S1 →Air 3

$$\Phi_{S1 \text{ Air}3} = G_{evp} \quad (III.40)$$

- b. Flux conduction S1→S2

$$\left\{ \begin{array}{l} \Phi_{S1 \text{ Air}3}^{Cond} = \frac{T_{S1G} - T_{S2G}}{R_{S1}} \\ R_{S1} = \frac{ep_{S1}}{\lambda_{S1}} \end{array} \right. \quad (III.41)$$

##### ❖ Équation compacte pour S1 :

En appliquant l'instationnaire à la couche S1

$$\frac{dT_{S1G}}{dT} = \left( \frac{1}{\rho_{C2} * c_{pC2} * ep_{C2}} \right) * \left\{ h_{S1} * (T_{C3} - T_{S1G}) + \sigma * \varepsilon_{C3S1} * (T_{C3}^4 - T_{S1G}^4) + \right. \\ \left. \alpha_{S1 \rightarrow} (\tau_{C3} * \tau_{C2} * \tau_{C1}) * G_f + \alpha_{S1} * (\tau_{S3} * \tau_{S2}) * G_m - G_{evp} - \frac{1}{R_{S1}} * (T_{S1G} - T_{S2G}) \right\} \quad (III.42)$$

### 4.3.2 Couche S2 (Derme)

#### ❖ Flux reçue

a. Flamme → S2

$$\Phi_{f \rightarrow S2} = \alpha_{S2} * (\tau_{S1} * \tau_{C3} * \tau_{C2} * \tau_{C1}) \quad (III.43)$$

b. Flux conduction S1 → S2

$$\left\{ \begin{array}{l} \Phi_{S1 \rightarrow S2}^{Cond} = \frac{(T_{S1G} - T_{S2G})}{R_{S1}} \\ R_{S1} = \frac{ep_{S1}}{\lambda_{S1}} \end{array} \right. \quad (III.44)$$

c. métabolisme → S2

$$\Phi_{m \rightarrow S2} = \alpha_{S2} * (\tau_{S3}) * G_m \quad (III.45)$$

#### ❖ Flux perdus

a. Flux conduction S2 → S3

$$\left\{ \begin{array}{l} \Phi_{S2 \rightarrow S3}^{Cond} = \frac{(T_{S2G} - T_{S3G})}{R_{S2}} \\ R_{S2} = \frac{ep_{S2}}{\lambda_{S2}} \end{array} \right. \quad (III.46)$$

#### ❖ Équation compacte pour S2 :

En appliquant le bilan instationnaire sur la couche S2 s'écrit

$$\frac{dT_{S2G}}{dt} = \left[ \frac{1}{\rho_{S2} c p_{S2} e p_{S2}} \right] * \left\{ (\alpha_{S2} * (\tau_{S1} * \tau_{C3} * \tau_{C2} * \tau_{C1}) * G_f) + \alpha_{S2} * \tau_{S3} * G_m + \frac{1}{R_{S1}} * (T_{S1G} - T_{S2G}) - \frac{1}{R_{S2}} * (T_{S2G} - T_{S3G}) \right\} \quad (III.47)$$

### 4.3.3 Couche S3 (Hypoderme)

#### ❖ Flux reçue

a. Flamme → S3

$$\Phi_{f \rightarrow S3} = \alpha_{S3} * (\tau_{S2} * \tau_{S1} * \tau_{C3} * \tau_{C2} * \tau_{C1}) * G_f \quad (III.48)$$

b. métabolisme  $\rightarrow S3$

$$\Phi_{m \rightarrow S3} = \alpha_{S3} * G_m \quad (III.49)$$

c. Flux conduction  $S2 \rightarrow S3$

$$\Phi_{S2 \rightarrow S3}^{Cond} = \frac{1}{R_{S2}} (T_{S2G} - T_{S3G}) \quad (III.50)$$

#### ❖ Flux perdus

a. flux conduction vers l'organisme (métabolisme)

$$\begin{cases} \Phi_{S3 \rightarrow m}^{Cond} = \frac{1}{R_{S3}} (T_{S3G} - T_m) \\ R_{S3} = \frac{e_{S3}}{\lambda_{S3}} \end{cases} \quad (III.51)$$

#### ❖ Équation compacte pour S3 :

En appliquant le bilan instationnaire sur la couche S3 s'écrit

$$\begin{aligned} \frac{dT_{S3G}}{dt} = & \left[ \frac{1}{\rho_{S3} * cp_{S3} * ep_{S3}} \right] * \left\{ \alpha_{S3} (\tau_{S2} * \tau_{S1} * \tau_{C3} * \tau_{C2} * \tau_{C1}) * G_f + \alpha_{S3} G_m + \frac{1}{R_{S2}} * \right. \\ & \left. (T_{S2G} - T_{S3G}) - \frac{1}{R_{S3}} * (T_{S3G} - T_m) \right\} \end{aligned} \quad (III.52)$$

## 5. PRESENTATION DU LOGICIEL COMSOL MULTIPHYSICS

### 5.1 Définition [51]

COMSOL, qui portait autrefois le nom de FEMLab, est un logiciel spécialisé dans la modélisation et la résolution d'équations aux dérivées partielles par la technique des éléments finis.

Ce logiciel se distingue par sa base de données d'équations, qui permet la modélisation de divers phénomènes physiques tels que l'électrostatique, l'écoulement des fluides ou la déformation des matériaux. Développé initialement comme une toolbox de Matlab, il dispose aujourd'hui d'un environnement graphique autonome, facilitant la création de géométries et l'affichage des résultats en post-traitement.

Ce logiciel se distingue par sa capacité à intégrer plusieurs équations aux dérivées partielles (EDP), ce qui permet de simuler des phénomènes multi-physiques, particulièrement adaptés aux échelles microscopiques. Par exemple, il permet de modéliser la déformation d'une membrane causée par la pression d'un liquide ou l'augmentation de température d'un conducteur sous l'effet d'un courant électrique. De plus, les résultats du logiciel sont directement accessibles dans Matlab, ce qui offre la possibilité de développer des scripts personnalisés. COMSOL Multiphysics est une plateforme complète dédiée à la modélisation et à la simulation de phénomènes physiques à l'aide de techniques numériques avancées.

COMSOL Multiphysics permet de simuler des phénomènes physiques individuels ou complexes en couplant différentes disciplines. Pour étendre les simulations possibles, il inclut plus de 30 modules complémentaires offrant des outils et des interfaces spécialisés pour les domaines du génie électrique, mécanique, des fluides et chimique. De plus, des interfaces bidirectionnelles permettent de relier les simulations réalisées dans COMSOL à des logiciels tiers de calcul, de conception assistée par ordinateur (CAO) et de conception assistée par ordinateur électronique (CAOE).



FIGURE III-10 : COMSOL MULTIPHYSICS 6.2

## **5.2 Principe d'utilisation**

Des modules optionnels supplémentaires proposent des interfaces dédiées à des domaines spécialisés tels que la mécanique linéaire et non linéaire, l'acoustique, les écoulements fluides, le transfert thermique, le génie chimique, la géophysique, l'électromagnétisme basse et haute fréquence, la corrosion, le plasma, le suivi des particules, l'optimisation, les MEMS, ainsi que des intégrations avec des logiciels de CAO et MATLAB. Ce logiciel est compatible avec plusieurs systèmes d'exploitation (Windows, Mac, Linux). Outre les phénomènes physiques mentionnés, COMSOL MULTIPHYSICS permet à l'utilisateur de définir ses propres systèmes d'équations aux dérivées partielles (EDP), en version différentielle ou sous formulation faible. Les couplages avec des équations aux dérivées ordinaires (EDO) et des équations allégo différentiels (EAD) sont également possibles. Les différentes étapes du processus de modélisation : [51]

- Choix de la dimension : 3D, 2D, axisymétrique...
- Choix des modules physique : Transfert de chaleur, transport d'espèces... ➤ Choix du type d'étude : Stationnaire, Temporelle, Fréquentielle...
- Construction de la géométrie.
- Choix du (des) matériau(x).
- Identification du module physique.
- Paramétrage et calcul du maillage.
- Paramétrage et calcul de l'étude.
- Représentation graphique des résultats.

## **5.3 Applications de COMSOL**

Les équations aux dérivées partielles (EDP) jouent un rôle clé dans l'expression des lois scientifiques et sont fondamentales pour la modélisation de nombreux phénomènes dans les sciences et l'ingénierie. Le logiciel COMSOL Multiphysics peut être utilisé dans de nombreux domaines d'application, notamment les suivants, en combinant librement la physique et en incorporant des PDE, des ODE et des DAE, selon les besoins de l'utilisateur. [51]



<ul style="list-style-type: none"> <li>•Acoustique</li> <li>•Piles</li> <li>•Bioscience</li> <li>•Réactions chimiques</li> <li>•Flux moléculaire</li> <li>•Dynamique multicorps</li> <li>•Optique</li> <li>•Optimisation et analyse de sensibilité</li> <li>•Traçage des particules</li> <li>•Photonique</li> <li>•Dispositifs piézoélectriques</li> <li>•Débit du tuyau</li> <li>•Physique des plasmas</li> <li>•Écoulement de polymère</li> <li>•Rotor dynamique</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Matériaux composites</li> <li>•Simulations de systèmes de contrôle</li> <li>•Corrosion et protection contre la corrosion</li> <li>•Diffusion</li> <li>•Électrochimie</li> <li>•Électrodéposition</li> <li>•Electromagnétiques</li> <li>•Analyse de fatigue</li> <li>•Dynamique des fluides (CFD)</li> <li>•Piles à combustible et électrolyseurs</li> <li>•Écoulement de milieux poreux</li> <li>•Mécanique quantique</li> <li>•Composants radiofréquences</li> <li>•Ray tracing et optique de rayons</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Géophysique et géomécanique</li> <li>•Transfert de chaleur</li> <li>•Coques superposées et matériaux composites</li> <li>•Traitement des métaux</li> <li>•Systèmes micro électromécaniques (MEMS)</li> <li>•Micro fluidique</li> <li>•Ingénierie des micro-ondes</li> <li>•Mélangeurs et mélanges de fluides</li> <li>•Écoulement souterrain</li> <li>•Thermodynamique</li> <li>•Phénomènes de transport</li> <li>•Optique ondulatoire</li> <li>•Propagation des ondes</li> <li>•Dispositifs semi-conducteurs</li> <li>•Mécanique des structures</li> </ul>
---	--	---

#### 5.4 Méthodologie de conception avec COMSOL-Multiphysics

Le projet sera réalisé en suivant une approche méthodique, en commençant par la création de la géométrie du modèle à concevoir. Une fois cette étape terminée, il conviendra d'attribuer à chaque matériau ses propriétés physiques et caractéristiques spécifiques, nécessaires à la conception d'une machine à courant continu. Par la suite, les conditions aux limites ainsi que les différents paramètres du modèle seront clairement définis. [52]

La modélisation avec COMSOL Multiphysics se résume en 5 étapes :

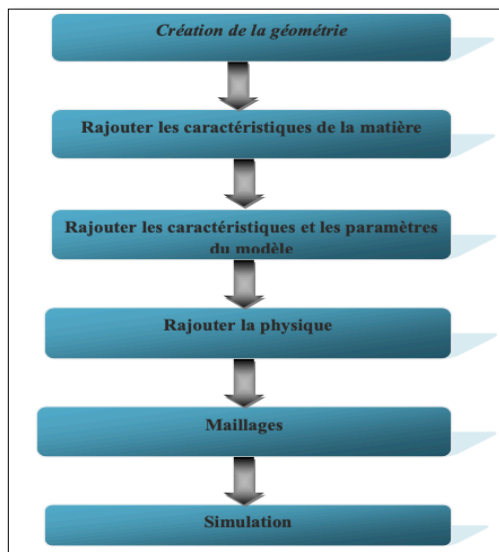


FIGURE III-11 : DIAGRAMME DES ETAPES DE CONCEPTION AVEC COMSOL. [52]

## 5.5 Interface utilisateur de Comsol-Multiphysics

L'interface de COMSOL, peut être séparée en quatre parties :

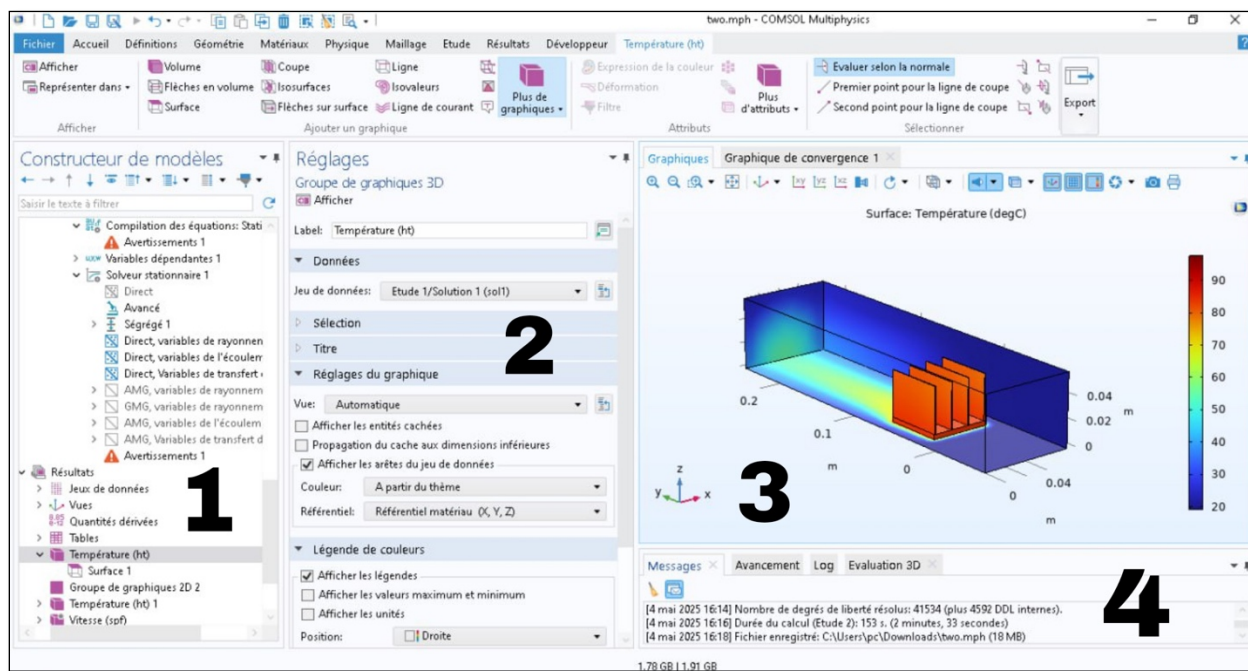


FIGURE III-12 : L'INTERFACE DU LOGICIEL DE SIMULATION DE COMSOL-MULTIPHYSICS.

