HAL
open science

Caractéristation thermique des tenues de sapeurs-pompiers

Anthony Collin, Zoubir Acem, Jérémy Pageaux, Sébastien Pinson, Yves Jannot, Francis Magnolini, Hervé Charette

To cite this version:

Anthony Collin, Zoubir Acem, Jérémy Pageaux, Sébastien Pinson, Yves Jannot, et al.. Caractéristation thermique des tenues de sapeurs-pompiers. Congrès Français de Thermique SFT, Société Française Thermique, May 2013, Gérardmer, France. hal-01446651

HAL Id: hal-01446651

https://hal.univ-lorraine.fr/hal-01446651

Submitted on 26 Jan 2017

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Caractérisation thermique des tenues de sapeurs-pompiers

Anthony Collin[a], Zoubir Acem[a], Jérémy Pageaux[a], Sébastien Pinson[a], Yves Jannot[a], Francis Magnolini[b], Hervé Charette[b]

a : Université de Lorraine, LEMTA, UMR 7563, Vandoeuvre-lès-Nancy, F-54500, France
CNRS, LEMTA, UMR 7563, Vandoeuvre-lès-Nancy, F-54500, France
b : Service Départemental d'Incendie et de Secours de Meurthe et Moselle
Groupement technique et logistique, 75 Rue Lavoisier, Ludres, F-54710, France

Résumé - Cette contribution propose de caractériser les propriétés thermiques et radiatives des tenues de protection des sapeurs-pompiers. Ces textiles sont complexes car ils se présentent sous la forme d'un matériau multicouche. Cette étude met en avant le rôle de la couleur du textile et du mode de teinture sur les propriétés radiatives des vestes montrant que l'absorptivité moyenne est de l'ordre de 80% alors qu'on s'attendrait à une réflectivité élevée ce qui améliorerait le niveau de protection thermique. Cette contribution s'attache également à déterminer la conductivité thermique et la capacité calorifique, estimées approximativement à 0,04 W/m/K et 1200 J/kg/K ce qui confère à la veste, les propriétés d'un bon isolant thermique.

1. Introduction

Lors de leurs interventions (secours à la personne ou lutte contre un incendie), les sapeurs-pompiers sont vêtus d'Équipements de Protection Individuelle (EPI) qui assurent leur intégrité physique durant ces opérations. Parmi ces EPI, la tenue individuelle est un élément important de ce dispositif de protection. Elle se compose d'une veste et d'un sur-pantalon. Pendant de très nombreuses années, le cuir a été utilisé pour confectionner cette veste. Cependant, à la suite de deux événements tragiques en 2002, drames de Neuilly sur Seine (5 décès) et de Loriol sur Drôme (4 morts et 1 disparu), il a été décidé de remplacer les vestes en cuir par des vestes en matière textile pour augmenter les niveaux de protection thermique et signalétique. Cette veste est maintenant constituée d'un matériau multi-couches (3 ou 4 couches selon les fabricants) composées de polymères qui lui confère des propriétés mécaniques et thermiques particulières :

• très résistante mécaniquement aux déchirures,

• imper-respirante (elle permet d'évacuer la sueur mais est imperméable à l'humidité extérieure ou toutes autres agressions chimiques),

• auto-extinguible (en cas de combustion, celle-ci ne sera pas entretenue).

Cependant, en dépit de tous ces points positifs, on continue à recenser chaque année au sein du corps des sapeurs-pompiers des accidents occasionnant des brûlures ou des pertes de connaissance dues au stress. Ces incidents sont potentiellement causés par des problèmes de transfert de chaleur à travers la tenue de protection. Le transfert thermique joue un grand rôle dans ce type d'équipement. En effet, en partant de la source d'incendie vers la tenue de protection, nous pouvons distinguer :

• un transfert thermique par rayonnement et par convection de la source d'incendie vers le sapeur (provenant de la flamme et des parois à haute température),

• un transfert thermique par conduction à l'intérieur de chaque couche qui constitue la veste,

• un transfert thermique par rayonnement, conduction et convection entre chaque couche de textile (couche d'air).

