

Etude d'un capteur adapté à la métrologie des feux de forêts

Khaled CHETEHOUNA, Alain DEGIOVANNI, Olivier SERO-GUILLAUME

LEMETA, INPL-UHP Nancy 1, URA CNRS 875 – 2, avenue de la forêt de Haye, B.P 160, 54516 Vandoeuvre cedex, France.

Résumé - Cette étude présente la mise au point d'un dispositif destiné à évaluer certaines grandeurs physiques lors d'un incendie de forêt (flux radiatif, température du gaz et sa vitesse). La description et la présentation technique de cet appareil ainsi que deux modèles thermiques (un complet et un réduit) sont proposés au cours de ce travail. L'estimation du flux de chaleur imposé a permis d'élaborer un modèle, appelé, modèle d'identification. Une étude de sensibilité aux paramètres du modèle réduit est présentée.

Nomenclature

a diffusivité thermique du matériau, $m^2.s^{-1}$	<i>Symboles grecs</i>
T température, $^{\circ}C$	ρ masse volumique, $kg.m^{-3}$
R, C_{ac}, r, R_{e1} et R_{e2} paramètres du modèle complet	φ_0 densité de flux de chaleur, $W.m^{-2}$
R, C_{ac}, R_e paramètres du modèle réduit	σ_b écart type de bruit de mesure, $^{\circ}C$
X_j^* vecteur de sensibilité réduit	ξ vecteur des paramètres
k conductivité thermique, $W.m^{-1}.K^{-1}$	<i>Indices et exposants</i>
h coefficient d'échange, $W.m^{-2}.K^{-1}$	ac Acier
S surface du cuivre, m^2	cu Cuivre
	e environnement

1. Introduction

Chaque année, les incendies de forêts sévissent à travers le monde et parcourent ainsi plusieurs centaines de milliers d'hectares. Leur passage dévastateur occasionne de lourds et nombreux dégâts. La flore, la faune, les biens matériels et parfois même les vies humaines ne sont pas épargnés. Pour protéger ces biens précieux et améliorer la lutte, il a donc été nécessaire de comprendre et d'approfondir les mécanismes de propagation d'un feu [1]-[2]. Plusieurs types de modèles de propagation de feu ont été développés, classés par ordre de complexité croissante, ce sont :

- 1)- les modèles *Statistiques* de type automates cellulaires : la forêt est divisée en sites pouvant prendre trois états (non brûlé, en feu, brûlé); ces états sont modifiés de façon probabiliste compte tenu de l'état des sites voisins. Ces modèles fournissent des codes extrêmement rapides, mais il est assez difficile de relier les transitions de probabilité des sites en fonction de paramètres physiques (vent, humidité, pente etc...).
- 2)- les modèles *Empiriques* [3] : la vitesse de propagation est déterminée en laboratoire en fonction de paramètres (vent, humidité, pente etc...), par un bilan local d'énergie. Ces modèles fournissent aussi des simulations rapides, mais la base de données expérimentales à établir est énorme. Pour des raisons de similitude physique, les expériences de laboratoire ne

représentent pas nécessairement les feux réels, les corrélations obtenues sont donc difficilement utilisables.

3)- les modèles "*Physiques complets*" [4]-[5] : la végétation est considérée comme un milieu multiphasique. Les relations de conservation de la masse, de la quantité de mouvement et de l'énergie sont écrites sur les grandeurs moyennes et des relations de fermeture sont utilisées.

La "validation" des modèles de types 1) ou 2) repose uniquement sur l'identification de la vitesse de propagation du front de feu qui est la seule sortie de ces modèles. Les modèles de type 3) fournissent les champs de vitesse des gaz ainsi que le champ thermique. Il est alors nécessaire d'essayer de déterminer expérimentalement ce dernier.

Dans cette optique, nous proposons d'implanter sur le site plusieurs instruments de mesure de températures et de flux de chaleur du même type. Ils visent à mesurer les données nécessaires pour l'évaluation de certaines grandeurs physiques intervenant lors d'un incendie de forêt telles que : le flux radiatif incident, la température du gaz induit par la flamme ainsi que sa vitesse.