Dans la partie gauche de l'interface se situe Model Builder **1**, où l'on configure l'ensemble du problème à étudier. Le menu Global Definitions contient notamment les paramètres et variables nécessaires à la définition du modèle. Le menu Component **1** comprend la configuration du système de coordonnées (cartésien par défaut), la géométrie, les matériaux (Materials), l'application des phénomènes physiques, ainsi que la génération du maillage. Le menu Study **1** permet de définir les paramètres de résolutions (stationnaire ou transitoire) et d'ajuster les paramètres du solveur. Finalement, le menu Résultats regroupe l'ensemble des options de post traitement des données.

La colonne située à droite **2**, appelée Settings, permet de configurer les paramètres correspondant aux options sélectionnées dans le Model Builder. Par exemple, les dimensions de l'objet créé dans Géométrie. C'est aussi dans cette fenêtre que les valeurs initiales et les conditions frontières de la simulation, ainsi que les modèles physiques nécessaires à la simulation.

Dans la partie supérieure droite, l'interface d'affichage graphique Graphics3 permet de visualiser la géométrie, le maillage ou les résultats obtenus. La partie supérieure de cette interface propose diverses options, comme le réglage du zoom, la rotation d'un objet en trois dimensions ou encore la possibilité de masquer certains composants.

Les outils de sélection d'objets, des domaines, des frontières ou de points sont également accessibles en haut de cette fenêtre.

Finalement, Juste au-dessous de la fenêtre d'affichage graphique, une fenêtre **4** offre la possibilité de visualiser les messages d'erreur éventuels, de suivre l'avancement des simulations, de consulter la liste des opérations réalisées lors du calcul de la solution, ainsi que d'afficher les résultats numériques une fois la simulation terminée.

## **6. Schémas des études de cas dans le logiciel**

La figure III-13 représente une vue en deux dimensions d'un modèle géométrique typique utilisé dans COMSOL Multiphysics, très probablement pour simuler le transfert thermique à travers une structure multicouche. L'axe horizontal (x) indique la longueur ou l'épaisseur totale du système

en mètres, tandis que l'axe vertical (y) est très réduit, suggérant que la hauteur des rectangles est choisie pour des raisons de visualisation uniquement.

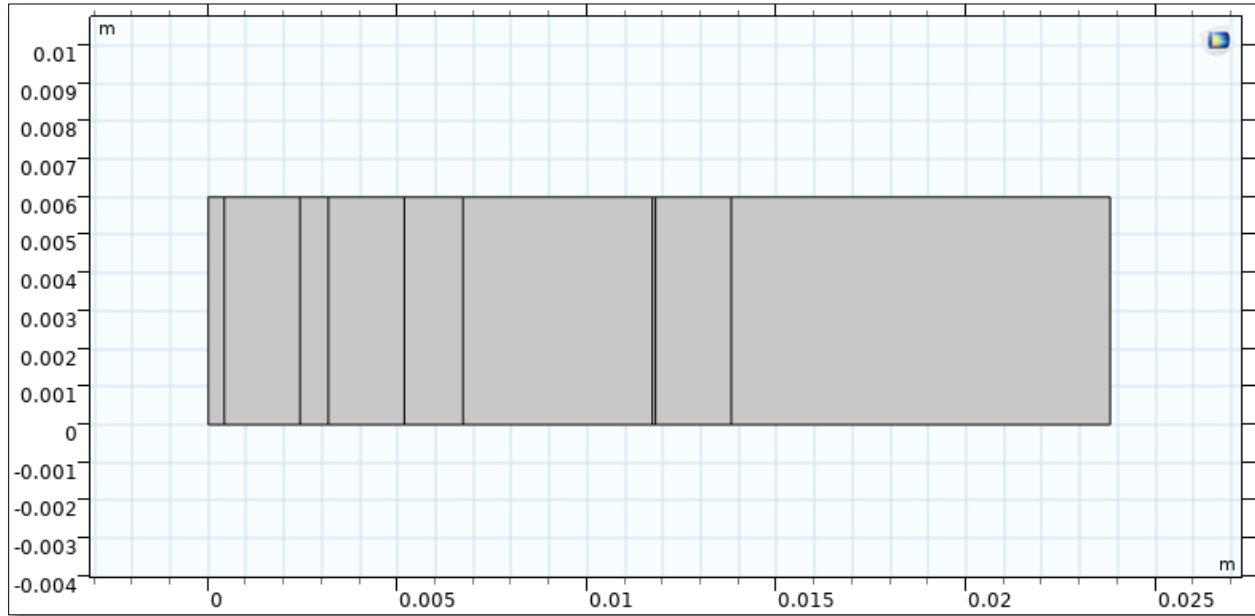


FIGURE III-13 : SCHÉMAS DES ÉTUDES DE CAS DANS LE LOGICIEL

## 7. Conditions aux limites

Table III-1 : Les conditions aux limites. [5]

	C1	C2	C3	S1	S2	S3
$\delta$ (mm)	0.42	0.75	1.55	0.08	2	10
$\rho$ (Kg.m <sup>-3</sup> )	605	212	112	1200	1200	1000
$\lambda$ (W/m.°C)	0.081	0.041	0.038	0.225	0.989	0.167
<b>Cp</b> (J/Kg.K)	1187.5	1297	1219	3598	3222	2760
$\alpha / \varepsilon$	0.98 / 0.60	0.5 / 0.60	0.5 / 0.60	0.97 / 0.98	0.97	1

Les épaisseurs des différentes lames d'air séparant les couches du la tenue sont respectivement de 2 mm, 2 mm et 5 mm. le flux de métabolisme est  $G_m = 380,5$  W, nous avons pris la porosité  $E_p = 0,6$  et le flux de sueur représenté par l'air humide avec de l'humidité relative  $\phi_w = 0,3$ . La température ambiante est fixée à  $T_{amb} = 298$  K, et la température de métabilisme est de  $T_m = 309,85$  K.

La convection se manifestant de part et d'autre des couches de tissu, une valeur de  $18 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$  est retenue pour le coefficient de transfert convectif entre la première couche et l'air ambiant. Une valeur moyenne de  $8 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$  est retenue pour caractériser la convection entre la surface de la peau et la couche C3. La valeur retenue de  $2300 \text{ W/m}^2$  du flux thermique entrant provenant de la source d'incendie correspond à une situation stationnaire reproduisant le niveau moyen d'exposition des pompiers lors d'incendies semi-confinés standard. [5]

## **8. conclusion**

Ce chapitre a établi les bases théoriques et méthodologiques pour modéliser les transferts thermiques dans les tenues de protection multicouches des sapeurs-pompiers. Il a détaillé les mécanismes fondamentaux de transfert de chaleur (conduction, convection, rayonnement) via leurs équations constitutives et les nombres adimensionnels associés. Trois configurations géométriques d'exposition thermique ont été présentées, avec des bilans énergétiques en régime instationnaire pour chaque couche (vêtements C1-C3 et peau S1-S3), intégrant les interactions entre flux externes (flamme), internes (métabolisme) et l'évaporation de la sueur. Le logiciel COMSOL Multiphysics a été introduit comme outil de simulation numérique, permettant des simulations multiphysiques réalistes grâce à sa capacité à coupler les équations différentielles et à gérer des conditions aux limites complexes.

# CHAPTER IV

## **IV. CHAPITRE 4 : RÉSULTATS ET DISCUSSION**

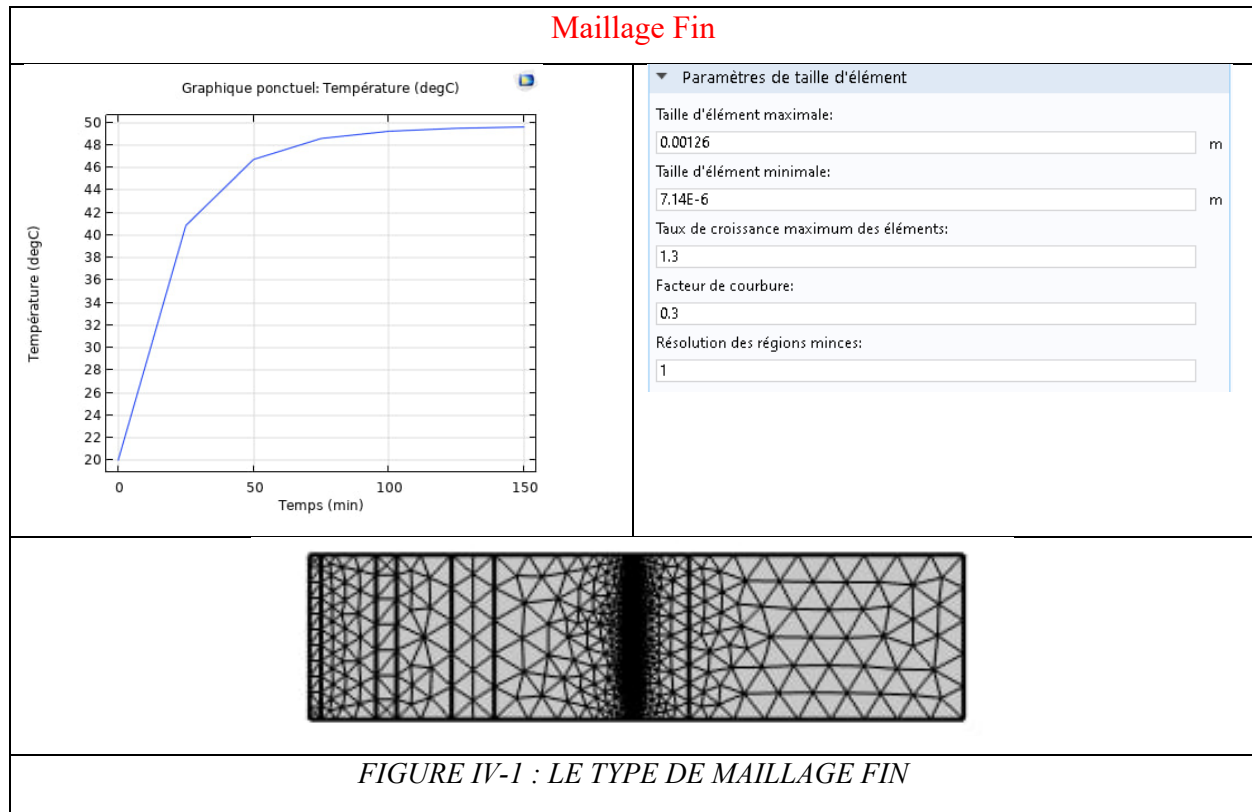
### **1. Introduction**

Ce chapitre présente et analyse les résultats issus des simulations numériques réalisées à l'aide du logiciel COMSOL Multiphysics. L'objectif principal est d'évaluer le comportement thermique d'un système multicouche exposé à un flux thermique, en tenant compte de différents paramètres physiques tels que le type de maillage, la présence d'un milieu poreux, l'humidité relative, et l'effet d'un flux d'évaporation. Dans un premier temps, une étude de maillage est menée afin de déterminer l'influence de la finesse du maillage sur la précision et la stabilité des résultats. Ensuite, trois cas d'étude sont examinés successivement : le cas de base, le cas avec porosité, et enfin le cas intégrant un flux d'évaporation.

