

# Étude du transfert de chaleur au sein de tenues de protection de sapeurs-pompiers

Anthony Collin<sup>a</sup>, Zoubir Acem<sup>a</sup>, Sébastien Pinson<sup>a</sup>, Jérémy Pageaux<sup>a</sup>,  
Francis Magnolini<sup>b</sup>, Hervé Charette<sup>b</sup>

a : LEMTA, Université de Lorraine, CNRS

b : Service Départemental d'Incendie et de Secours de Meurthe et Moselle, SDIS 54, Ludres

Mini-Colloque Feux de végétaux / Feux de compartiments

# Sommaire de l'exposé

Contexte et enjeux de l'étude

Modélisation du transfert de chaleur au sein de la veste

Applications et résultats



# Sommaire de l'exposé

Contexte et enjeux de l'étude

Modélisation du transfert de chaleur au sein de la veste

Applications et résultats



# Contexte et enjeux de l'étude

## Contexte de l'étude

- Retour d'expériences de la part des SDIS concernant plusieurs cas de stress thermique (pertes de connaissance et altération du jugement) et de brûlures sans être au contact d'une flamme,

⇒ *Dans quels cas ce phénomène apparaît-il ?*

## Compréhension de ce phénomène



# Contexte et enjeux de l'étude

## Contexte de l'étude

- Retour d'expériences de la part des SDIS concernant plusieurs cas de stress thermique (pertes de connaissance et altération du jugement) et de brûlures sans être au contact d'une flamme,

⇒ *Dans quels cas ce phénomène apparaît-il ?*

## Compréhension de ce phénomène

- Mise en place de la COMETIC par la DSC en 2009

⇒ *Identifier toutes les formes d'agressions extérieures que rencontre le sapeur-pompier en intervention (EPI, tactiques d'engagement, ...),*

⇒ *Proposer de nouveaux matériaux / nouveaux outils pour aider les sapeurs-pompiers dans leurs opérations,*

## Amélioration des équipements actuels

# Contexte et enjeux de l'étude

## Enjeux et motivations de l'étude

*Améliorer le niveau de protection thermique des tenues de protection  
(en phase d'observation ou d'attaque du feu)*



*Fig. 1 - Veste d'intervention*

# Contexte et enjeux de l'étude

## Enjeux et motivations de l'étude

*Améliorer le niveau de protection thermique des tenues de protection  
(en phase d'observation ou d'attaque du feu)*



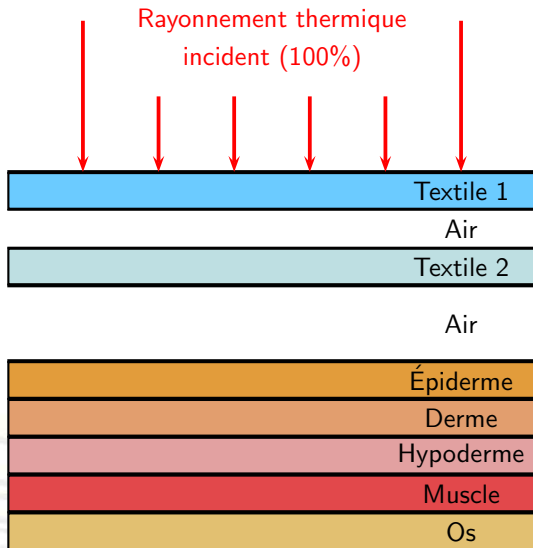
Fig. 1 - Veste d'intervention

Ces tenues textiles doivent répondre à la norme NF EN 469 :

- Propagation de flamme limitée (EN 532),
- Transmission de chaleur suite à l'exposition à la flamme (EN 366 / EN 367),
- Résistance à la traction (sous flux thermique incident / aux produits chimiques liquides),
- Imperméabilité à l'eau,
- Perméabilité à la vapeur d'eau