La présente communication se propose d'étudier un prototype de cet instrument de mesure, fabriqué au sein de notre laboratoire.

2. Description du capteur

Le capteur que nous avons fabriqué au LEMTA (*figure 1*) répond aux conditions suivantes :

- Son échelle caractéristique est adaptée à celle utilisée par les modèles type 3)
- Il doit identifier les flux de chaleur.
- Il doit permettre l'évaluation moyenne du flux radiatif incident.
- Il doit permettre aussi l'évaluation moyenne de la température du gaz induit par la flamme ainsi que sa vitesse.
- Il a un faible coût.
- Il ne doit pas être détruit par le passage du feu.

2.1. Présentation technique

Le capteur est constitué d'une armature en acier, d'une couche d'isolant thermique haute température, de couches de colle, de 4 plaquettes de cuivre et de 9 thermocouples gainés type K (*figure 2*).

Les caractéristiques physiques et les propriétés thermiques de chaque élément de ce capteur sont données dans le tableau 1 ci-dessous :

Tableau 1: *Caractéristiques physiques et thermiques du capteur*

	<i>Epaisseur</i>	<i>Dimensions</i>	<i>Hauteur</i>	<i>k</i>	ρ	<i>a</i>
	<i>mm</i>	<i>mm²</i>	<i>cm</i>	<i>W/m^oK</i>	<i>kg/m³</i>	<i>m²/s</i>
Acier	2	50 x 50	20	46	7850	0,12 .10 ⁻⁴
Cuivre	1	40 x 40	/	389	8940	1,14 .10 ⁻⁴
Isolant	6	62 x 62	20	0,10-0,23	288	/
Colle	5	40 x 40	/	0,29	/	/
Thermocouples	Gainés de diamètre 1 mm					

3. Modélisation du capteur

3.1. Modèle complet

Nous avons représenté ce capteur par un schéma analogique (*figure 3*), ce dernier a permis de mettre en évidence cinq paramètres R, C_{ac}, r, R_{e_1} et R_{e_2} modélisant les échanges thermiques entre les différents éléments du capteur.

3.2. Modèle réduit

Pour réduire le nombre des paramètres, nous avons supprimé le paramètre r et considéré la température de la structure en acier uniforme (hypothèse validée par le petit écart entre les températures des faces d'acier) et remplacé les résistances R_{e_1} et R_{e_2} par une résistance équivalente R_e (*figure 4*).

4. Expériences et modèle d'identification

Nous avons mené au laboratoire 12 expériences d'identification en imposant sur chaque plaquette de cuivre trois échelons de flux de chaleur : $\varphi_0^{(1)} = 1,10 \text{ kW/m}^2$, $\varphi_0^{(2)} = 2,06 \text{ kW/m}^2$ et $\varphi_0^{(3)} = 3,12 \text{ kW/m}^2$. Lors de l'estimation de ces trois valeurs de flux, nous avons constaté qu'il faut introduire une résistance supplémentaire $R_c = 60 \text{ K/W}$ modélisant le contact imparfait entre les plaquettes de cuivre et la source de chaleur. Nous proposons par la suite un modèle, appelé, *modèle d'identification* (*figure 5*) qui va permettre d'estimer les paramètres, inconnus, du modèle réduit R, C_{ac} et R_e .

5. Estimation des paramètres et étude de sensibilité

La solution du modèle d'identification est le couple de valeurs de température de la plaquette de cuivre et de la barre d'acier, soit :

$$\theta_{cu}(t) = T_{cu} - T_{ref} = K_1 \varphi_0 \{1 - \beta_3 e^{-\beta_1 t} - (1 - \beta_3) e^{-\beta_2 t}\} \quad (1)$$

$$\theta_{Ac}(t) = T_{Ac} - T_{ref} = K_1 \varphi_0 \{1 - \alpha_3 e^{-\alpha_1 t} - (1 - \alpha_3) e^{-\alpha_2 t}\} \quad (2)$$

où $K_1, \beta_1, \beta_2, \beta_3; K_1, \alpha_1, \alpha_2$ et α_3 sont des fonctions aux paramètres inconnus.