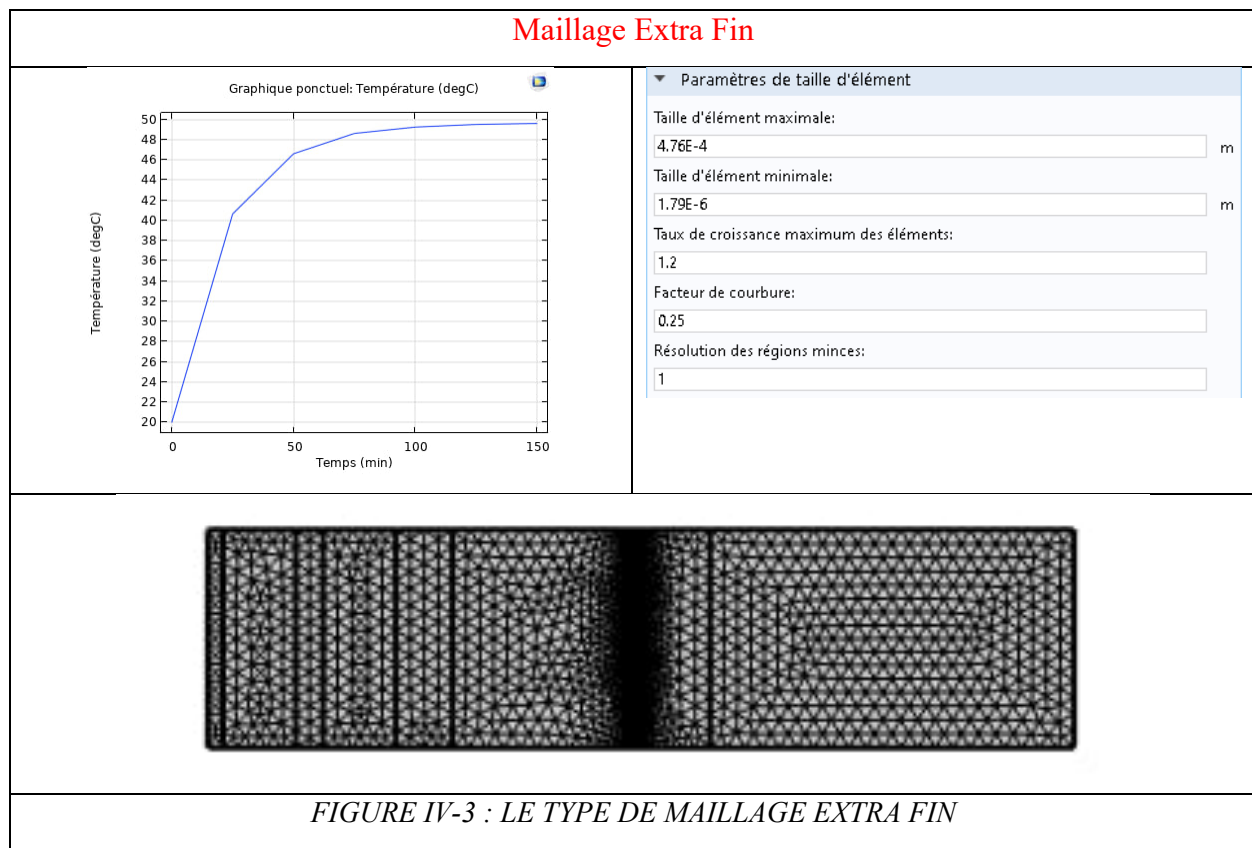
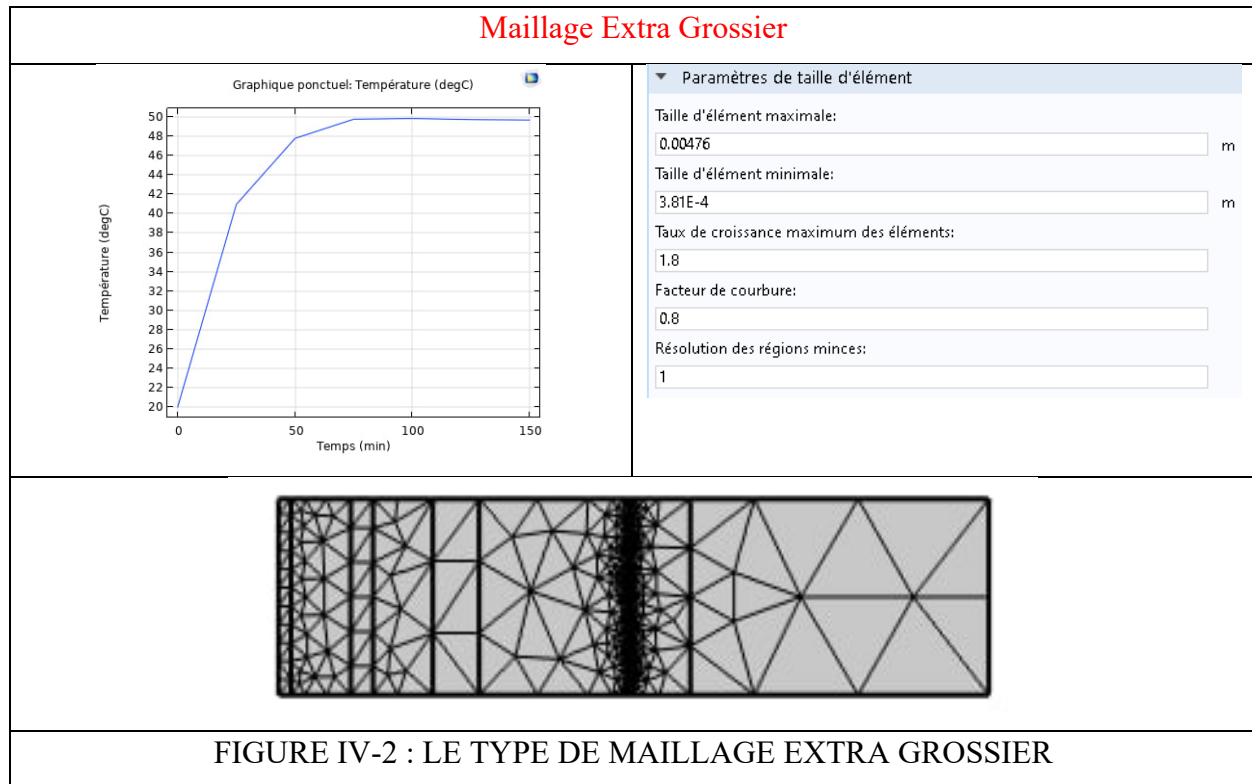
Pour chacun de ces cas, une analyse temporelle et stationnaire est effectuée afin de suivre l'évolution de la température dans le temps et dans l'espace. Une comparaison des résultats obtenus avec des études de référence permet de valider la fiabilité du modèle développé.

## 2. Test de maillage

Dans cette étude, trois types de maillages ont été utilisés afin d'analyser leur influence sur la précision des résultats et le comportement thermique simulé. Cette comparaison permet d'évaluer le compromis entre qualité de simulation et temps de calcul.







### 3. Comparaison de maillage

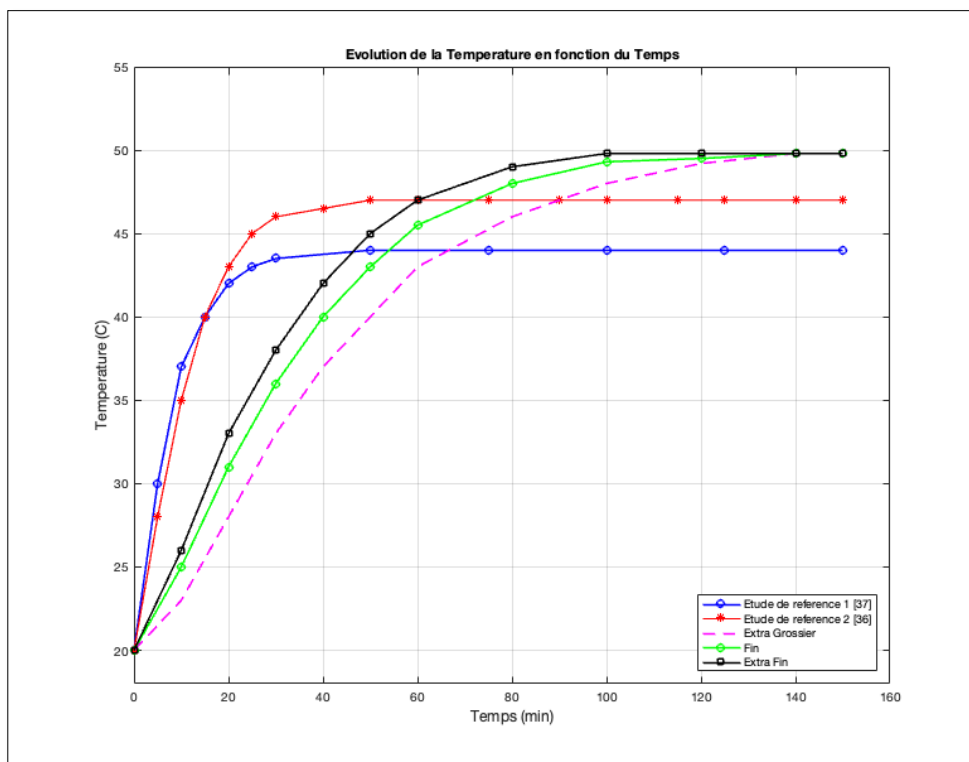


FIGURE IV-4 :LA COMPARAISON DE LES TROIS MAILLAGE AVEC LES ETUDES DE REFERENCE

la figure, IV-4 illustre le comportement thermique de cinq cas, dont trois types de maillages (Extra Grossier, Fin , Extra Fin ) et deux résultats de référence (étude "1", "2"), tous commençant à 20 °C. Alors que les études "1" et "2" présentent un échauffement initial rapide et se stabilisent respectivement autour de 44 °C et 47 °C, les maillages « Fin » et « Extra Fin » présentent une montée initiale plus lente, mais atteignent finalement une température d'équilibre plus élevée, d'environ 49 °C, tandis que « Extra Grossier » est nettement plus lent sur toute la durée. À des fins de validation, compte tenu de la nécessité de choisir l'un des résultats de maillage à comparer à les études de référence "1" et "2", le courbe Extra Fin sont le choix le plus appropriés, malgré leur chauffage initial plus lent, leur température finale de 49°C fournit la concordance la plus proche avec la référence "2" (47°C) parmi les résultats de maillage, ce qui en fait les meilleurs candidats pour démontrer la validité des résultats de étude.

#### 4. Résultats du cas 01 ( cas de base )

La Figure IV-5 présente les résultats d'une étude stationnaire et temporelle, affichant la distribution de la température (°C) sur une surface. L'axe vertical représente la hauteur (m), tandis que l'axe horizontal indique la largeur (m). Le dégradé de couleurs, allant de 40 à 140 °C, illustre les variations de température, les zones les moins chaudes étant en rouge et les zones les plus chaudes en jaune. Cette visualisation met en évidence le comportement thermique du système étudié, fournissant des informations sur la distribution de la chaleur et les points chauds potentiels.

