

## CALIBRAGE ET VALIDATION DES MODELES DE PROPAGATION DES FEUX DE FORET PAR UN CAPTEUR DE TEMPERATURE ET DE FLUX DE CHALEUR

**Khaled CHETEHOUNA, Olivier SERO-GUILLAUME & Alain DEGIOVANNI**

*LEMTA (UMR 7563 CNRS/INPL/UHP)*

*2, avenue de la Forêt de Haye - 54504 Vandoeuvre les Nancy cedex*

**Claude PICARD & Frédérique GIROUD**

*C.E.R.E.N. - ENTENTE INTERDEPARTEMENTALE - SECURITE CIVILE - VALABRE*

*13120 - GARDANNE*

### Résumé :

*Afin de simuler les feux de forêts, il existe des modèles de combustion tridimensionnels et des modèles de propagation qui sont des approximations de ces derniers plus simples et plus rapides à simuler. Une des données de ces modèles de propagation est le flux radiatif émis par la flamme. Sa mesure permet le calibrage des modèles de propagation et une validation partielle des modèles de combustion. La présente étude traite du calibrage et de la validation des modèles de propagation des feux de forêt par une assimilation de paramètres à l'aide d'un capteur spécifique. Une expérience de feu en laboratoire sur une litière végétale homogène et plane a permis de caractériser la propagation par la mesure de la vitesse et l'identification de la hauteur de la flamme et de la puissance émise.*

### Abstract :

*In order to simulate forests fires, there are three-dimensional models of combustion and models of propagation, which are approximation of the latter simpler and faster to be simulated. An input of these models of propagation is the radiative flux emitted by the flame. Its measurement allows the calibration of the models of propagation and a partially validation of the models of combustion. The present study concerns the calibration and the validation of the models of propagation of forest fires by an assimilation of parameters using a specific sensor. A laboratory fire experiment on a homogeneous and flat vegetable fuel allows to characterize the propagation by a velocity measurement and the identification of the flame height and emitted power.*

### Mots clés :

**feux de forêt, modèles de propagation, modèle de réaction-diffusion 2-D, capteur thermique, fonction de transfert, paramètres du capteur, paramètres de propagation, flux radiatif, assimilation de paramètres, analyse de sensibilité**

### 1 Introduction

Les incendies de forêts représentent une des perturbations majeures auxquelles sont soumis les écosystèmes naturels. A titre d'exemple une étude statistique des surfaces incendiées chaque année dans le département du Var, a permis de constater que les superficies

parcourues par le feu sont en général importantes autour de 20 000 hectares. Un chiffre certes impressionnant, mais que relativisent les gigantesques incendies survenus récemment dans d'autres pays 800 000 hectares en Chine, 600 000 hectares aux Etats-Unis.

La lutte contre les feux de végétation demande chaque année un investissement important, tant en hommes qu'en matériel et moyens financiers. Prévoir le plus exactement possible le comportement des feux de végétation, leur puissance, et les directions dans lesquelles ils peuvent se propager peut permettre de limiter cet effort.

Pour notre part, nous nous intéressons à la modélisation de propagation de feu et au calibrage et la validation du modèle. Pour cela nous avons conçu et fabriqué un capteur thermique adapté.

## 2 Différents modèles de propagation

Plusieurs types de modèles de propagation de feu ont été développés, classés par ordre de complexité croissante, ce sont :

### 1. Modèles Statistiques (type automates cellulaires) :

Les états de la forêt sont modifiés de façon probabiliste. Ces modèles fournissent des codes extrêmement rapides, mais il est assez difficile de relier les transitions de probabilité en fonction de paramètres physiques (vent, humidité, pente etc...).

### 2. Modèles Empiriques, Rothermal (1972):

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. Pour des raisons de similitude physique, les expériences de laboratoire ne représentent pas nécessairement les feux réels, les corrélations obtenues sont donc difficilement utilisables.

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.