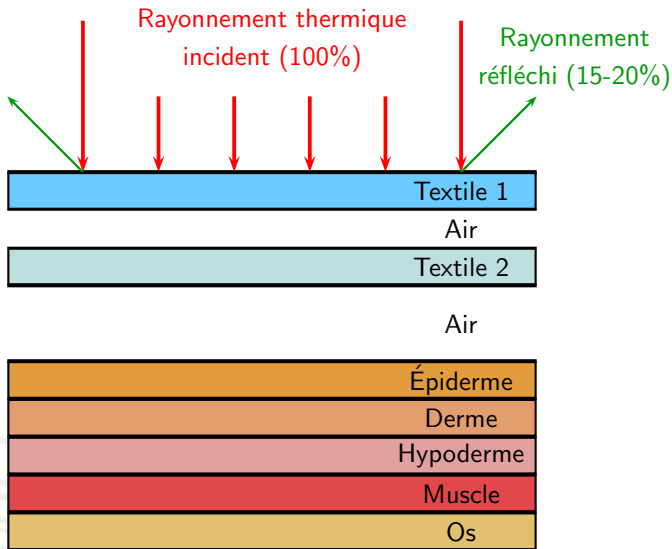
**Pas de norme spécifique sur la phase d'approche / d'attaque du feu**