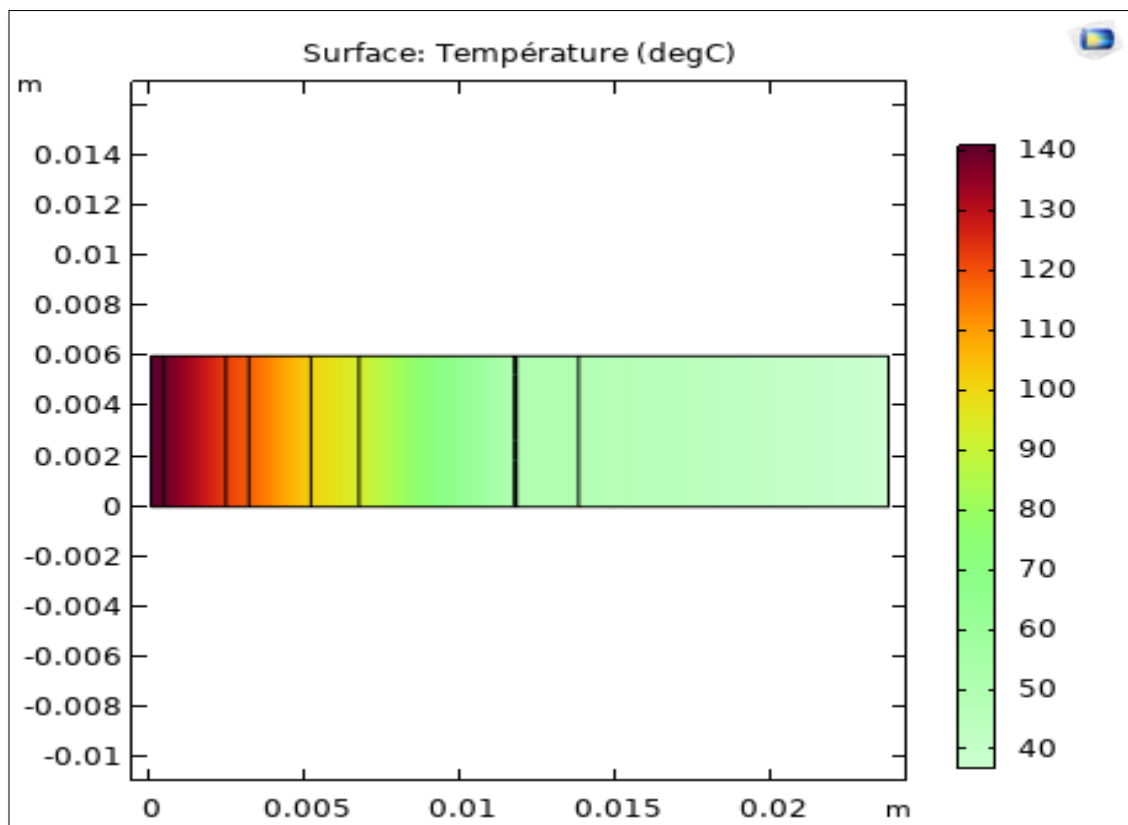


FIGURE IV-5 : PROFIL DE TEMPERATURE EN SURFACE

## 4.1 Etude temporel

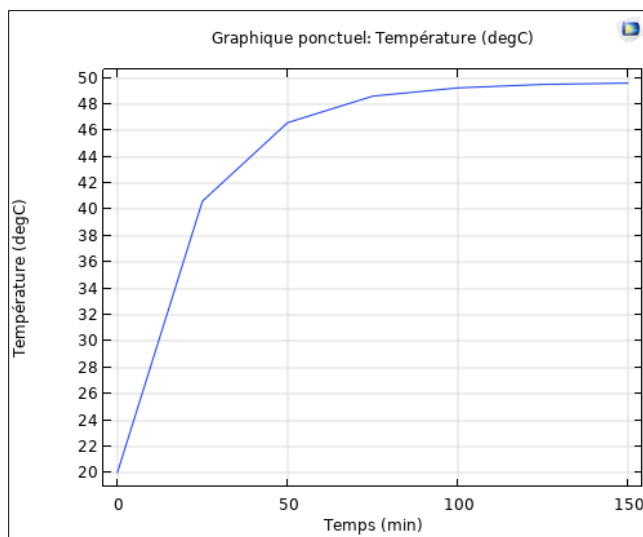


FIGURE IV-6 : ÉVOLUTION DE LA TEMPERATURE PAR RAPPORT LE TEMPS POUR LE CAS 1

La figure IV-6 illustre l'évolution de la température (en degrés Celsius) en fonction du temps (en minutes). La température démarre à environ 20 °C au temps 0 et augmente très rapidement durant la phase initiale (0 à environ 25 minutes), atteignant environ 40,5 °C. Ensuite, l'augmentation de la température continue, mais à un rythme plus lent, passant d'environ 40,5 °C à environ 46,5 °C entre 25 et 50 minutes. Après 50 minutes, l'augmentation de la température devient de plus en plus marginale, le système approchant d'une température d'équilibre. À 100 minutes, la température est d'environ 49 °C, et à 150 minutes, elle atteint environ 49,5 °C. En résumé, ce graphique montre un processus d'échauffement où la température augmente rapidement au début, puis son taux d'augmentation diminue progressivement jusqu'à ce qu'elle se stabilise à une valeur maximale d'environ 49,5 °C.

## Comparaison avec les résultats de référence

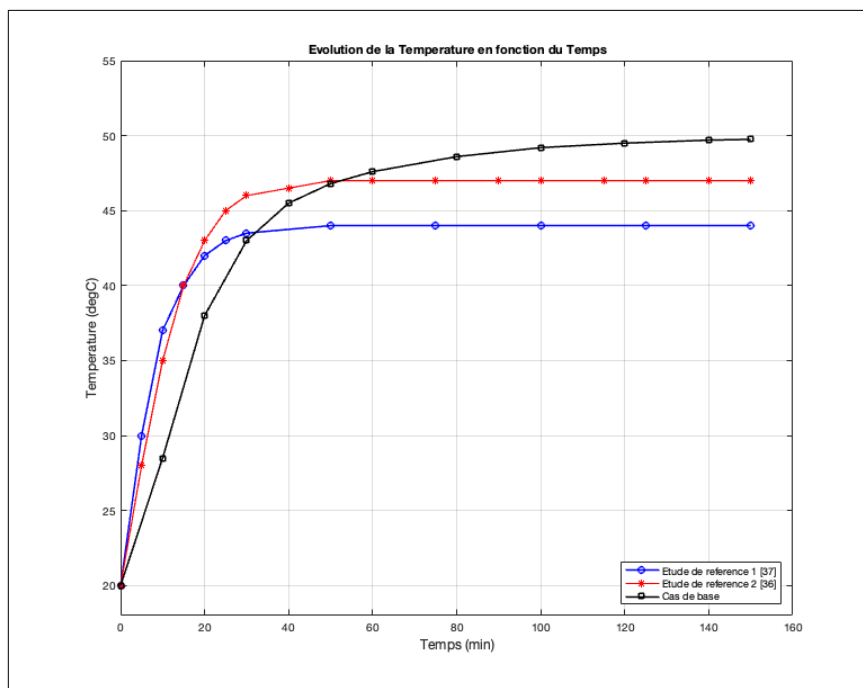


FIGURE IV-7 : ÉVOLUTION DE LA TEMPÉRATURE EN FONCTION DU TEMPS

La figure IV-7 présente l'évolution de la température en fonction du temps pour trois études distinctes : "Étude de référence 1 [37]", "Étude de référence 2 [36]" et "Cas de base". Initialement, les trois courbes démarrent à une température d'environ 20°C.

Dans la phase initiale (environ 0 à 40 minutes), les études de référence "2" (courbe rouge) et "1" (courbe bleue) montrent une augmentation rapide de la température. L'étude "2" présente une montée légèrement plus rapide au début, atteignant environ 46°C vers 30 minutes. L'étude "1" suit de près, atteignant environ 43°C à 30 minutes. En revanche, le "Cas de base" (courbe noire) affiche une augmentation plus lente et plus progressive durant cette période.

Après cette phase initiale, les comportements des courbes divergent, le courbe de l'étude "1" est la première à se stabiliser, atteignant un plateau d'environ 44°C aux alentours de 60 minutes. L'étude "2" se stabilise également relativement rapidement, atteignant un plateau d'environ 47°C vers 60 minutes. Le "cas de base" quant à elle, continue d'augmenter de manière plus graduelle et sur une période plus longue, ne se stabilisant qu'autour de 120 minutes à la température la plus

élevée, soit environ 50°C. On observe un point de croisement où la courbe de "cas de base" dépasse les courbes de l'étude "2" et "1" entre 40 et 50 minutes, indiquant qu'elle atteint des températures finales plus élevées malgré un démarrage plus lent.

#### 4.2 Etude stationnaire

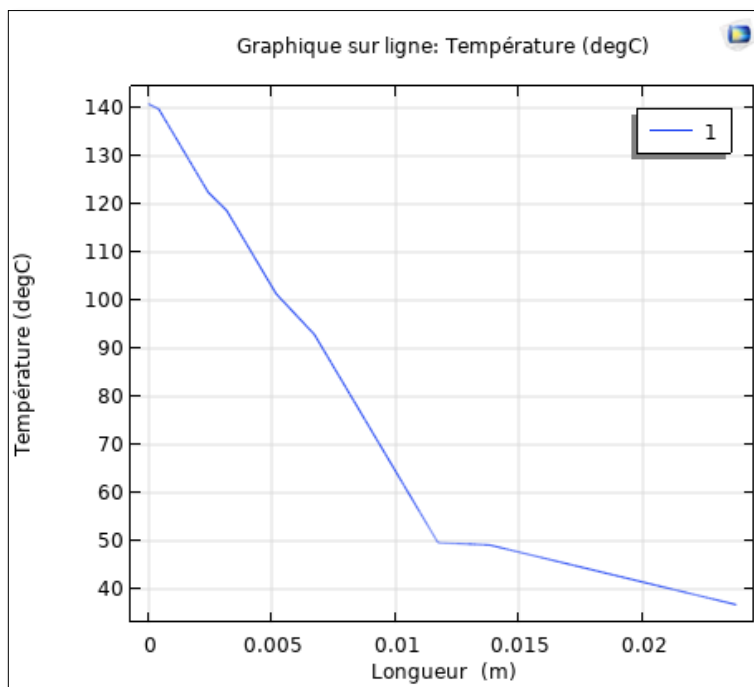


FIGURE IV-8 : ÉVOLUTION DE LA TEMPÉRATURE PAR RAPPORT LA LONGUEUR POUR LA PREMIERE CAS

La figure IV-8 présente un graphique linéaire intitulé « Graphique linéaire : Température (°C) », illustrant la variation de la température (°C) en fonction de la longueur (m). L'axe des Y indique les valeurs de température entre 40 et 140 °C, tandis que l'axe des X représente la longueur, qui varie entre 0 et 0,02 mètre (ou 0 à 2 cm). Le graphique montre une forte baisse de température entre les couches de la combinaison, commençant à environ 140 °C au point de départ et atteignant environ 49 °C à 0,0117 mètre. Cette forte pente indique un refroidissement ou une dissipation thermique rapide sur une très courte distance.

## Comparaison avec les résultats de référence

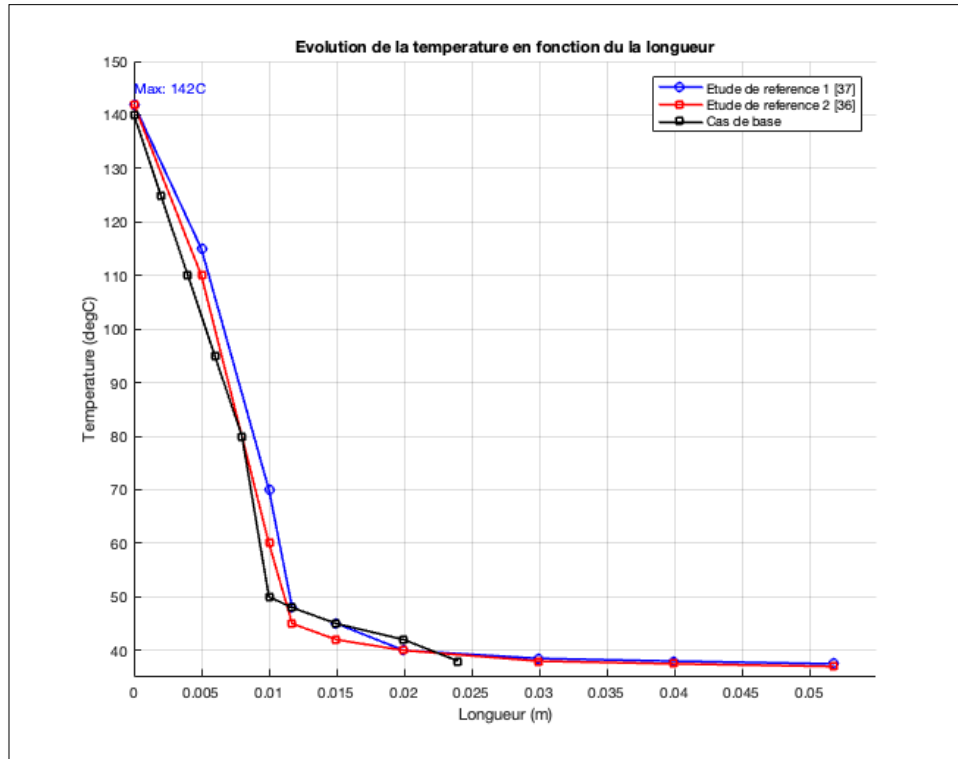


FIGURE IV-9 : COMPARAISON DES RESULTAT D'ETUDE STATIONNAIRE

La figure IV-9 intitulée présente une comparaison des profils de température obtenus à partir des études de référence "1" et "2", utilisés comme référence pour valider l'étude. Les données montrent l'évolution de la température (en °C) en fonction de la longueur (en mètres). Cette analyse comparative permet de vérifier la cohérence de nos résultats avec les modèles établis, en particulier pour des conditions stationnaires. Initialement, le profil "1" affiche la température la plus élevée, atteignant environ 142°C, tandis que "2" et "Cas de base" débutent légèrement en dessous, autour de 140°C. Tous les profils connaissent une chute drastique de température sur les premiers 0.01 mètre, "1" conservant les températures les plus élevées dans cette phase, suivi de "2", et "Cas de base" présentant les températures les plus basses. Cependant, au-delà d'environ 0.02 mètre, les trois courbes convergent et se stabilisent remarquablement, atteignant une température quasi constante d'environ 40°C, ce qui indique une homogénéisation thermique à des distances plus importantes.

### 4.3 Impact du flux de flamme sur la température de la peau

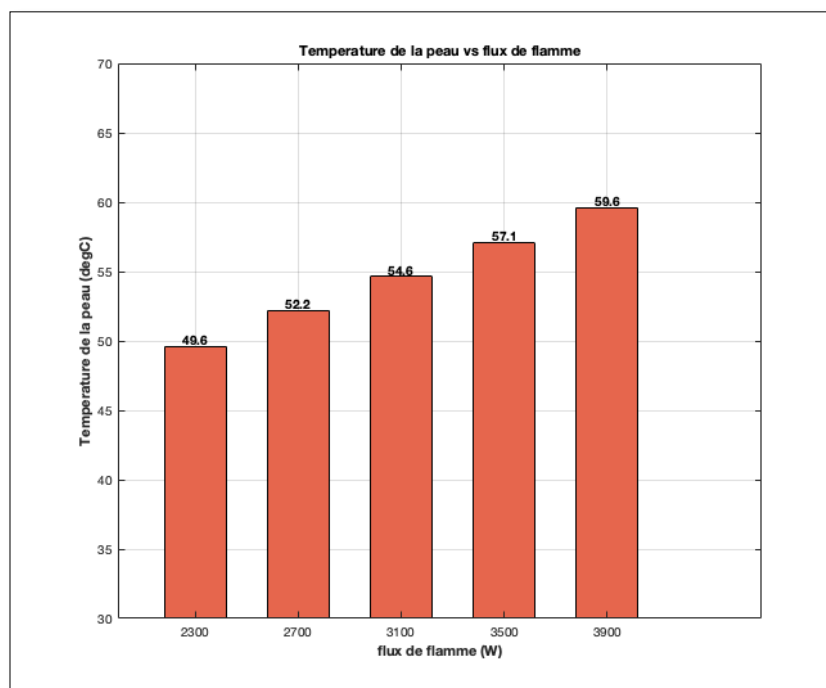


FIGURE IV-10 : TEMPERATURE DE LA PEAU EN FONCTION DU FLUX DE FLAMME.