A ces mécanismes peut également se rajouter un phénomène de transport de masse dû à la sueur qui est produite par le sapeur et qui est évacuée vers l'extérieur. L'importance de ces transferts thermiques est, à l'heure actuelle, malheureusement encore mal décrite et donc mal quantifiée ce qui ne permet pas d'assurer un niveau de protection maximale.
La littérature recense de nombreux travaux scientifiques, aussi bien expérimentaux que numériques, portant sur l'analyse de la résistance au feu de ces tenues de protection [1, 2, 3] sans pour autant traiter l'aspect de la protection thermique avant sinistre : il n'existe pas d'études portant sur la quantification des différents modes de transferts thermiques pour ce type de matériaux multi-couches en situation d'approche ou d'attaque de feux.
Ce problème de quantification est assez complexe, compte tenu des caractéristiques géométriques particulières des tenues qui présentent des épaisseurs assez faibles, ce qui limite toutes les études expérimentales sur le sujet. La seule alternative possible pour quantifier les flux de chaleur reste l'approche numérique. Avant de développer un modèle numérique permettant de reproduire les flux de chaleur entre la source, la veste et le sapeur, il est nécessaire de parfaitement connaître les propriétés thermophysiques, équivalentes ou non, des tenues de protection. Concernant les tenues actuellement portées par les sapeurs-pompiers, il existe très peu de données et elles peuvent varier selon le type de fabricant du vêtement. Notons néanmoins, les travaux pionniers de Quintière [4] dans ce domaine, qui s'est attaché à déterminer les propriétés radiatives (réflectivité et transmittivité spectrale) dans la gamme visible-infrarouge de différents textiles : du coton à des revêtements en aramide. Quintière démontre alors que la couleur du textile a très peu d'effet sur le transfert radiatif et que l'humidité présente sur le textile peut jouer un rôle néfaste pour le rayonnement.
Cependant, depuis la parution de ces premiers résultats, les tenues de protection n'ont jamais cessé de se perfectionner et de nouveaux matériaux sont utilisés aujourd'hui qui restent à caractériser. L'objectif de cette étude est de quantifier les propriétés radiatives (absorptivité, réflectivité et transmittivité spectrale), la conductivité thermique et la capacité calorifique des vestes que portent actuellement les sapeurs-pompiers. Cette étude est le fruit d'une collaboration entre le SDIS 54 (Service Départemental d'Incendie et de Secours de Meurthe et Moselle) et le laboratoire LEMTA de Nancy.
Cette contribution est divisée comme suit : la section 2 présente les échantillons utilisés pour la caractérisation. La section 3 s'attache à caractériser les propriétés radiatives des vestes en utilisant des spectromètres UV-visible-Infrarouge. La section 4 s'intéresse à la quantification de la conductivité thermique par une méthode de plaque chaude gardée. Enfin, la section 5 porte sur la détermination de la capacité calorifique.

2. Présentation des échantillons

Pour réaliser cette étude, le SDIS 54 a mis à notre disposition trois vestes actuellement utilisées par les pompiers (Cf. figure 1). Ces vestes sont référencées : veste bleue 1, veste bleue 2 et veste orange (leur dénomination ne sera pas plus explicitée ici pour des raisons de confidentialité). Ces tenues sont issues de différents confectionneurs et sont de couleurs différentes, ce qui permet dans cette étude de mieux mettre en évidence le rôle de la couleur ou celui du fabricant. Comme évoqué en introduction, ces vestes se présentent sous forme d'un matériau multicouche comme le montre la figure 2. Respectivement de gauche à droite, la veste est composée d'une couche d'aramide (auto-extinguible et résistante mécaniquement), d'une couche imper-respirante et pour finir une à deux couches (selon le confectionneur) de garniture afin d'assurer le confort de la veste.
Comme ces vestes ont déjà été utilisées et donc certainement déjà été exposées au feu, trois échantillons ont été prélevés sur la veste bleue 1 afin de déterminer si les propriétés radiatives

Fig.1 - *Veste de pompier*

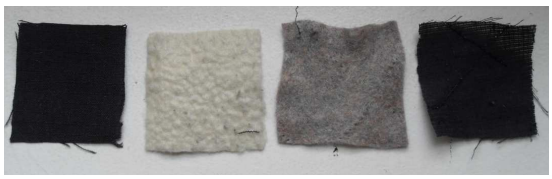

Fig.2 - *Différentes couches - Veste bleue 2*

sont toujours bien homogènes sur la tenue : un échantillon a été découpé à l'avant, un au dos et un sur l'une des manches. Pour chaque échantillon, des mesures ont été réalisées sur chaque couche individuellement, ainsi que sur l'échantillon complet (composé de toutes les couches). Nous n'exposerons ici qu'un ensemble de résultats représentatifs.