## Contexte et enjeux de l'étude

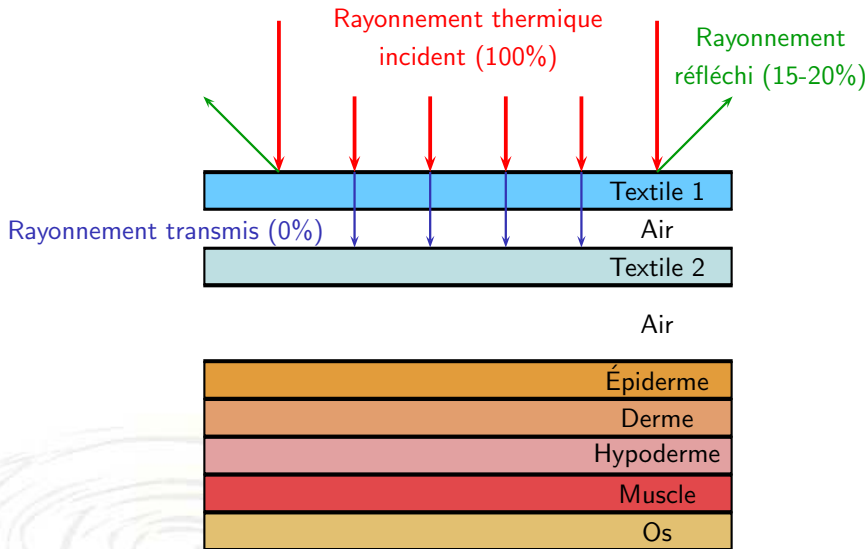




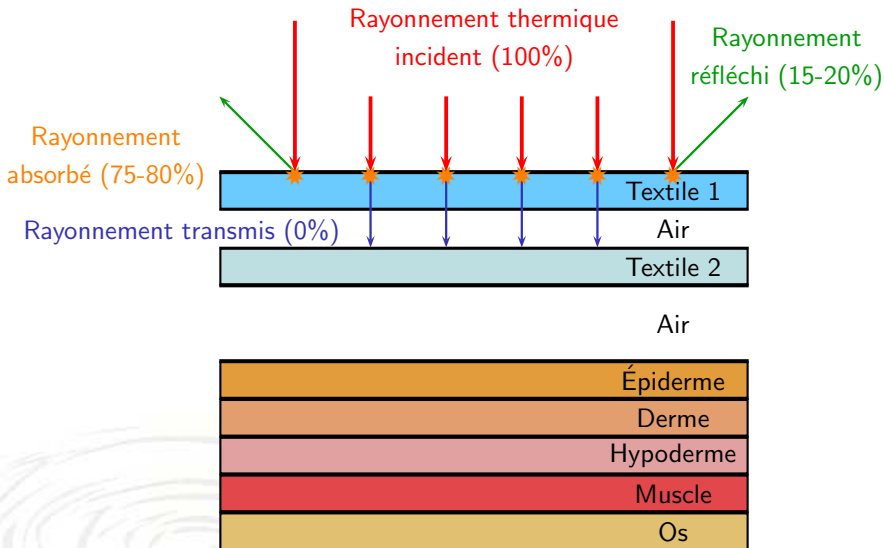
## Contexte et enjeux de l'étude



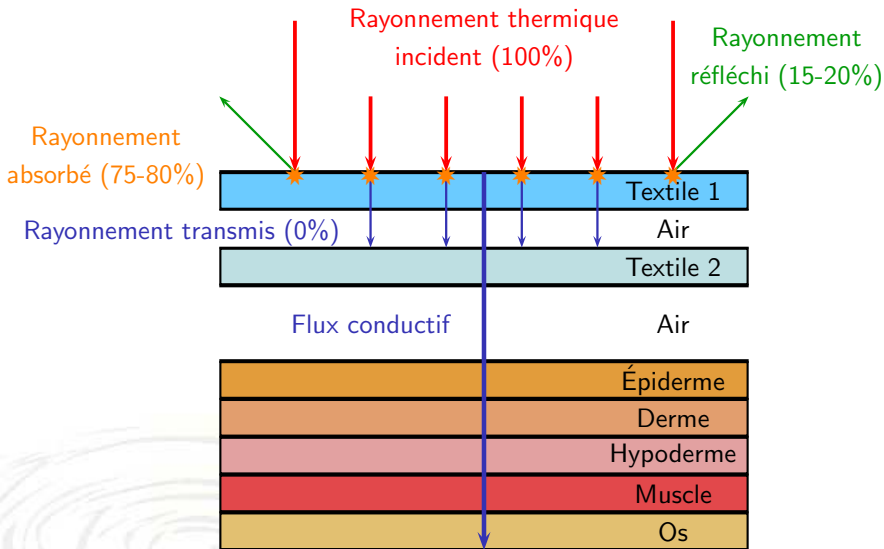
## Contexte et enjeux de l'étude



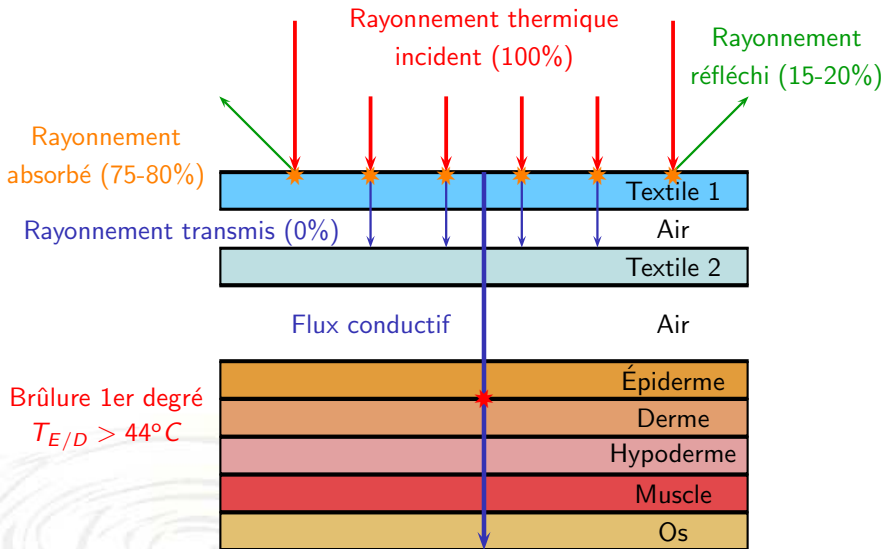
## Contexte et enjeux de l'étude



## Contexte et enjeux de l'étude



## Contexte et enjeux de l'étude



# Sommaire de l'exposé

Contexte et enjeux de l'étude

Modélisation du transfert de chaleur au sein de la veste

Applications et résultats



# Modélisation du transfert de chaleur au sein de la veste

- Objectif : Être capable de prédire l'apparition et le temps d'apparition de brûlures pour un flux radiatif donné.



# Modélisation du transfert de chaleur au sein de la veste

- Objectif : Être capable de prédire l'apparition et le temps d'apparition de brûlures pour un flux radiatif donné.
- Hypothèses :
  - Milieu monodimensionnel,
  - Pas de transfert par convection entre les lames d'air,
  - Humidité constante au sein de chaque couche d'air,
  - Les couches d'air sont transparentes au rayonnement thermique,





# Modélisation du transfert de chaleur au sein de la veste

- Objectif : Être capable de prédire l'apparition et le temps d'apparition de brûlures pour un flux radiatif donné.
- Hypothèses :
  - Milieu monodimensionnel,
  - Pas de transfert par convection entre les lames d'air,
  - Humidité constante au sein de chaque couche d'air,
  - Les couches d'air sont transparentes au rayonnement thermique,