5.1. Méthode d'estimation

La méthode des moindres carrés non linéaires est utilisée pour l'estimation expérimentale des paramètres inconnus tout en minimisant une fonctionnelle de la forme :

$$f(R, C_{ac}, R_e) = (\theta_{cu}^* - \theta_{cu}^{*(exp)})' (\theta_{cu}^* - \theta_{cu}^{*(exp)}) + \frac{1}{10} (\theta_{Ac}^* - \theta_{Ac}^{*(exp)})' (\theta_{Ac}^* - \theta_{Ac}^{*(exp)}) \quad (3)$$

où $\theta_{cu}^* = \frac{\theta_{cu}}{\theta_{cu}(t_{norm})}$, $\theta_{Ac}^* = \frac{\theta_{Ac}}{\theta_{Ac}(t_{norm})}$ et $t_{norm} = 847,6s$.

5.2. Etude de sensibilité et résultats

Pour vérifier la possibilité d'identification de l'ensemble des paramètres, nous proposons

une étude de sensibilité de la température normée des plaquettes de cuivre aux paramètres du modèle, les sensibilités réduites étant définies par :

$$X_j^*(t, \xi) = \xi_j \frac{\partial \theta_{cu}^*(t, \xi)}{\partial \xi_j} \quad (4)$$

où $\xi = (R, C_{ac}, R_e)'$ est le vecteur des paramètres inconnus.

La matrice de variance-covariance sur les paramètres est donnée par la relation suivante :

$$V(\hat{\xi}) = \sigma_b^2 (X' X)^{-1} \quad (5)$$

où $\hat{\xi}$ et σ_b sont respectivement, le vecteur des paramètres estimés et l'écart type du bruit de mesure.

Les valeurs des paramètres du modèle réduit ainsi que leurs écarts types sont montrés au tableau 2 ci-dessous :

Tableau 2 : Résultats de l'estimation en R, C_{ac} et R_e ($\sigma_b = 0,016$ °C)

$R \pm \sigma_R (K/W)$	$C_{ac} \pm \sigma_{C_{ac}} (J/K)$	$R_e \pm \sigma_{R_e} (K/W)$
$14,3 \pm 0,4$	144 ± 26	$3,2 \pm 0,1$

La figure 6 donne les courbes de sensibilité réduite; il est évident que les trois paramètres sont décorellés et peuvent donc être identifiés simultanément ; on constate également ce qui est normal que les sensibilités s'annulent à $847,6$ s ce qui correspond à t_{norm} , valeur utilisée pour la normalisation des températures théoriques.

6. Conclusion

Nous avons présenté, au cours de ce travail, une étude d'un prototype du dispositif expérimental destiné au domaine des feux de forêts. Les paramètres inconnus, modélisant les échanges thermiques entre les différents éléments de ce dispositif, ont été estimés avec leurs intervalles d'incertitude.

La prochaine étape de notre travail consiste à réaliser des expériences avec un panneau radiant simulant la flamme dans une situation de feu de forêt pour valider l'identification précédente (figure 7).

Références

- [1] S.J. Pyne, P.L. Andrews and R.D. Laven, Introduction to Wildland Fire, 2nd edition U.S.A 1996.
- [2] L. Trabaud, Les feux de forêts : Mécanismes, comportement et environnement, édition France-Sélection 1992.
- [3] R.C. Rothermel, A mathematical model for predicting fire spread in wildland fuels, USDA Forest Service, 1972, Research paper INT-115, Ogden, Utah, USA, 40 p.
- [4] A.M. Grishin, Mathematical modeling of forest fires and new methods of fighting them, translated by M. Czuma, L. Chikina and L. Smokotina, ed. Frank Albini, 1997.
- [5] M. Larini, F. Giroud, B. Porterie, J-C. Loraud, A multiphase formulation for fire propagation in heterogeneous combustible media, International Journal of Heat and Mass transfer. 41 (6-7) (1998) 881-897.
- [6] J.V. Beck, K.J. Arnold, Parameter Estimation in Engineering and Science, John Wiley & Sons, New-York 1977.