3. Étude des propriétés radiatives

La caractérisation des propriétés radiatives consiste en la mesure de la transmission et de la réflexion directionnelle hémisphérique (TDH et RDH) à l'aide d'un spectromètre à transformée de Fourier (FTIR) pour le domaine infrarouge. Cette technique est présentée plus en détails dans [5]. Le dispositif comprend un interféromètre de Michelson (spectromètre FTIR de chez BRUKER), une source de type GLOBAR, une sphère intégrante et un détecteur IR (MCT) permettant l'acquisition dans toute la gamme spectrale allant de 450 à 7000 cm^{-1}. Pour étendre les mesures dans la gamme UV - visible - Proche infrarouge, un second spectromètre, du type CARY UV-Vis-NIR de chez AGILENT TECHNOLOGIES est utilisé.

3.1. Comparaison des différents échantillon de la veste bleue 1

Dans un premier temps, les propriétés radiatives d'échantillons prélevés à différents endroits d'une même veste sont analysées. L'objectif est d'observer l'homogénéité ou l'hétérogénéité de ces propriétés. En effet, au cours d'une intervention de secours, toutes les parties de la veste ne sont pas exposées de la même manière à l'incendie et donc au flux thermique. L'usure plus rapide de certaines zones pourrait induire des différences aux niveaux des propriétés thermiques. La figure 3 présente les propriétés radiatives spectrales (la transmittivité τ_ν, la réflectivité ρ_ν et l'absorptivité α_ν) de trois échantillons prélevés à l'avant, à l'arrière et sur le bras de la veste bleue 1. Il est rappelé que la somme de ces trois grandeurs spectrales doit être égale à 1 : $\alpha_\nu + \rho_\nu + \tau_\nu = 1$.
La figure 3 démontre que les propriétés optiques des trois échantillons sont pratiquement identiques (moins de 25% d'écart au maximum sur la réflectivité spectrale entre les faces arrière et avant). Ceci prouve que le textile de la veste bleue 1 est quasiment homogène vis à vis des propriétés radiatives. On constate également une très faible transmittivité spectrale pour les trois échantillons indiquant que l'essentiel des flux thermiques incidents est soit réfléchi (aspect positif pour le bilan thermique au sein de la veste) soit absorbé (aspect négatif) par la veste. Maximiser la réflectivité spectrale est un objectif important pour augmenter le niveau de protection thermique de la veste.
Concernant le comportement spectral, la réflectivité augmente de façon progressive entre 450 et 6000 cm^{-1} (IR) avec néanmoins deux zones de forte absorption autour de 2000 et 3500 cm^{-1}. Entre 6000 et 10000 cm^{-1} (proche IR), la réflectivité est quasiment constante à une valeur de