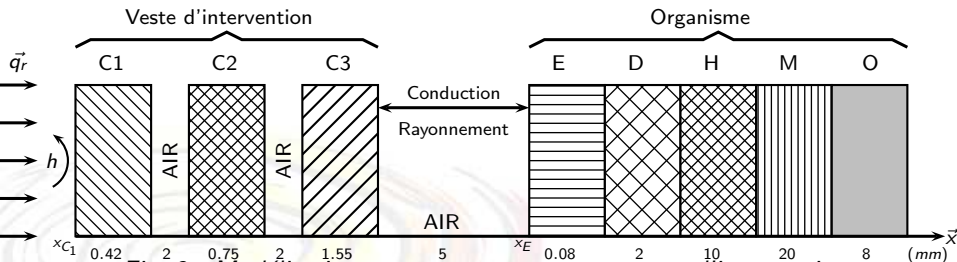
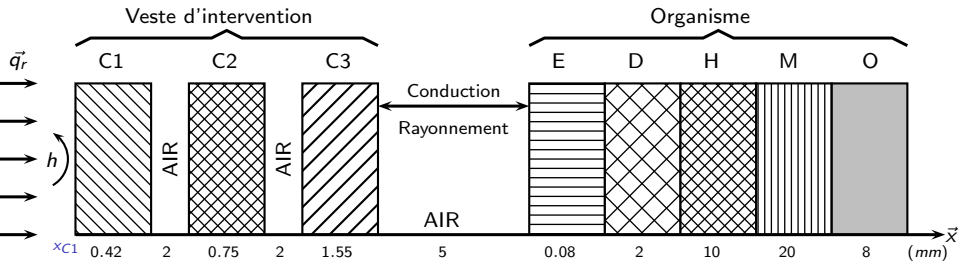


Fig. 3 - Modélisation prenant en compte une veste d'intervention

# Modélisation du transfert de chaleur au sein de la veste

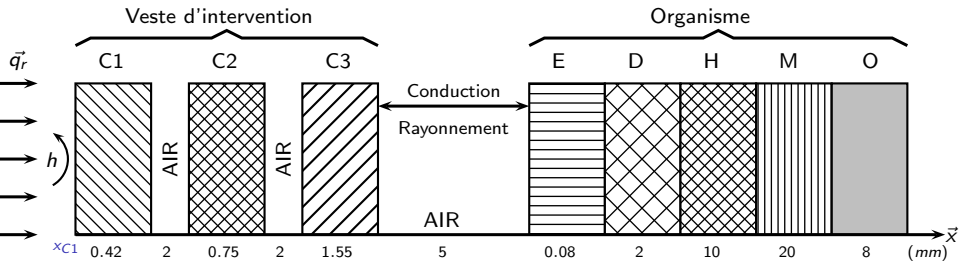


- Condition aux limites - extérieur / C1 :

$$(h + h_r)(T_\infty - T(x_{C1}, t)) + \alpha_{C1} q_r = -\lambda_{C1} \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x_{C1}}$$

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

# Modélisation du transfert de chaleur au sein de la veste



- Condition aux limites - extérieur / C1 :

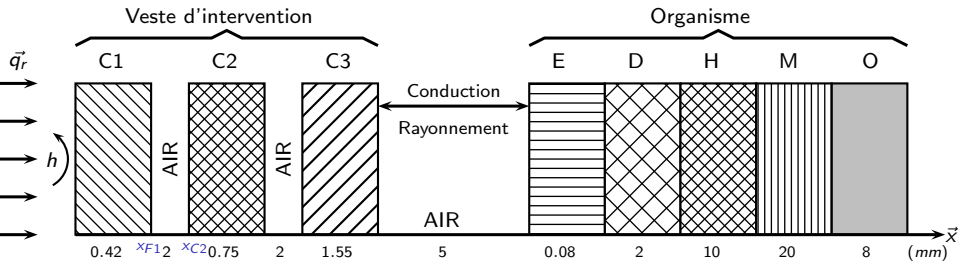
$$(h + h_r)(T_\infty - T(x_{C1}, t)) + \alpha_{C1} q_r = -\lambda_{C1} \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x_{C1}}$$