La figure IV-10 illustre de manière éloquent la corrélation directe et significative entre le flux de flamme, mesuré en Watts, et la température de la peau, exprimée en degrés Celsius, révélant une augmentation progressive de la température cutanée à mesure que l'intensité du flux de flamme s'accroît, passant de 49.62°C à 2300 W à environ 59.6°C à 3900 W. Cette tendance linéaire souligne l'impact direct de l'énergie thermique de la flamme sur la surface exposée, ce qui est d'une importance capitale pour évaluer les risques de brûlures, car des températures supérieures à 44°C peuvent déjà provoquer des lésions cutanées, et celles observées ici, entre 50°C et 60°C, sont susceptibles d'entraîner des brûlures graves en un temps très court.



## 5. Résultats du cas 02

### 5.1 Etude temporel

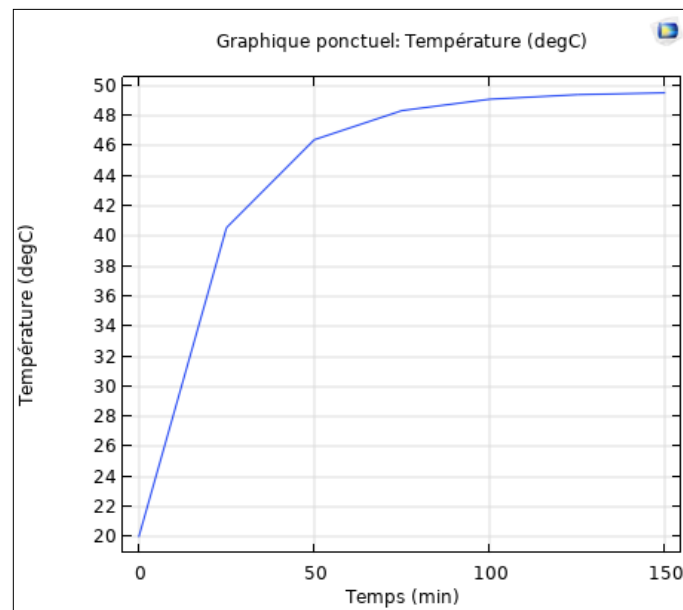


FIGURE IV-11 : ÉVOLUTION DE LA TEMPERATURE PAR RAPPORT LE TEMPS POUR LE CAS 2

Après le changement de point d'étude de la surface vers l'intérieur de la peau La courbe de température montre une augmentation rapide initiale de la température de la peau, passant d'environ 20°C à 40°C en 30 minutes, suivie d'une phase de ralentissement et d'une stabilisation progressive autour de 49°C après 50 minutes.

cette courbe de température révèle le comportement thermique de l'intérieur de la peau, désormais considérée comme un milieu poreux.

## Comparaison avec le cas de base

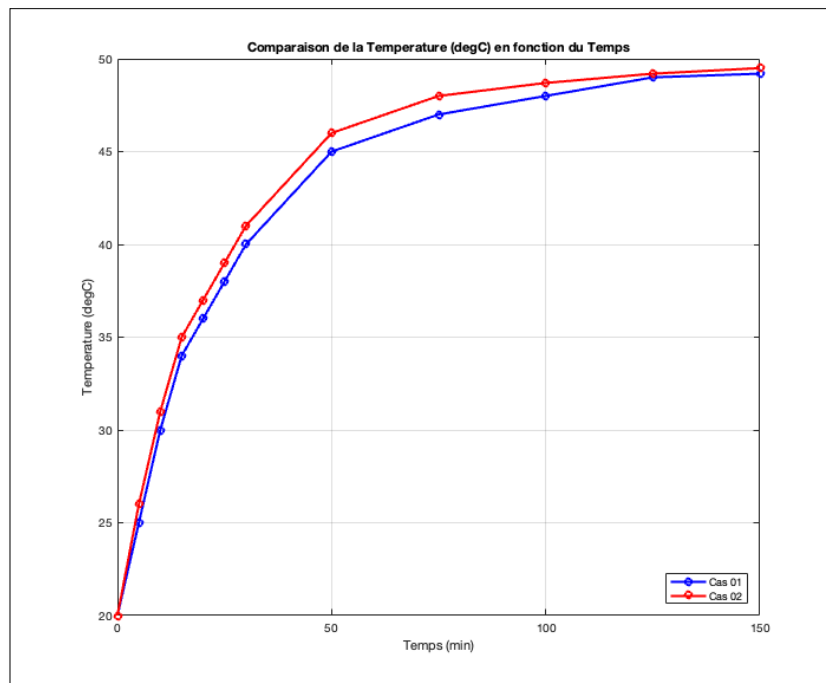


FIGURE IV-12 : ÉVOLUTION THERMIQUE COMPAREE AVEC ET SANS MILIEU POREUX (ETUDE TEMPOREL)

La figure IV-12 présente une comparaison de l'évolution de la température en fonction du temps pour deux scénarios distincts : un cas de base (Cas 01, ligne bleue) et un cas avec un milieu poreux (Cas 02, ligne rouge). Initialement, les deux systèmes démarrent à la même température d'environ 20°C. Bien que la phase de chauffe initiale soit rapide pour les deux, le Cas 02 démontre une montée en température significativement plus rapide que le Cas 01, particulièrement entre 20 et 60 minutes. Cette différence de cinétique est clairement visible par la pente plus raide de la courbe rouge, indiquant une meilleure efficacité de transfert de chaleur lorsque le milieu poreux est présent. Les deux courbes convergent finalement vers une température maximale similaire, proche de 49°C, mais le Cas 02 atteint ce plateau plus rapidement, soulignant l'avantage du milieu poreux pour accélérer l'atteinte de l'équilibre thermique.

## 5.2 Etude stationnaire

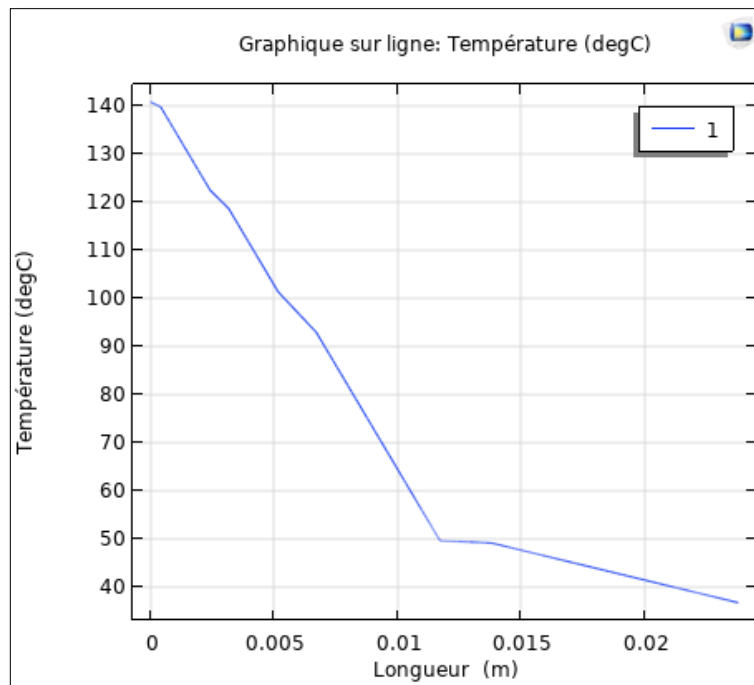


FIGURE IV-13 : ÉVOLUTION DE LA TEMPERATURE PAR RAPPORT LA LONGUEUR POUR LE DEUXIEME CAS

La figure IV-13 montre une décroissance rapide et quasi-linéaire de la température de 140°C à 40°C sur une distance de 0 à 0,02 m, révélant un gradient thermique élevé caractéristique d'un transfert de chaleur efficace. Bien qu'un milieu poreux soit présent entre 0,01172 m et 0,0118 m, son impact sur le profil thermique global semble négligeable, avec seulement une possible légère modification locale de la conductivité thermique qui pourrait être attribuée à la structure poreuse.

### Comparaison avec le cas de base

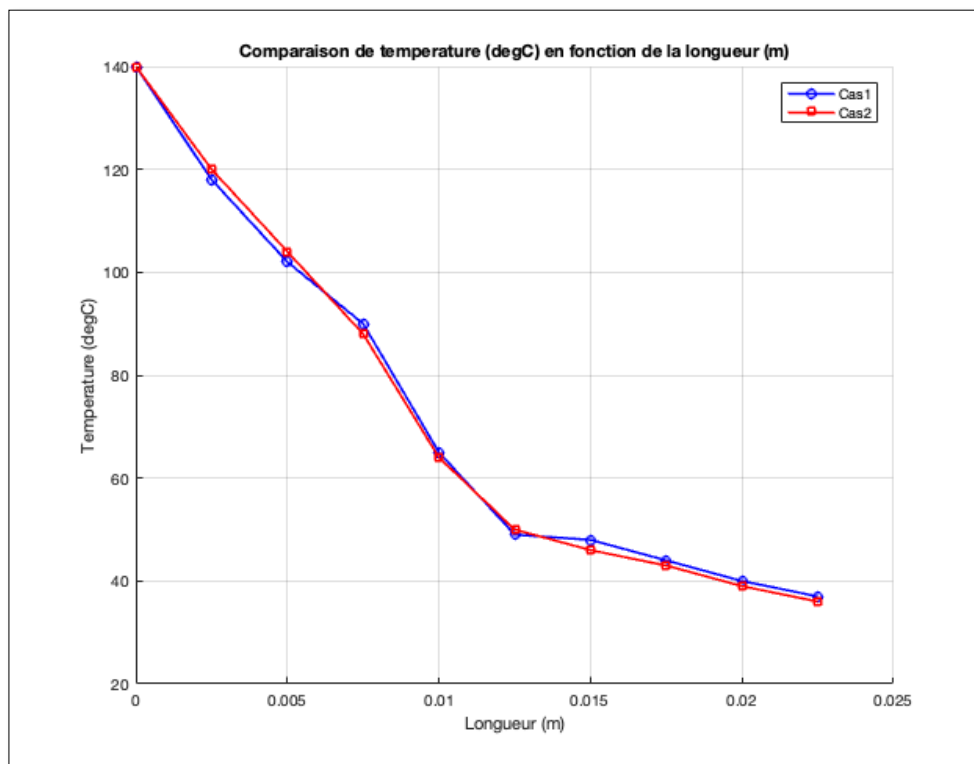


FIGURE IV-14 : ÉVOLUTION THERMIQUE COMPAREE AVEC ET SANS MILIEU POREUX ( ETUDE STATIONNAIRE)

La figure IV-14 présente une comparaison des profils de température en fonction de la longueur pour deux scénarios distincts : un cas de base (Cas 1) et un cas incluant des milieux poreux (Cas 2). Les deux cas débutent à une température identique d'environ 140°C à une longueur de 0 mètre, et montrent une diminution progressive de la température à mesure que la longueur augmente. Globalement, les courbes des deux scénarios sont remarquablement similaires, indiquant que l'introduction de milieux poreux n'altère pas de manière significative le comportement thermique. Cependant, ces différences sont minimales, et les deux cas convergent vers une température finale très similaire d'environ 38°C à la fin de la longueur mesurée.

### 5.3 Impact du la porosité sur la Température de la Peau

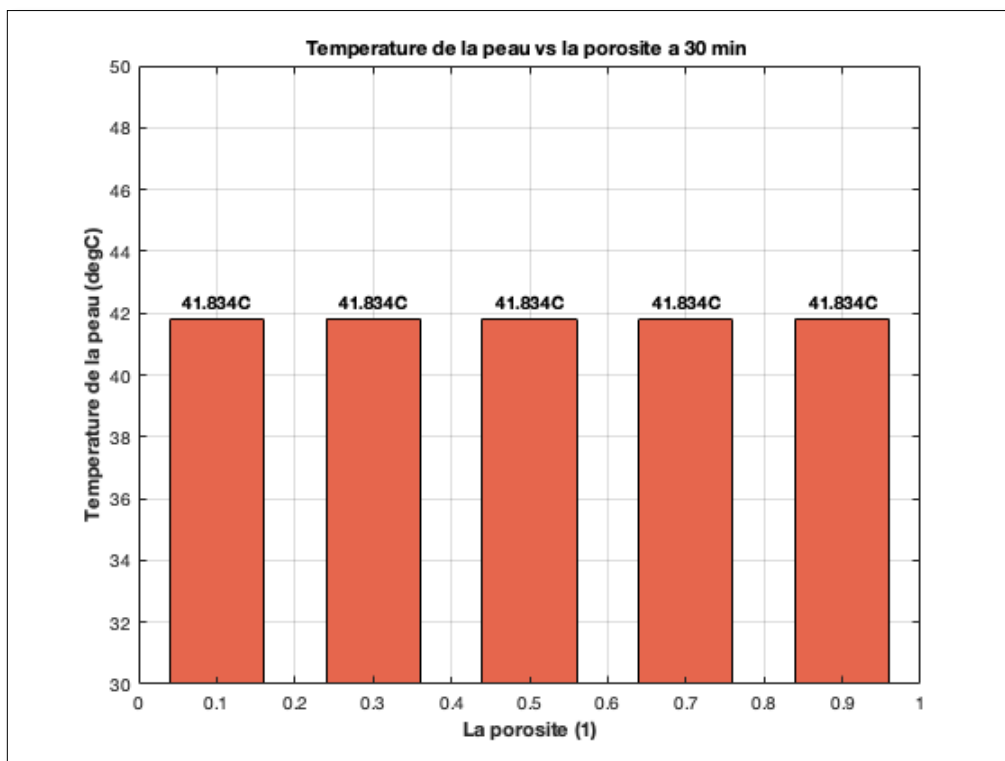


FIGURE IV-15 : HISTOGRAMME DE LA TEMPÉRATURE EN FONCTION DE LA POROSITÉ À  $T = 30$  MIN

La figure IV-15 illustre l'évolution de la température au niveau de la surface de la peau en fonction de la porosité de la première couche du système multicouche, notée S1, à l'instant  $t = 30$  min que représente la durée d'expositions du sapeurs-pompiers en face un feu qui a été démontrée par le résultat du cas de base Fig IV-7. Cette porosité varie dans une large plage, allant de 0,1 (faible porosité, matériau relativement compact) à 0,9 (fortement poreux, structure très aérée). Malgré cette variation importante des propriétés physiques de la couche S1, les résultats obtenus montrent que la température atteinte par la peau reste pratiquement inchangée, se stabilisant autour de 41,834 °C pour toutes les valeurs de porosité étudiées.