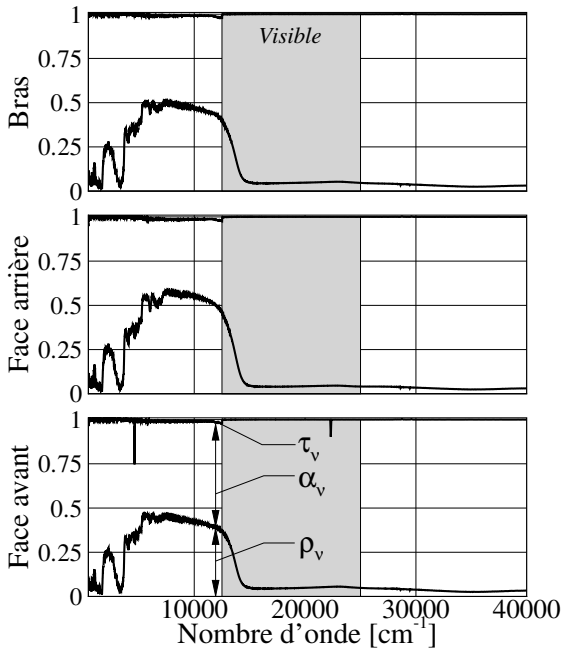

Fig.3 - *Échantillons de la veste bleue 1*

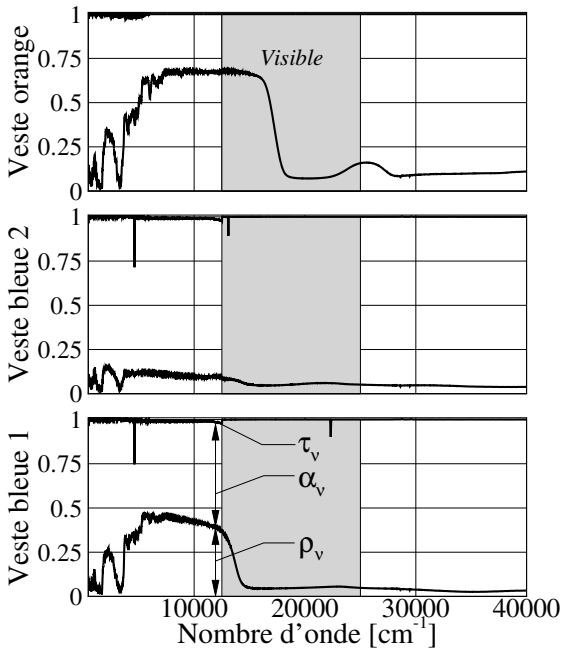

Fig.4 - *Comparaison de différentes vestes*

50% (palier légèrement plus élevé pour l'échantillon "Face arrière"). Ensuite entre 10000 et 12500 cm^{-1} (visible), la réflectivité chute entraînant une augmentation de l'absorptivité spectrale. Au delà de 12500 cm^{-1} (domaines visible et UV), la réflectivité est très faible (environ 5%), l'absorptivité spectrale vaut quasiment 95% et reste constante, démontrant qu'au delà de 12500 cm^{-1}, la veste peut être considérée comme un corps gris (propriétés indépendantes du nombre d'onde).

3.2. Comparaisons des différentes vestes : rôle de la couleur et du mode de teinture

La figure 4 donne l'évolution spectrale des propriétés radiatives des trois vestes étudiées (veste bleue 1, veste bleue 2 et veste orange). Les courbes sont présentées sous une forme cumulative, leur somme donnant 1. L'évolution de la réflectivité spectrale est représentée dans la zone inférieure (entre 0 et la première courbe) puis l'absorptivité spectrale dans la zone intermédiaire (entre les deux courbes) et enfin la transmittivité spectrale comme complément à 1. La première observation concerne la transmittivité spectrale qui est quasiment nulle pour chaque nombre d'onde et chaque veste. Ceci démontre bien que ces tenues de protection constituent une barrière efficace contre le rayonnement provenant d'une source d'incendie ou bien de murs à haute température. Ce rayonnement incident est donc soit réfléchi soit absorbé. La seconde remarque concerne les réflectivités spectrales des vestes bleues 1 et 2 qui sont très différentes notamment dans le domaine IR. Alors que la réflectivité de la veste bleue 1 peut atteindre une valeur de 50%, la réflectivité de la veste bleue 2 stagne elle à une valeur maximale de 15%. Cela démontre que la veste bleue 1 posséde un meilleur niveau de protection thermique dans l'IR que la veste bleue 2, car la conversion du flux radiatif traversant la veste en flux conductif sera moins importante. Cependant, une question reste ouverte concernant l'origine de ces différences. Vraisemblablement, les deux vestes bleues sont composées d'un textile identique et la couleur est commune aux deux tenues. Après une étude plus appronfondie, il s'avère que la différence entre les deux textiles réside uniquement dans le mode de teinture. La veste bleue 1 est teinte en surface (à privilégier), alors que la veste bleue 2 est teinte dans la masse.