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

- Transfert de chaleur par conduction monodimensionnel dans couche textile :

$$\rho_{Ci} c_{pCi} \frac{\partial T(x, t)}{\partial t} = \lambda_{Ci} \frac{\partial^2 T(x, t)}{\partial x^2}$$

# Modélisation du transfert de chaleur au sein de la veste

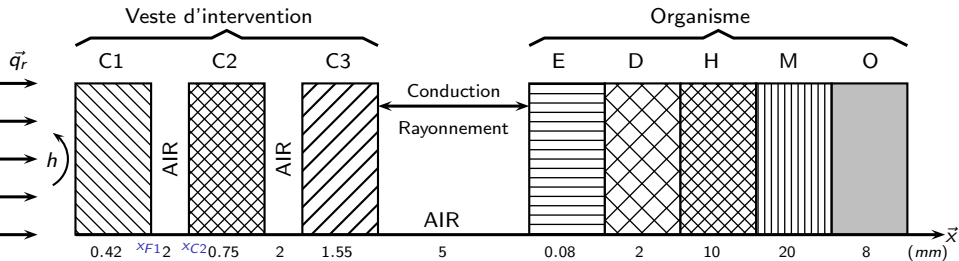


- Condition aux limites - couche textile / air (1ère couche) :

$$-\lambda_{C1} \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x_{F1} \text{ textile}} = -\lambda_{air} \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x_{F1} \text{ air}} + \alpha_{app} \sigma (T^4(x_{F1}, t) - T^4(x_{C2}, t))$$

$$\text{avec } \alpha_{app} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{C1}} + \frac{1}{\alpha_{C2}} - 1}$$

# Modélisation du transfert de chaleur au sein de la veste



- Condition aux limites - couche textile / air (1ère couche) :

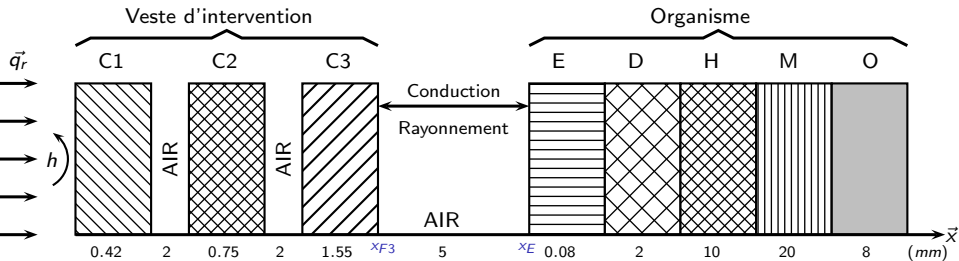
$$-\lambda_{C1} \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x_{F1} \text{ textile}} = -\lambda_{air} \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x_{F1} \text{ air}} + \alpha_{app} \sigma (T^4(x_{F1}, t) - T^4(x_{C2}, t))$$

$$\text{avec } \alpha_{app} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{C1}} + \frac{1}{\alpha_{C2}} - 1}$$

- Transfert de chaleur par conduction monodimensionnel dans couche d'air :

$$\rho_{air} c_{pair} \frac{\partial T(x, t)}{\partial t} = \lambda_{air} \frac{\partial^2 T(x, t)}{\partial x^2}$$

# Modélisation du transfert de chaleur au sein de la veste

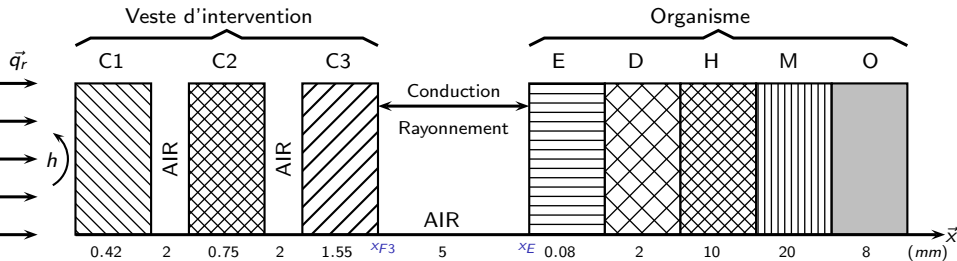


- Condition aux limites - air / épiderme :

$$-\lambda_E \left. \frac{\partial T(x, t)}{\partial x} \right|_{x=x_E \text{ peau}} = -(3,054 + 16,7h_c w_p) (P_{sat}(T_{x_E}) - HR_{air} * P_{sat}(T_{air})) + Q_{ech}$$

$$\text{avec } Q_{ech} = -\lambda_{air} \left. \frac{\partial T(x, t)}{\partial x} \right|_{x=x_E \text{ air}} + \alpha_{app} \sigma (T^4(x_{F3}, t) - T^4(x_E, t))$$