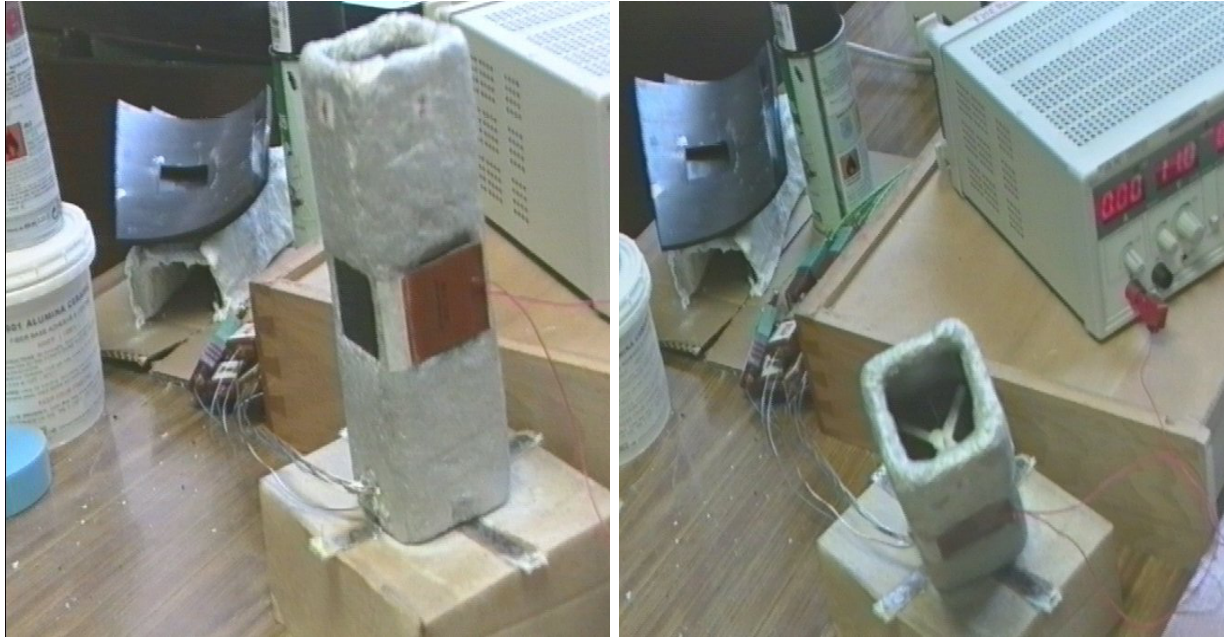


Figure 1 : Vues latérale et de dessus du capteur

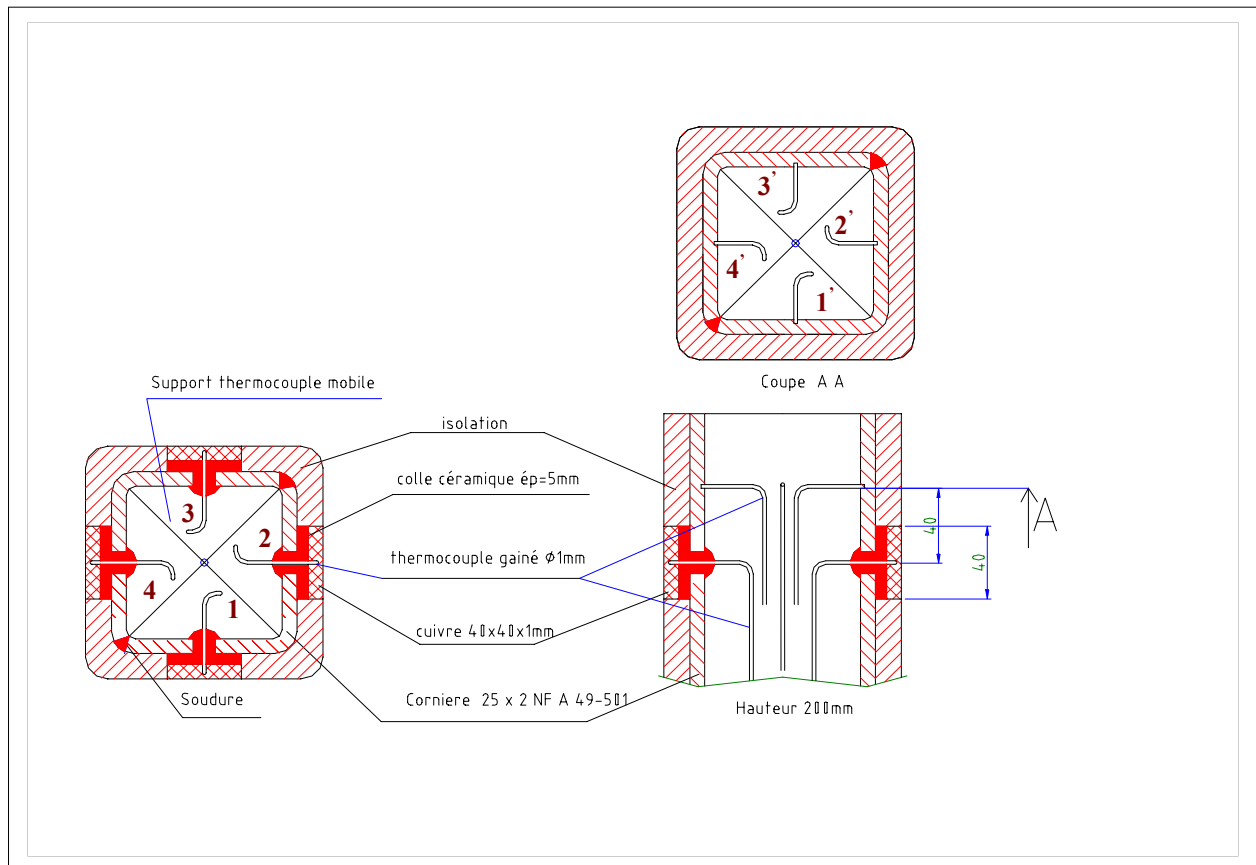


Figure 2 : Coupes horizontale et verticale du capteur

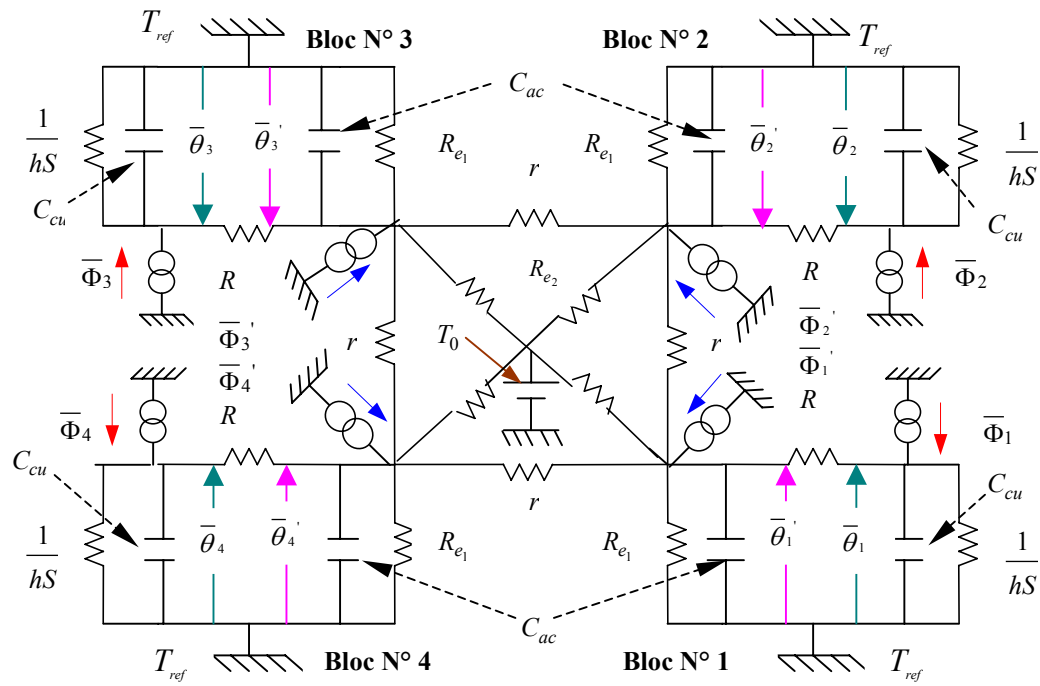