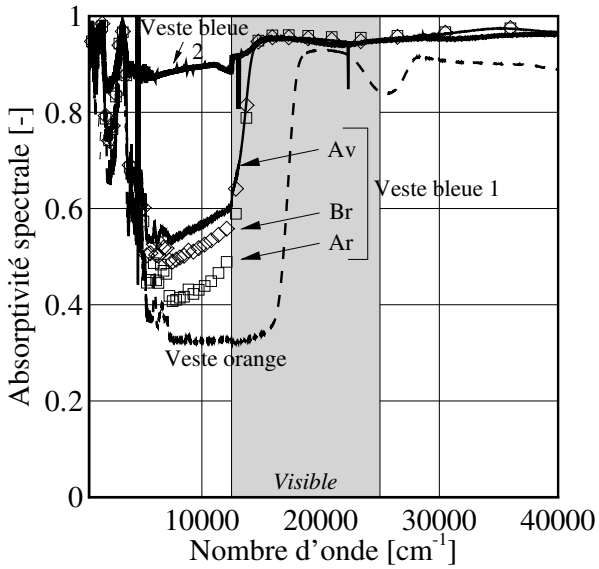

Fig.5 - *Absorptivités spectrales des différents échantillons*

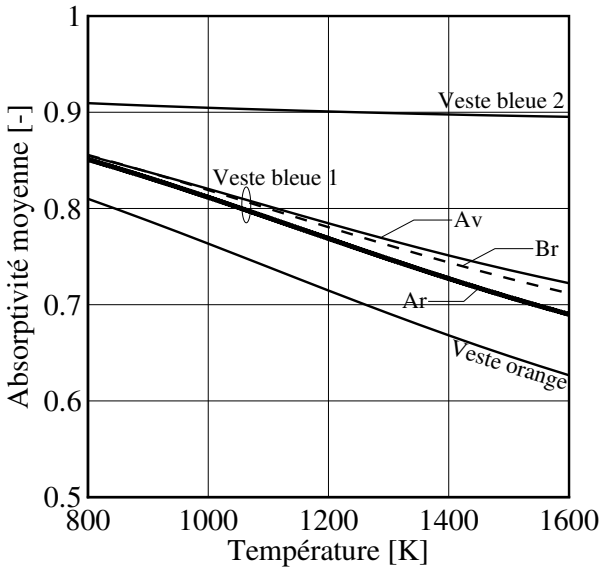

Fig.6 - *Absorptivités moyennes des différentes vestes*

Ainsi, le mode de teinture a une incidence importante sur le niveau de réflectivité spectrale de la tenue et indirectement sur le niveau de protection thermique.
Les propriétés spectrales de la veste orange dans l'IR entre 450 et 6000 cm^{-1} semblent être comparables à celles de la veste bleue 1 avec une réflectivité légèrement supérieure. La réflectivité de la veste orange se stabilise autour de 70% sur une gamme spectrale assez importante (6000 et 15000 cm^{-1}) comparé aux 50% de la veste bleue 1 sur une zone spectrale moins large (6000 et 12500 cm^{-1}). L'élargissement du palier où la réflectivité est la plus importante, explique la teinte plus claire de la veste orange par rapport aux vestes bleues, car elle réfléchit plus de rayonnement dans le domaine visible. Au delà de 15000 cm^{-1}, la réflectivité diminue et se stabilise à un niveau globalement supérieur que celui de la veste bleue 1, de l'ordre de 10%. Les observations précédentes démontrent que la réflectivité spectrale de la veste orange est globalement plus importante que celles des deux autres tenues. Cependant, en terme de protection thermique, le rayonnement d'une source d'incendie est principalement distribué dans le domaine infrarouge, là où les écarts sur les réflectivités étaient faibles. Il est alors complexe de conclure sur le rôle de la couleur sur la protection thermique.
Pour donner quelques éléments de réponse, la figure 5 représente les variations spectrales de l'absorptivité spectrales de chaque échantillon. Ici, la capacité d'absorption du rayonnement incident par les vestes est directement observable. Les vestes sont globalement absorbantes avec une valeur moyenne de 80%. Cependant, la tenue la plus absorbante est la veste bleue 2 (teinte dans la masse) et la moins absorbante la veste orange. Afin de quantifier au mieux l'absorption de chacune de ces tenues, une moyenne de Planck est effectuée sur toute la gamme spectrale de l'absorptivité à l'aide de l'équation (1) :