# Modélisation du transfert de chaleur au sein de la veste



- Condition aux limites - air / épiderme :

$$-\lambda_E \frac{\partial T(x, t)}{\partial x} \Big|_{x=x_E \text{ peau}} = -(3,054 + 16,7h_c w_p) (P_{sat}(T_{x_E}) - HR_{air} * P_{sat}(T_{air})) + Q_{ech}$$

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

- Transfert de chaleur monodimensionnel - Modèle de Pennes :

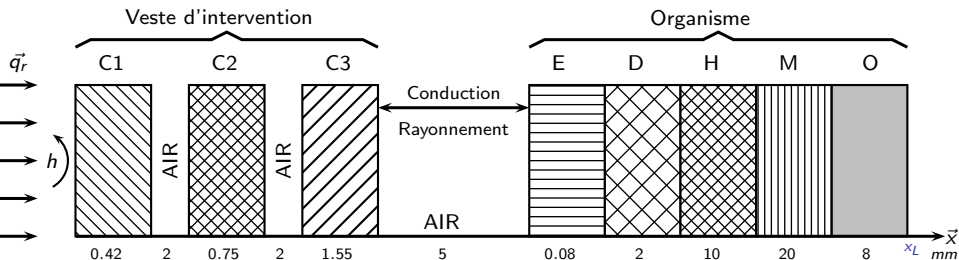
$$\rho c_p \frac{\partial T(x, t)}{\partial t} = \lambda \frac{\partial^2 T(x, t)}{\partial x^2} + q_{met} + w_s c_s \rho_s (T_{art} - T(x, t))$$

# Modélisation du trater-deuehdal-ed a-u-eil-nu-deul-ete e-A





# Modélisation du transfert de chaleur au sein de la veste



- Condition aux limites entre chaque couche de peau :

Continuité du flux conductif et continuité de la température

- Condition aux limites côté droit :

Condition de Dirichlet,  $T(x_L, t) = T_{art}$

## Critères de brûlures

- Utilisation du critère de de Henriques et Morritz (1947),

- Si  $T_{E/D} = 44^{\circ}\text{C}$ , apparition d'une brûlure du 1er degré,

$$\frac{\partial \Omega}{\partial t} = P \exp\left(-\frac{\Delta E}{RT_{E/D}}\right), \text{ quand } T_{E/D} \geq 44^{\circ}\text{C avec } \Omega(t=0) = 0$$

- Si  $\Omega = 0,53$ , apparition d'une brûlure du 2nd degré,

- Si  $\Omega = 1$ , apparition d'une brûlure du 3ème degré,

- Si  $\Omega = 4 \cdot 10^4$ , apparition d'une brûlure du 4ème degré.

# Sommaire de l'exposé

Contexte et enjeux de l'étude

Modélisation du transfert de chaleur au sein de la veste

Applications et résultats



# Applications et résultats

- **Configurations testées :**

- Peau seule, - Peau seule + tricot, - Peau seule + veste d'intervention,



## Applications et résultats

- **Configurations testées :**

- Peau seule, - Peau seule + tricot, - Peau seule + veste d'intervention,

- **Conditions extérieures :**

$$T_{\infty} = 20^{\circ}\text{C}, h = 4\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1} \text{ et } T_{art} = 36,8^{\circ}\text{C}$$

Flux radiatif provenant de la flamme : 0 - 2,3 - 6,3 - 7 - 8,4 - 10  $\text{kW}\cdot\text{m}^{-2}$