## 6. Résultats du cas 03

### 6.1 Etude temporel

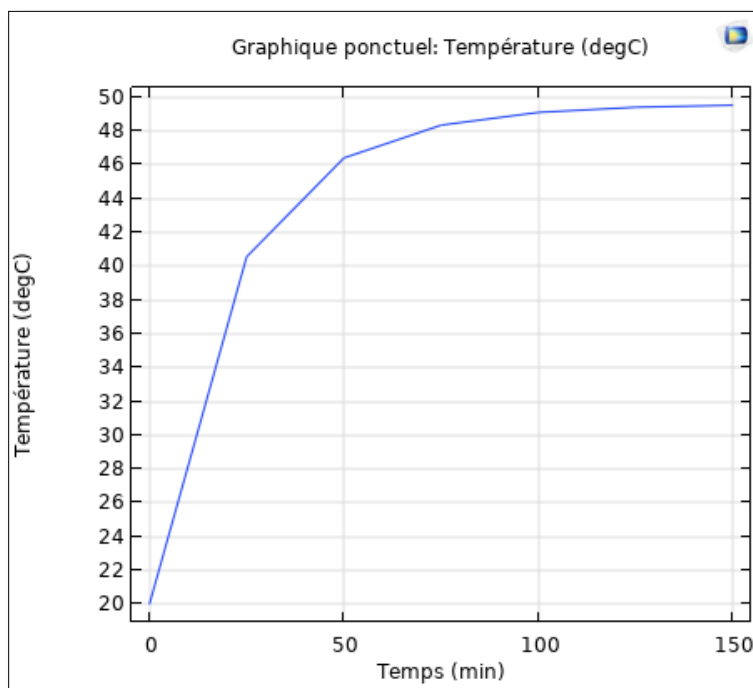


FIGURE IV-16 : ÉVOLUTION DE LA TEMPERATURE PAR RAPPORT LE TEMPS POUR LE CAS 3

La figure IV-16 illustre l'évolution de la température en fonction du temps, suite à l'ajout d'un flux d'évaporation. Initialement, de 0 à environ 30 minutes, la température connaît une augmentation rapide, passant de 20°C à environ 41°C, ce qui témoigne d'un apport de chaleur significatif. Entre 30 et 50 minutes, l'augmentation se poursuit mais à un rythme ralenti, la température atteignant 46°C. Au-delà de 50 minutes et jusqu'à 150 minutes, la courbe tend vers un plateau, la température approchant les 49°C (environ 48.8-48.9°C). Cette stabilisation suggère que le système approche d'un équilibre thermique, où l'apport de chaleur est compensé par la perte de chaleur due à l'évaporation, empêchant ainsi une augmentation continue de la température.

### Comparaison avec le cas de base

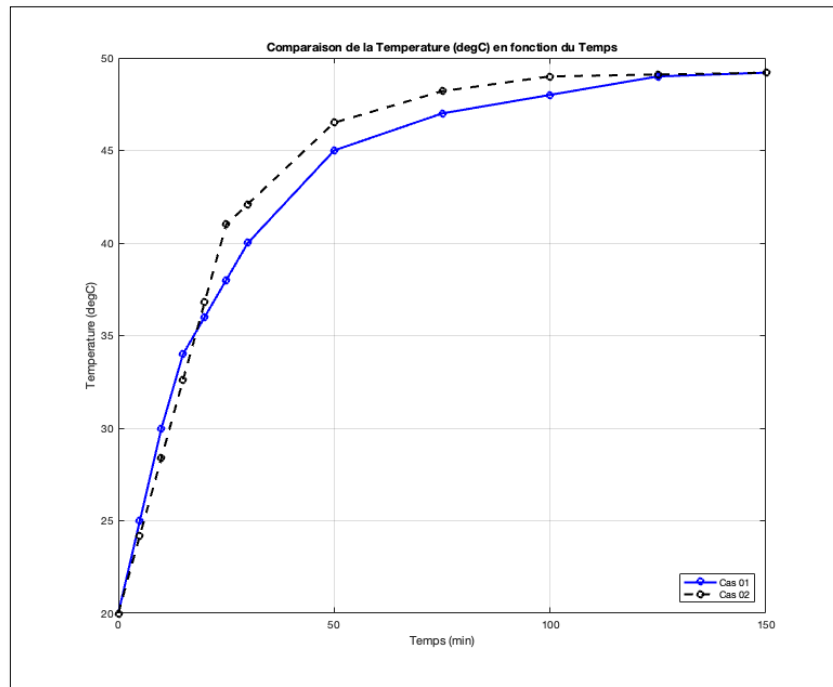


FIGURE IV-17 : ÉVOLUTION THERMIQUE COMPAREE AVEC ET SANS FLUX D'EVAPORATION (ETUDE TEMPOREL)

La figure IV-17 présente une comparaison de l'évolution de la température (en degrés Celsius) en fonction du temps (en minutes) pour deux cas, "Cas 01" et "Cas 03". Au début de l'expérience (temps 0), les deux cas commencent à une température initiale d'environ 20°C. Au fur et à mesure que le temps progresse, la température augmente dans les deux scénarios. Cependant, le "Cas 03" (ligne noire en pointillés) montre une augmentation de température plus rapide et atteint des températures plus élevées que le "Cas 01" (ligne bleue continue) pendant la phase initiale et intermédiaire. Par exemple, vers 20-30 minutes, le "Cas 03" dépasse le "Cas 01" en température. Finalement, les deux cas convergent vers une température maximale similaire, atteignant un plateau aux alentours de 49-50°C, mais le "Cas 03" atteint cette température stable plus rapidement que le "Cas 01".

## 6.2 Etude stationnaire

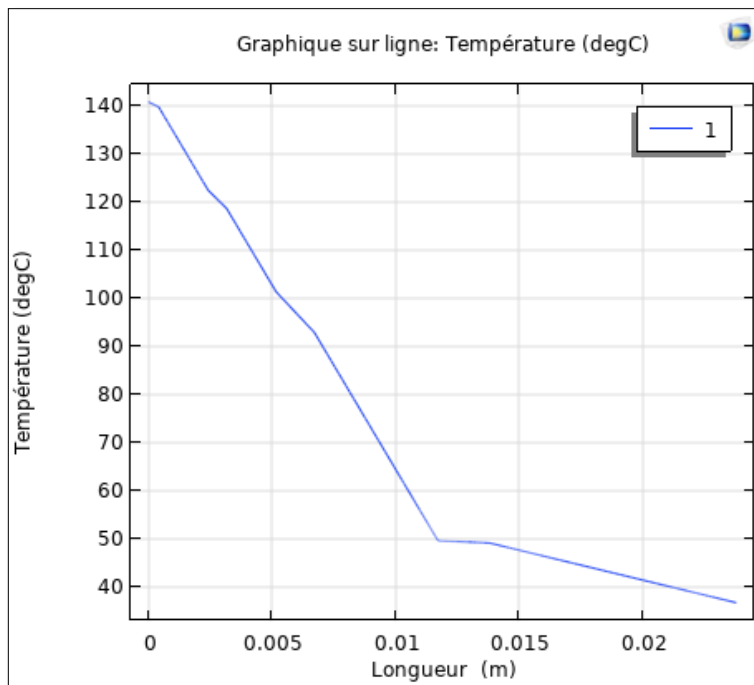


FIGURE IV-18 : ÉVOLUTION DE LA TEMPERATURE PAR RAPPORT LA LONGUEUR POUR LE TROISIEME CAS

La figure IV-18 illustre la variation de la température en degrés Celsius en fonction de la longueur en mètres. On observe une tendance générale à la baisse de la température à mesure que la longueur d'arc augmente. La température débute à environ 140 °C pour une longueur de 0 mètre, puis diminue rapidement, ce qui est indiqué par une pente initiale prononcée. Aux alentours de 0.012 mètre, la courbe présente un changement de comportement notable : la diminution de la température ralentit considérablement, voire se stabilise temporairement, avant de reprendre une légère décroissance. Finalement, à l'extrémité de la plage mesurée, vers 0.022 mètre, la température atteint une valeur approximative de 35 à 40 °C.



### Comparaison avec le cas de base

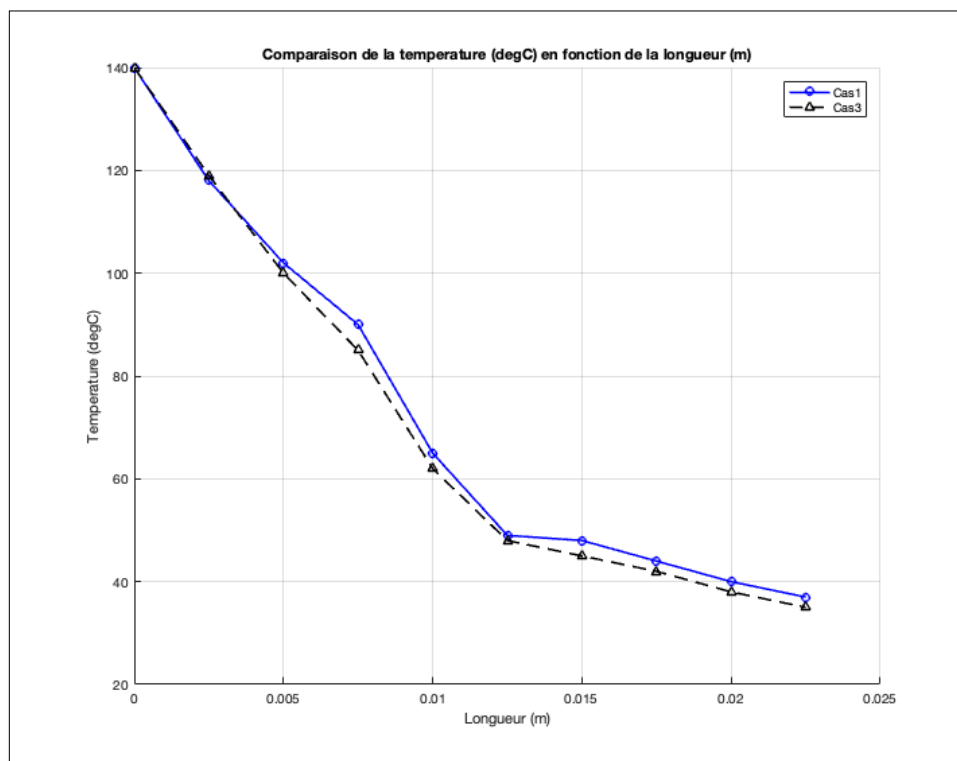


FIGURE IV-19 : ÉVOLUTION THERMIQUE COMPAREE AVEC ET SANS FLUX D'EVAPORATION (ETUDE STATIONNAIRE)

La figure IV-19 présente une comparaison de la température (en degrés Celsius) en fonction de la longueur (en mètres) pour deux scénarios, Cas 1 et Cas 3. Dans les deux cas, la température diminue de manière significative à mesure que la longueur augmente. Les deux courbes commencent à une température initiale similaire, proche de 140°C à une longueur de 0 mètre. Cependant, au-delà du point de départ, le Cas 3 montre systématiquement des températures légèrement inférieures à celles du Cas 1 sur la majeure partie de la plage de longueurs mesurée. Par exemple, vers 0.01 mètre, le Cas 1 est autour de 65°C tandis que le Cas 3 est plus proche de 60°C. À la fin de la mesure, aux alentours de 0.022 mètre, le Cas 3 atteint une température finale d'environ 35°C, tandis que le Cas 1 se stabilise autour de 38°C, indiquant une dissipation thermique légèrement plus prononcée ou une condition finale plus froide pour le Cas 3.