$$\overline{\alpha} = \frac{\int_{\Delta\nu} \alpha_\nu L_\nu^\circ(T) d\nu}{\int_{\Delta\nu} L_\nu^\circ(T) d\nu} \tag{1}$$

avec $L_\nu^\circ(T)$, la luminance de Planck du corps noir à la température T et $\Delta\nu$ la plage spectrale étudiée. L'hypothèse qui est faite est de considérer que le spectre d'émission d'une flamme d'un incendie suit celui d'un corps noir. Cette hypothèse est discutée dans une contribution récente [6]. Le spectre d'émission spectrale d'une flamme est bien plus complexe mais l'objectif est de

donner des tendances sur le comportement moyen de la veste. Pour chacun des échantillons, le calcul des absorptivités moyennes est effectué à différentes températures T allant de 800 à 1600 K : représentant une large gamme de température de flamme rencontrée dans les feux urbains et les feux de forêts de puissance moyenne. Les résultats sont donnés sur la figure 6. La première observation concerne la diminution de l'absorption moyenne quand la température augmente. Ce comportement s'explique notamment par le décalage du maximum du spectre d'émission de la flamme quand la température augmente vers la zone 5000 à 12500 cm^{-1} là où l'absorptivité spectrale est la plus faible. Ainsi, la veste orange possède l'absorption moyenne la plus faible allant de 0,8 à 0,65 alors qu'elle reste entre 0,7 et 0,85 pour la veste bleue 1 et est supérieure à 0,9 pour la veste bleue 2. Ainsi, si le spectre d'une flamme s'approche du le spectre d'émission d'un corps noir, la veste orange possède la meilleure protection thermique vis à vis du rayonnement.

4. Caractérisation de la conductivité thermique d'une veste

L'étude des propriétés radiatives des tenues de protection a permis de mettre en évidence le caractère opaque (transmittivité quasi-nulle) des vestes de pompier. De ce fait, un flux de chaleur incident est soit réfléchi, soit absorbé (à hauteur de 80% en moyenne). La part absorbée du flux radiatif incident est convertie alors en flux conductif et reste donc importante. Afin de déterminer l'efficacité du transfert de chaleur au sein de ces vestes, il convient donc de caractériser leurs propriétés thermophysiques en commencant par la conductivité thermique. Seuls les résultats obtenus sur la veste bleue 1 seront commentés, car les propriétés obtenues sur les autres tenues varient très peu (moins de 5%). La figure 7 présente l'évolution de la conductivité thermique effective (veste entière) de la veste bleue 1 entre 25 et 40°C obtenue par une méthode classique de plaque chaude gardée [7]. La tenue de protection étant un matériau multicouche, chaque couche est séparée par une lame d'air qui a un rôle très important en terme de résistance thermique. Le premier essai qui est effectué, référencé "Echantillon non compressé", consiste à venir très légerement au contact de l'échantillon avec les deux plaques thermostatées (1,1 cm entre chaque plaque). Une conductivité thermique effective relativement faible est obtenue de l'ordre 0,037 W/m/K à température ambiante et qui augmente très légèrement avec la température. Cette conductivité est donc celle d'un bon matériau isolant.
Néanmoins, les résultats obtenus peuvent être faussés par la prise en compte d'une résistance thermique de contact non désirable. Il est difficile d'assurer un contact parfait entre ces plaques et les différentes faces de l'échantillon à tester sans le compresser et faire disparaître les couches d'air présentes entre chaque couche. De nouveaux essais ont été réalisés en compressant légèrement l'échantillon (0,78 cm entre chaque plaque) afin d'observer qualitativement le rôle indésirable de la résistance de contact sur la valeur estimée de la conductivité thermique effective. Les résultats sont référencés sur la figure 7 par "Echantillon compressé". Les résultats semblent être très proches de ceux obtenus précédemment avec une variation maximale observée de 4%.
La méthode de la plaque chaude gardée, précédemment utilisée, ne permet pas de caractériser individuellement chacune des couches de la tenue de protection du fait de leur faible épaisseur. Une méthode en régime transitoire, dite du tri-couche [8], a été utilisée afin de quantifier les conductivités thermiques de chaque couche. Cette méthode fait intervenir un modèle liant l'évolution des températures aux faces avant et arrière de l'échantillon. L'inversion, par minimisation, de ce modèle permet une estimation simultanée de la conductivité, de la diffusivité thermique, la capacité calorifique volumique de l'échantillon testé, ainsi qu'un coefficient d'échange convectif global aux frontières échantillon / air. Les mesures ont été effectuées sous cloche à température ambiante.