# Applications et résultats

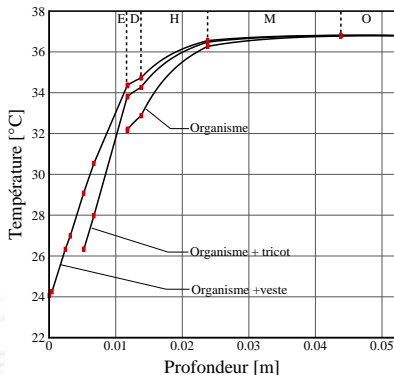
- **Configurations testées :**

- Peau seule, - Pe02id(031(l)-4.20841-35(02id(031(68(e)-2(+.0551536(-4.00.35W



# Applications et résultats

## Cas sans flux radiatif incident (conditions initiales)



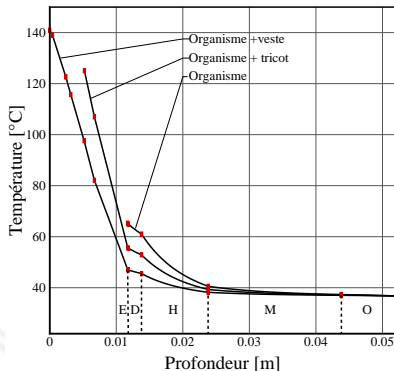
- Peau seule :  $T_{\text{épiderme}} \approx 32^{\circ}\text{C}$   
(résultat similaire à celui obtenu par un thermocouple dans les mêmes conditions),
- Peau + tricot :  $T_{\text{épiderme}} \approx 33,8^{\circ}\text{C}$ ,
- Peau + veste :  $T_{\text{épiderme}} \approx 34,5^{\circ}\text{C}$ ,
- Rôle important de l'isolation thermique ( $\Delta T_{\text{tricot}} \approx 7,5^{\circ}\text{C}$  et  $\Delta T_{\text{veste}} \approx 10^{\circ}\text{C}$ ).

# Applications et résultats

## Cas d'un flux radiatif incident $2,3 \text{ kW.m}^{-2}$ (régime permanent)

- Peau seule :  $T_{\text{épiderme}} \approx 66^{\circ}\text{C}$ ,
- Peau + tricot :  $T_{\text{épiderme}} \approx 56^{\circ}\text{C}$ ,
- Peau + veste :  $T_{\text{épiderme}} \approx 49^{\circ}\text{C}$ ,
- Gradients thermiques importants :  
 $\Delta T_{\text{tricot}} \approx 70^{\circ}\text{C}$  et  $\Delta T_{\text{veste}} \approx 91^{\circ}\text{C}$ ,

⇒ Dans tous les cas : apparitions de brûlures





# Applications et résultats

## Temps d'apparition [s] des brûlures pour un flux radiatif incident $2,3 \text{ kW.m}^{-2}$

Brûlure :	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	<i>jamais</i>	<i>jamais</i>

## Applications et résultats

### Temps d'apparition [s] des brûlures pour un flux radiatif incident $2,3 \text{ kW.m}^{-2}$

Brûlure :	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	<i>jamais</i>	<i>jamais</i>

### Temps d'apparition [s] des brûlures pour différents flux radiatifs incidents (système peau + veste)

Densité de flux [ $\text{kW.m}^{-2}$ ]	2,3	6,3	7	8,4	10
Brûlure du 2 <sup>nd</sup> degré	3273	280	175	8	0

## Conclusions et perspectives

- **Meilleure connaissance des échanges thermiques au sein d'une tenue de protection**

Possibilité d'apparitions de brûlures sans contact direct avec une flamme,

Mise en avant du rôle important de protection thermique de la part des tenues de protection (avec l'identification d'une faiblesse ...),

- **Pour la suite ...**

Développer le modèle physique en prenant en compte la variation d'humidité,

Confronter le modèle à des résultats expérimentaux,

- **Pour l'avenir ...**

Prendre en compte des conditions réelles d'exposition pour le sapeur-pompier (Cf. expérimentations sur caisson feu, SDIS 85)

Définir les paramètres les plus sensibles qui permettront de faciliter et de sécuriser le travail des sapeurs-pompiers.

# Étude du transfert de chaleur au sein de tenues de protection de sapeurs-pompiers

Anthony Collin<sup>a</sup>, Zoubir Acem<sup>a</sup>, Sébastien Pinson<sup>a</sup>, Jérémy Pageaux<sup>a</sup>,  
Francis Magnolini<sup>b</sup>, Hervé Charette<sup>b</sup>

a : LEMTA, Université de Lorraine, CNRS

b : Service Départemental d'Incendie et de Secours de Meurthe et Moselle, SDIS 54, Ludres

Mini-Colloque Feux de végétaux / Feux de compartiments