### 6.3 Impact de l'humidité relative sur la température de la peau

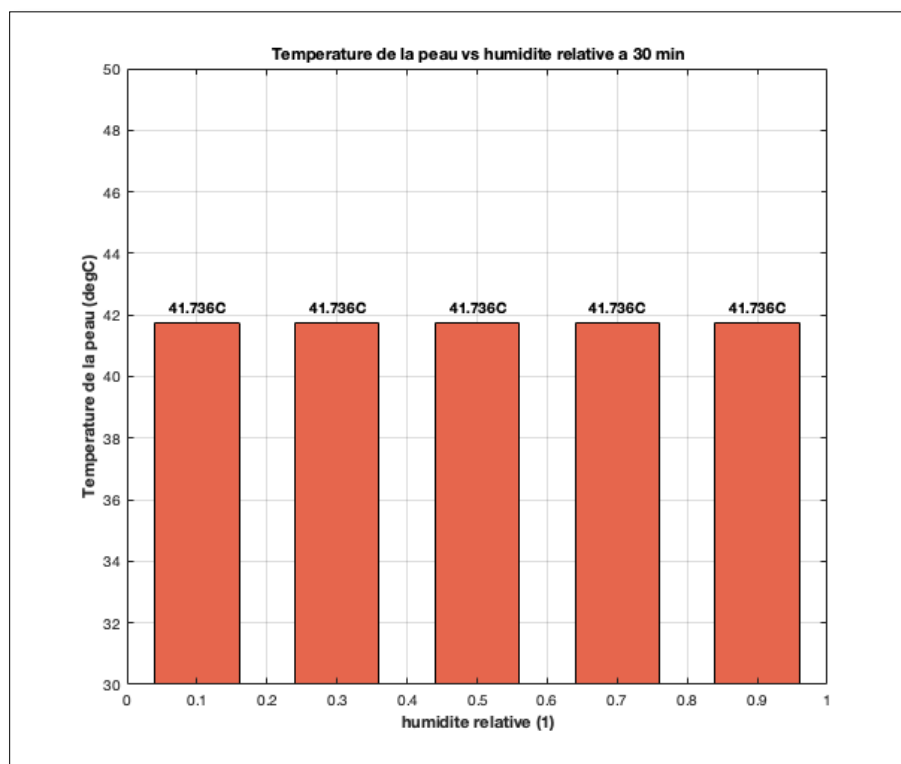


FIGURE IV-20 : HISTOGRAMME DE LA TEMPERATURE EN FONCTION DE L'HUMIDITE RELATIVE A  $T = 30$  MIN

La figure IV-20 illustre l'évolution de la température de la peau en fonction de l'humidité relative de l'air humide. l'instant  $t = 30$  min représente la durée d'exposition du sapeur-pompier face au feu, telle qu'elle a été démontrée par le résultat du cas de base (Fig. IV-7). l'analyse des résultats révèle que, même lorsque l'humidité relative varie largement, allant de 10 % (0,1) à 90 % (0,9), la température de la peau demeure pratiquement inchangée, avec une valeur constante autour de 41,736 °C. Cette stabilité thermique indique que l'humidité de l'air, dans la plage étudiée, n'a pas d'impact significatif sur la transmission de chaleur à travers les couches du vêtement jusqu'à la peau.

### 7. Analyse et comparaison des résultats des trois cas étudiés

Après avoir présenté et discuté séparément les résultats obtenus pour les trois cas simulés dans le logiciel COMSOL Multiphysics à savoir le cas de base, le cas avec porosité, et le cas avec humidité relative il est désormais essentiel de procéder à une analyse comparative globale. Cette étape

permet non seulement de mettre en évidence l'impact de chaque paramètre physique modifié (milieu poreux, humidité), mais aussi d'en dégager des tendances générales en termes de performance thermique des vêtements de protection et de réponse thermique de la peau.

ces comparaisons sont cruciales pour identifier les conditions les susceptibles d'induire des brûlures, évaluer l'efficacité des modifications apportées aux matériaux.

## 7.1 Etude temporel

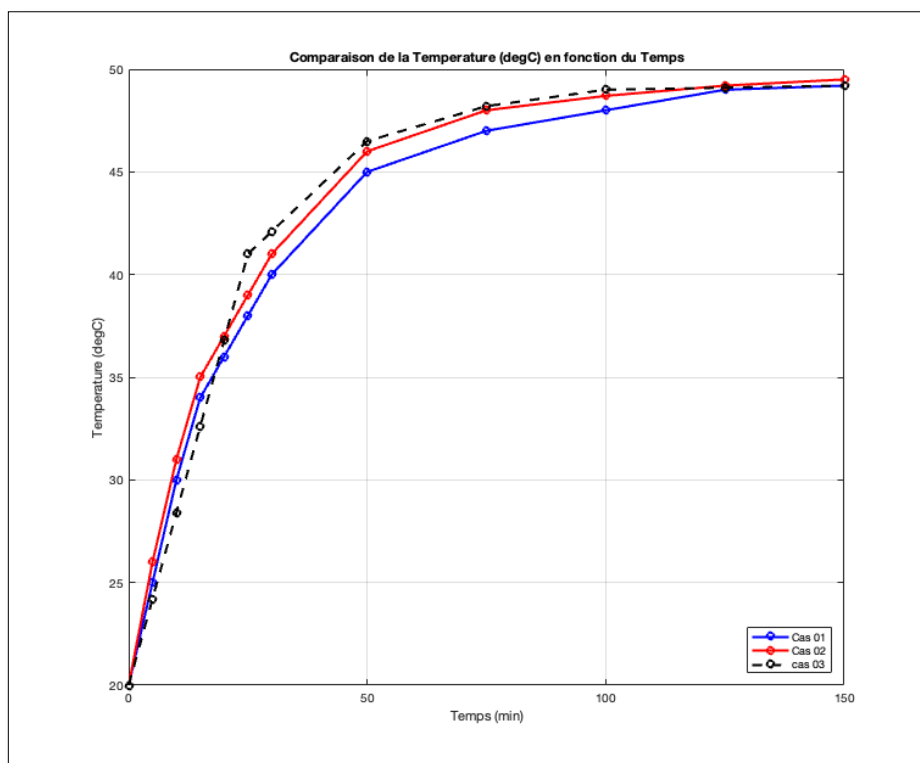


FIGURE IV-21 : ÉVOLUTION DE LA TEMPERATURE EN FONCTION DU TEMPS POUR LES TROIS CAS

La figure IV-21 ci-dessus présente l'évolution de la température en fonction du temps pour trois configurations expérimentales, le cas de base (Cas 01), le cas avec milieu poreux (Cas 02) et le cas avec flux d'évaporation (Cas 03). On observe que le cas 03, intégrant un flux d'évaporation, présente une montée en température plus rapide que les deux autres, en particulier durant la phase initiale (0 à 30 minutes). Le cas 02, quant à lui, montre également une amélioration du transfert thermique par rapport au cas de base, grâce à la présence d'un milieu poreux qui favorise la conduction thermique par la structure interconnectée des pores. Le cas 01, représentant un milieu homogène sans amélioration, présente la montée en température la plus lente. À partir de 100

minutes, les trois courbes convergent vers une température finale similaire ( $\sim 49\text{--}50\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), indiquant que les différences entre les configurations influencent essentiellement la vitesse d'atteinte de l'équilibre thermique, mais ont un impact limité sur la température finale.

## 7.2 Etude stationnaire

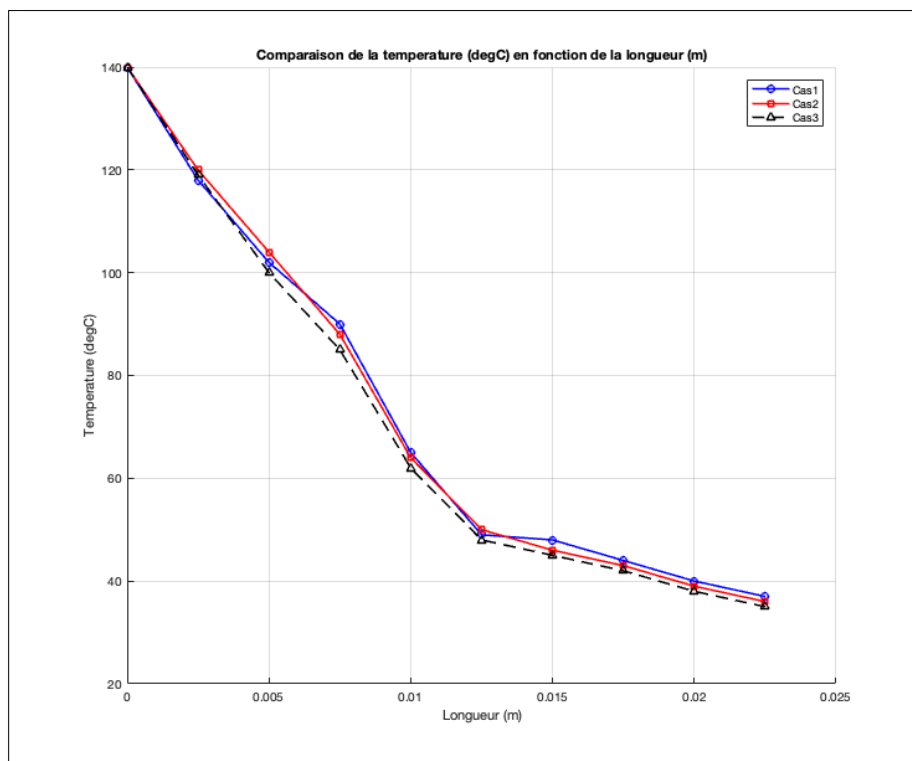


FIGURE IV-22 : ÉVOLUTION DE LA TEMPÉRATURE EN FONCTION DE LA LONGUEUR POUR LES TROIS CAS

La figure IV-22 présentée illustre l'évolution de la température le long d'un système (en fonction de la longueur) pour trois cas, le cas 1 (en bleu) représente le cas de base, le cas 2 (en rouge) intègre un milieu poreux, tandis que le cas 3 (en noir pointillé) prend en compte un flux d'évaporation. À l'entrée du système ( $x = 0\text{ m}$ ), la température initiale est identique pour les trois cas ( $\sim 140\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), garantissant ainsi une base commune de comparaison. Au fur et à mesure que l'on progresse le long de la longueur, une décroissance significative de la température est observée. On note que le cas 3, avec flux d'évaporation, présente la chute de température la plus rapide, particulièrement marquée dans la première moitié du domaine (jusqu'à environ  $0,0125\text{ m}$ ). Le cas 2, comportant un milieu poreux, affiche également une différence par rapport au cas de base. Le cas 1, en l'absence de telles améliorations, conserve des températures plus élevées tout au long du parcours, soulignant un transfert thermique moins performant.

Dans la partie aval (au-delà de 0,015 m), les écarts entre les trois configurations deviennent plus faibles, ce qui suggère une tendance vers un état thermique quasi-uniforme. Cette analyse met en évidence que les modifications apportées au système, notamment l'introduction d'un flux d'évaporation ou d'un milieu poreux, permettent d'améliorer considérablement le refroidissement thermique.

## **8. Conclusion**

L'analyse des résultats obtenus dans cette étude met en évidence la pertinence et la fiabilité du modèle numérique développé pour simuler le comportement thermique d'un système multicouche soumis à un flux thermique. Les différentes simulations, menées à travers trois cas représentatifs (cas de base, cas avec milieu poreux, et cas avec flux d'évaporation), ont permis d'examiner l'impact de plusieurs paramètres physiques sur la distribution de température et la réponse thermique de la peau.

Les courbes obtenues montrent une très bonne concordance avec les résultats de référence issus des travaux de S. Dahmani et Collins. Plus précisément, les températures finales simulées sont très proches de celles observées expérimentalement, avec des écarts ne dépassant que quelques degrés Celsius. Ce faible écart valide le choix des paramètres physiques, des conditions aux limites, ainsi que la qualité du maillage utilisé (notamment le maillage extra-fin qui a montré le meilleur compromis entre précision et réalisme).

La discussion comparative entre les trois cas a révélé que l'introduction d'un milieu poreux et d'un flux d'évaporation améliore significativement la dissipation thermique et accélère l'atteinte de la température d'équilibre, sans pour autant altérer la température finale de manière significative.

Les résultats numériques obtenus sont non seulement cohérents entre eux, mais également très proches des données expérimentales de la littérature, renforçant ainsi la validité du modèle proposé pour prédire le comportement thermique de matériaux de protection en contexte thermique intense.

# CONCLUSION GENERALE

## **CONCLUSION GENERALE**

Dans ce mémoire, le comportement thermique des tenues de protection des sapeurs-pompiers soumis à des flux thermiques intenses a été étudié de manière approfondie à l'aide d'un modèle numérique multicouche tissu/peau implémenté dans COMSOL Multiphysics. L'un des points focaux de cette étude a été l'analyse du temps nécessaire pour que la peau atteigne la température critique de première brûlure, fixée à 44°C, et la comparaison de ces résultats avec les travaux de référence établis par Collins et Dahmani.

Trois cas ont été simulés : un cas de base, un second incluant l'effet de la porosité des matériaux, et un troisième intégrant l'humidité relative. L'étude temporelle et stationnaire de ces cas a permis de comparer les performances thermiques de chaque configuration. Les résultats ont montré une amélioration notable du comportement thermique avec l'introduction des effets de porosité et d'humidité, traduisant une meilleure capacité de retardement de la montée en température au niveau de la peau.