Les résultats de ces expérimentations sont regroupés dans la table 1. La première observation concerne la bonne concordance entre les résultats de la conductivité thermique de la veste complète obtenus par les deux méthodes. La comparaison des valeurs de conductivités thermiques de chaque couche montre que la couche superficielle d'aramide est celle possédant la conductivité la plus importante, de l'ordre de 0,08 W/m/K, soit près du double de celles des autres couches et de celle de la veste complète. Enfin, les coefficients globaux d'échange convectif obtenus sont de l'ordre de 7 W/m^2/K, ce qui parait être le bon ordre de grandeur pour une atmosphère au repos sous cloche.

Echantillon	Conductivité thermique - λ W/m/K	Capacité calorifique volumique - $c_{\mathrm{p}v}$ kJ/m^3/K	Diffusivité thermique - a m^2/	Coefficient d'échange global W/m^2/K
Veste complète	0,038	161,9	$2{,}353{\cdot}10^{-7}$	6,17
Couche extérieure	0,081	708,1	$1{,}145{\cdot}10^{-}7$	8,02
Couche du milieu	0,041	210,5	$1{,}946{\cdot}10^{-7}$	6,96
Couche intérieure	0,038	115,1	$3{,}296{\cdot}10^{-7}$	7,4

Table.1 - *Résultats de la méthode du tri-couche*

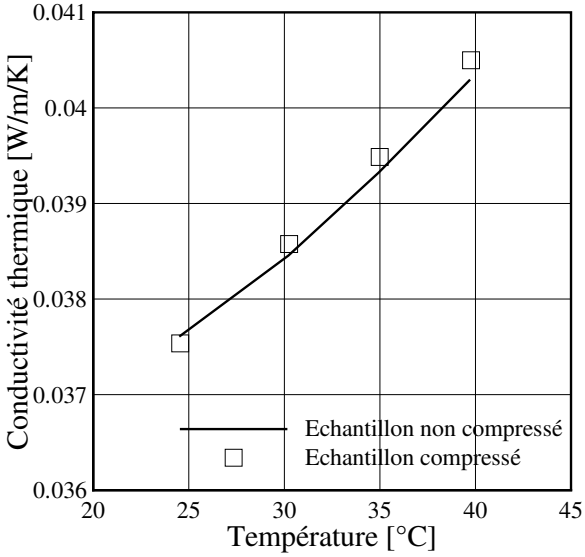

Fig.7 - *Évolution de la conductivité thermique de la veste bleue 1*

Échantillon Couche :	ρ kg/m^3	c_{p} J/kg/K	Écart %
extérieure	605	1187,5	1,3
milieu	212	1296,2	30
intérieure	112	1219,1	19

Table.2 - *Mesure calorimétrique et comparaison avec la méthode du tri-couche*

5. Détermination de la capacité calorifique

Pour déterminer et comparer les résultats obtenus précédemment, une estimation des capacités calorifiques est réalisée par calorimétrie différentielle (DSC). Cette méthode permet notamment de quantifier la capacité calorifique massique de l'échantillon analysé. La masse volumique de chaque échantillon est obtenue en estimant sa masse par pesée et en mesurant son volume (via ses dimensions). A partir des différentes masses volumiques, les résultats obtenus par DSC peuvent être comparés aux valeurs des capacités calorifiques volumiques estimées précédemment par la méthode dite du "tri-couche".
Les résultats concernant les différentes couches de la veste bleue 1 sont résumés dans la table 2. Les résultats obtenus entre les deux méthodes sont concordants pour la couche extérieure en aramide, avec un écart maximal de 1,3%. Par contre, pour les autres couches (centrale et