Figure 3 : Modèle complet du capteur - Schéma analogique -

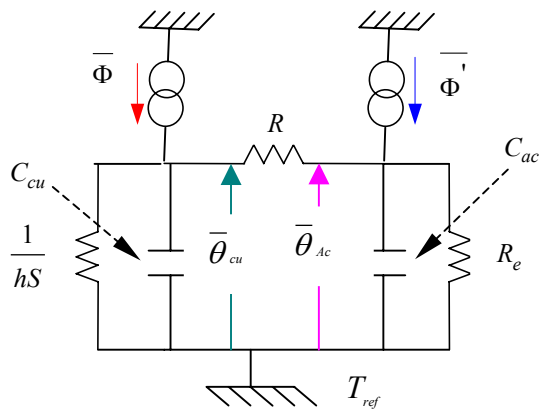


Figure 4 : Modèle réduit du capteur

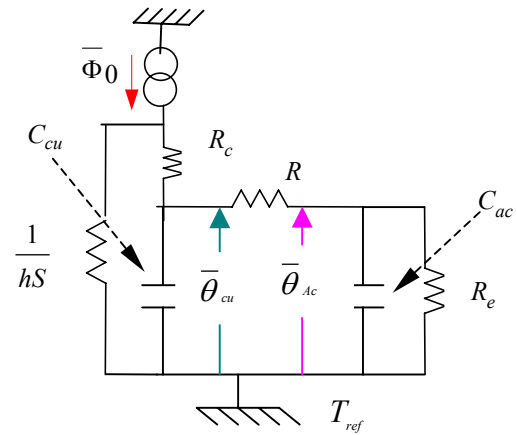


Figure 5 : Modèle d'identification