La discussion des résultats a révélé que notre modèle offre des prédictions plus précises et plus réalistes que celles de Dahmani et Collins, notamment en ce qui concerne le temps d'apparition de la première brûlure. En effet, notre modèle permet de retarder plus efficacement l'atteinte du seuil critique de 44 °C, démontrant ainsi une performance thermique supérieure. De plus, les résultats obtenus pour les trois cas étudiés sont plus cohérents et plus proches des données de référence, ce qui atteste de la fiabilité de notre méthodologie numérique.

Les simulations numériques menées ont révélé des performances prometteuses en termes de protection thermique. Plus précisément, les résultats ont démontré que le temps d'arrivée à la température de 44°C est significativement plus long dans le cadre de notre modélisation comparativement aux données présentées par Collins et Dahmani. Cette observation est d'une importance capitale, car un temps d'exposition prolongé avant l'atteinte de cette température critique se traduit directement par une meilleure protection pour le sapeur-pompier, lui offrant une fenêtre d'intervention plus sûre ou un délai supplémentaire pour se retirer d'une situation dangereuse. Cette amélioration du temps de protection peut être attribuée à plusieurs facteurs inhérents à notre modèle, notamment l'optimisation des propriétés thermiques des matériaux utilisés dans le vêtement simulé, ainsi que la prise en compte de conditions aux limites spécifiques qui favorisent une meilleure isolation ou une dissipation thermique plus efficace.

Les études temporelles ont fourni une compréhension dynamique de l'évolution de la température à travers les différentes couches du vêtement et de la peau, permettant d'identifier les phases critiques de transfert de chaleur. Les analyses en régime stationnaire, quant à elles, ont permis de caractériser les états d'équilibre thermique et d'évaluer la performance globale du vêtement sur le long terme. Ces résultats combinés enrichissent considérablement la base de connaissances existante et fournissent des outils précieux pour la conception de vêtements de protection plus sûrs et plus efficaces.



# LES REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

## **LES REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUE**

- [1] : HISTOIRE DU FEU, planche 10p, 12 juin 2006
- [2] : Marlène LAURENT et all, Conception et exploitation des locaux de travail : risque incendie, Projet UE 5 : Facteurs d'ambiance, 2010.
- [3] : DOUA Yacine, BENHALIMA Azzedine, “ Etude de résque d’incendie dan un milieu industrielle (unité production MPP4 H’assi Rmel). Memoire de Master , Université Amar Telidji-Laghout, 2023.
- [4] : Sobane. Fiche 1 d’observation le triangle du feu et les principes d’extinction 2004.
- [5] : Salim DAHAMNI,”Contribution à la caractérisation thermique d’une tenue de pompier”, Thèse de doctorat, Université Hassiba Benbouali de Chlef, 2022.
- [6] : Gassier J, Galasso-Chaudet N, Chaudet V. Je réussis le DEAES. Diplôme d’État accompagnant éducatif et social 2021-2022. Elsevier Masson ; 2020.
- [7] : CHETTOUH Samia, “Modeles numeriques pour l’évaluation deseffects de l’incendie sur l’environnement atmospherique application des logiciels : fluent, aloha”. Memoire de magister , Université el’hadj lakhdar batna, 2009
- [8] : Budnick, E.K., Klein, D.P. and O’Laughlin, R.J., Mobile Home bedroom Fire Studies: The role of Interior Finish, National bureau of standards Interim report (NBSIR) 78-1531, Septembre 1978.
- [9] : J. Rosenfeld, “How are burns categorized.” [Online]. Available: <https://www.rosenfeldinjurylawyers.com/how-burns-categorized.html>. [Accessed: 19-Jan- 2019].
- [10] : T. A. Negawao, “Analyzing and Modelling of Comfort and Protection properties of firefighters protective clothing,” Istanbul Technical University, 2015.
- [11] : Lambert, K. & Desmet, K., L’attaque à l’intérieur-Principe de bases lors des feux compartimentes, 2ème édition, Centre de formation des pompiers de Bruxelles, Belgique, 2009.
- [12] : R. Nute, “Principles of thermally caused injuries,” Prod. Saftey Eng. Newsl., vol. 3, pp. 1–29, 2007.
- [13] : Institut national de santé publique du Québec. (2005). Prévention et soins des brûlures. Gouvernement du Québec

- [14] : Nicolas Petitpierre, Pierre Allemann, Léonard Mossaz, Nicolas Buchs.2002  
Les Brûlés : une approche pluridisciplinaire.
- [15] : L. Jin, K.-A. Hong, H. D. Namb, and K. J. Yoon, “Effect of Thermal Barrier on Thermal Protective Performance of Firefighter Garments,” J. Fiber Bioeng. Informatics, vol. 4, pp. 245–252, 2011.
- [16] : D. Holmes, “Waterproof breathable fabrics,” in Handbook of Technical Textiles, H. A. R and Anand S C, Eds. Woodhead Publishing, 2000, pp. 281–315.
- [17] : F. W. Behmann, “Protection against flames and radiant heat,” in Handbook on clothing, Biomedical effects of Military clothing and study group 7, 2007.
- [18] : Jean-Michel d’HOOP, Maitriser et gérer le risque d’incendie, AFNOR, 2005.
- [19] : Loïc. Thomas, Guy. Archambault, « Sécurité incendie », Collection Mémentos acier, 2005.
- [20] : <https://www.scribd.com/document/366131476/Guides-secu-incendie-interactif-pdf>
- [21] : MALUMA ALUMA Jonas, “Conception et realisation d’un systeme intelligent d’extinction des incendies”, Memoire de magister, Universite libre des pays des grands lacs,2018.
- [22] : CHOULAK Chahinez. CHOULAK Khalida,”Le burn out chez les sapeurs pompiers”, Mémoire de Master, Université Abderrahmane mira de Bejaia,2022
- [23] : Trévisan, N., Etude expérimentale et numérique des interactions entre dispositifs d'évacuation naturelle de fumées et de chaleur et systèmes d'extinction automatique à eau. Thèse de doctorat, Université de Lorraine, France, 2018.
- [24] : KHERICI samira “Securite Incendie”, Mémoire de License, Université des Sciences et de la Technologie d’Oran Mohamed BOUDIAF,2022
- [25] : Australie ;la police enquête sur de nouveau départ de feu (11 Février 2009)
- [26] : Francis Jacques, Méthodologie expérimentale pour la détermination des limites d’emploi des équipements de protection individuelle des sapeurs-pompiers-Application à la lutte contre le feu par des essais sur l’Homme en conditions opérationnelles. Thèse de doctorat, Ecole Nationale Supérieure des Mines, Sainte-Etienne, France, 2008.
- [27] : Jacques, F. (2008). Méthodologie expérimentale pour la détermination des limites d’emploi des équipements de protection individuelle des sapeurs-pompiers – Application à la lutte contre le feu par des essais sur l’Homme en conditions opérationnelles (Doctoral dissertation, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne). HAL Open Science.

- [28] : Rigolot, É., Dupuy, J.-L., Pimont, F., & Ruffault, J. (2020). Les incendies de forêt catastrophiques. *Responsabilité & Environnement*, \*98\*, 29
34. <https://www.annales.org/re/2020/re98/rigolot-et-al.pdf>
- [29] : Fox, D. M., Carrega, P., Ren, Y., Caillouet, P., Bouillon, C., & Robert, S. (2018). How wildfire risk is related to urban planning and Fire Weather Index in SE France (1990–2013). *Science of the Total Environment*, 621, 120–129. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.11.174>
- [30] : Jeschke, M. G., van Baar, M. E., Choudhry, M. A., Chung, K. K., Gibran, N. S., & Logsetty, S. (2020). Burn injury. *Nature Reviews Disease Primers*, \*6\*(11). <https://doi.org/10.1038/s41572-020-0145-5>
- [31] : Abraham, J. P., Plourde, B. D., Vallez, L. J., Nelson-Cheeseman, B. B., Stark, J. R., Sparrow, E. M., & Gorman, J. M. (2018). *Skin Burns*. In D. Shrivastava (Ed.), *Theory and Applications of Heat Transfer in Humans* (pp. 723–739). John Wiley & Sons Ltd.
- [32] : Pais, M.-A., Vasella, M., Matthes, O., Millesi, E., Kobler, A., Breckwoldt, T., Reid, G., Naef, L., Hofmann, L., Watson, J. A., Bühler, P. K., Giovanoli, P., & Kim, B.-S. (2025). *Severe burn injuries and the impact of mental health: Insights from 7 years at Switzerland's leading burn center*. *Internal and Emergency Medicine*. <https://doi.org/10.1007/s11739-025-03887-6>
- [33] : Li, Z., Jiang, M., Xi, M., & Xie, W. (2024). *Epidemiological characteristics and outcomes of special-cause burns: Analysis of 33,619 burn patients in a major regional burn center in China from 2004 to 2021*. *Archives of Public Health*, 82(132). <https://doi.org/10.1186/s13690-024-01360-y>
- [34]: Log, T. (2017). Modeling skin injury from hot spills on clothing. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 14(11), 1374. <https://doi.org/10.3390/ijerph14111374>
- [35] : Bensalem, C., Piloto, P. G. A., & Benarous, A. (2023, October 1–2). *Towards a predictive model for the thermal characterization of firefighter clothing*. 2nd National Conference on Fluid Mechanics, USTHB, Algiers, Algeria.
- [36] : Collin, A., Acem, Z., Pageaux, J., Pinson, S., Magnolini, F., & Charette, H. (2013). Étude du transfert de chaleur au sein de tenues de protection de sapeurs-pompiers. \*CFM 2013 - 21ème Congrès Français de Mécanique\*, Bordeaux, France. HAL Id: hal-03441445. <https://hal.science/hal-03441445v1>

- [37] : Dahamni, S., Benarous, A., & Piloto, P. A. G. (2020). Towards a thermal characterization of a firefighter's protective clothing. *Mechanika*, \*26\*(5), 436-443. <https://doi.org/10.5755/j01.mech.26.5.22532>
- [38] : A. Rahmani, “*The effect of air gap entrapped in firefighter protective garment on thermal behaviour*”. Bragança, Portugal: Polytechnic Institute of Bragança, 2021.
- [39] : Jin, L., Cao, M. L., Yu, W., Hu, J. Y., Yoon, K. J., Park, P. K., & Li, Y. (2018). New approaches to evaluate the performance of firefighter protective clothing materials. *Fire Technology*, 54(3), 1-25. <https://doi.org/10.1007/s10694-018-0730-2>
- [40] : Xu, Susan S., Jonisha Pollard, et Weihuan Zhao. 2025. "Three-Dimensional Heat and Moisture Transfer Analysis for Thermal Protection of Firefighters' Gloves with Phase Change Materials." *International Journal of Occupational Safety and Ergonomics* 31 (1): 214–230. <https://doi.org/10.1080/10803548.2024.2424043>.
- [41]: Zhang Xinyu, Miao Tian, and Jun Li. 2024. “Investigating the Influencing Factors and Prediction Models of Skin Burns for Firefighters’ Occupational Safety.” *International Journal of Occupational Safety and Ergonomics*. <https://doi.org/10.1080/10803548.2024.2327869>.
- [42] : Anthony Collin, Zoubir Acem, Jérémy Pageaux, Sébastien Pinson, Yves Jannot, Francis Magnolini, et Hervé Charette. *Caractérisation thermique des tenues de sapeurs-pompiers*. Communication présentée au Congrès Français de Thermique SFT, Gérardmer, France, mai 2013. <https://hal.univ-lorraine.fr/hal-01446651v1>.
- [43] : Salim Dahamni et Abdallah Benarous, "Vers la caractérisation thermique d’une tenue de protection pour sapeur-pompier," *Nature & Technology Journal A*, no. 18 (2018): 64-70. [https://www.univ-chlef.dz/revenance/issue-18/Article\\_A/Article\\_494.pdf](https://www.univ-chlef.dz/revenance/issue-18/Article_A/Article_494.pdf)
- [44] : Les 3 modes de transfert thermique : <https://jeretiens.net/les-3-transferts-thermiques>
- [45] : Dissipation Thermique Dans Les Composants /Systemes Electroniques Laboratoire «Universitaire des Sciences Appliquées de Cherbourg ».
- [46] : Cours de Technologie « Économies d'énergie » .  
Lien : <https://www.maxicours.com/se/fiche/9/0/442209.html/5e>
- [47] : [www.sonelec.com](http://www.sonelec.com), « Electronique, les radiateurs ».
- [48] : BEHLOUL Ilyes, “Conception et dimensionnement d’un radiateur automobile”, Mémoire de master, Université saad dahlab de blida 1, 2018

[49] : Dissipation Thermique Dans Les Composants /Systemes Electroniques Laboratoire «Universitaire des Sciences Appliquées de Cherbourg ».

Lien : [http://www.nae.fr/wp-content/uploads/2015/07/Etude\\_DissipationThermique.pdf](http://www.nae.fr/wp-content/uploads/2015/07/Etude_DissipationThermique.pdf)

[50] : Bâti concept écologique . Le principe des murs capteurs accumulateurs

Lien : <http://www.bc-maison-ecologique.fr/actualites.le-mur-trombe.html>

[51] : MOKHTARI Mehdi AMAROUCHE Samir ,” Etude d’un système de stockage thermique par chaleur latente à changement de phase : application au refroidissement d’un capteur photovoltaïque”, Mémoire de master académique, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou

[52] : M BEN HAMOUDA : étude, conception et modélisation de la diffusion de la Chaleur dans les tissus biologiques, UNIV QUÉBEC, mars 2015.