interne), les écarts sont plus importants allant de 20 à 30%. Ces écarts peuvent s'expliquer par la difficulté de mesurer des cotes géométriques suffisamment fiables sur ces couches (sur l'épaisseur notamment), car elles sont très flexibles. La couche aramide étant beaucoup plus rigide, ses dimensions sont plus simples à mesurer. Ces erreurs entrainent une mauvaise estimation des masses volumiques et par conséquent induisent des écarts considérables sur le calcul des capacités calorifiques volumiques. Néanmoins, les valeurs établies dans la table 2 sont du même ordre de grandeur que celles utilisées dans le travail de Chitrphiromsri et Kuznetsov [1].

6. Conclusion

Cette étude a porté sur la caractérisation des propriétés radiatives et thermiques de tenues de protection utilisées par les sapeurs-pompiers. Ce travail a permis de comparer le rôle de la couleur et du mode de teinture sur l'efficacité de protection contre le rayonnement thermique. Cette contribution a démontré notamment qu'un mode de teinture en surface était plus intéressant pour maximiser la réflectivité spectrale et donc minimiser le transfert de chaleur à l'intérieur de la veste. Cette étude a prouvé que, si le spectre d'une flamme pouvait être représenté par celui d'un corps noir, la quantité du flux radiatif absorbée par la tenue est dépendant de la veste. En moyenne, 80% du flux radiatif incident est absorbé par la veste de protection et est converti en flux conductif.

L'étude des propriétés thermiques a démontré que la conductivité thermique effective de la veste est relativement faible, de l'ordre de 0,037 W/m/K, ce qui en fait un bon isolant thermique. L'estimation de la capacité calorifique de ces textiles a permis d'obtenir une valeur moyenne de 1200 J/kg/K pour la veste complète.

Ce travail expérimental a permis d'approfondir notre connaissance sur les propriétés thermiques des vestes de protection utilisées par les sapeurs-pompiers. La prochaine étape consistera à mettre en place une modélisation du système complet vêtement - peau - métabolisme. Ce modèle permettra de quantifier précisément le niveau de protection de ces vestes en phase d'approche et d'attaque d'un incendie, afin d'estimer des durées maximales d'exposition avant apparition des premières brûlures et de définir de nouvelles pistes pour améliorer le niveau de protection de ces tenues.

Références

[1] P. Chitrphiromsri, A.V. Kuznetsov. Modeling heat and moisture transport in firefighter protective clothing during flash fire exposure. *Heat Mass Trans.*, Vol. 41, pp. 206-215, 2005.

[2] A.M. Raimundo, A.R. Figueiredo. Personal protective clothing and safety of firefighters near a high intensity fire front. *Fire Safety J.*, Vol. 44, pp. 514-521, 2009.

[3] L.K. McCarthy, M. di Marzo. The application of phase change material in fire fighter protective clothing. *Fire Technol.*, Vol. 48, pp. 841-864, 2011.

[4] J. Quintiere. Radiative characteristics of fire fighters' coat fabrics. *Fire Technol.*, Vol. 10, pp. 153-161, 1974.

[5] Z. Acem, G. Parent, B. Monod, G. Jeandel, and P. Boulet. Experimental study in the infrared of the radiative properties of pine needles. *Experimental thermal and fluid science*, Vol. 34, pp. 893-899, 2010.

[6] P. Boulet, G. Parent, Z. Acem, A. Kaiss, Y. Billaud, B. Porterie, Y. Pizzo, and C. Picard, Experimental Investigation of Radiation Emitted by Optically Thin to Optically Thick Wildland Flames, *Journal of Combustion*, Vol. 2011, Article ID 137437, p. 8, 2011.

[7] I. Traoré. Transferts de chaleur et de masse dans les parois des bâtiments à ossature bois. Thèse de Doctorat de l'Université de Lorraine, septembre 2011.

[8] Y. Jannot, A. Degiovanni, G. Payet, Thermal conductivity measurement of insulating materials with a three layers device, International Journal of Heat and Mass Transfer, 52, pp.1105-1111, 2009.