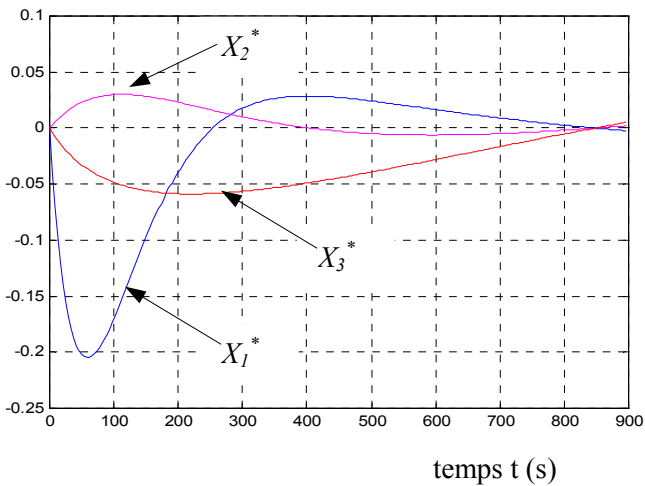


Figure 6 : Sensibilités réduites aux paramètres

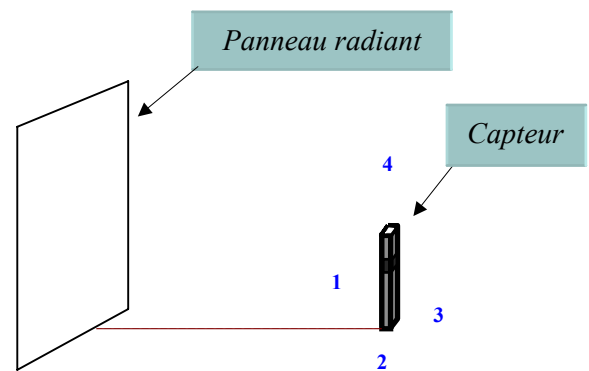


Figure 7 : Présentation géométrique du système capteur - panneau radiant