### 3. Modèles Physiques:

Les modèles physiques se décomposent en deux sous classes : les modèles de propagation ou modèles physiques et les modèles de combustion dits complètement physiques. Dans les modèles complètement physiques la végétation est considérée comme un milieu poreux. 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 combustion d'un tel milieu est alors modélisée. Ces modèles ont donc un caractère tridimensionnel et comporte un grand nombre d'équations aux dérivées partielles compte tenu de l'ensemble des processus physiques à prendre en compte: Grishin (1997), Larini *et al.* (1998), Séro-Guillaume et Margerit (2000). La propagation du feu est un sous-produit de la simulation numérique de ces modèles. La mise en œuvre de cette simulation pose encore des problèmes à l'heure actuelle. Les modèles physiques, quant à eux, sont en général des systèmes bidimensionnels dits de réaction-diffusion comportant une (ou plusieurs) équation de bilan d'énergie et une (ou plusieurs) équation décrivant le bilan de masse. Usuellement les équations de ce type de modèles sont postulées et les différents paramètres sont estimés. C'est-à-dire que les paramètres physiques intervenant, comme la conductivité thermique, par exemple, ne correspondent pas nécessairement à une réalité physique vérifiable. Cependant ces modèles sont assez simples à mettre en œuvre et conduisent à des temps de calcul raisonnables. L'analyse asymptotique, avec comme petit paramètre la hauteur de la végétation, montre que les modèles de réaction-diffusion bidimensionnels correspondent au développement intérieur

(au sens de la méthode des développements asymptotiques raccordés) des équations tridimensionnelles des modèles complets, Margerit et Séro-Guillaume (2000).

Ces modèles, outre la vitesse de propagation, nécessitent pour leur calibrage la mesure du flux radiatif émit par la flamme. Le capteur que nous allons décrire a été fabriqué pour ce but.

### 3 Description du capteur

#### 3.1 Présentation

L'appareil (cf. figure 1) 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, Chetehouna *et al.* (2000).

Le capteur a pour but de:

- Mesurer le flux radiatif moyen venant de la flamme.
- Mesurer la température moyenne des gaz environnant.



FIG. 1 : Photographies du capteur

#### 3.2 Fonction du transfert

Une étude théorique et des expériences de laboratoire nous ont amenés à représenter le comportement thermique du capteur par un modèle capacitif-résistif à 5 paramètres (cf. figure 2).

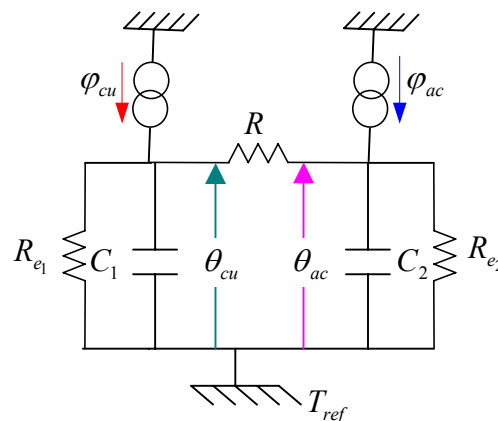


FIG. 2 : Modèle réduit du capteur

Ce modèle permet de calculer le flux radiatif absorbé,  $\varphi_{cu}$ , à partir des températures mesurées,  $\theta_{cu}$  (température de l'élément absorbeur) et  $\theta_{ac}$  (température de l'armature du capteur):

$$\varphi_{cu}(t) = \left( C_1 \frac{d}{dt} + \left( \frac{1}{R} + \frac{1}{R_{e_1}} \right) \right) \theta_{cu}(t) - \frac{1}{R} \theta_{ac}(t) \quad (5)$$

Les paramètres (identifiés par des expériences de laboratoire) sont donnés dans le tableau ci-dessous

	$R (K/W)$	$C_1 (J/K)$	$C_2 (J/K)$	$R_{e_2} (K/W)$	$R_{e_1} (K/W)$
Valeurs de paramètres	10,6	11,0	348	13,4	44,0

TAB. 1 : Paramètres physiques du capteur

#### 4 Expériences de feu et paramètres de propagation

Afin de caractériser la propagation, nous avons réalisé dans une enceinte fermée (2 m<sup>3</sup>) une expérience de propagation de feu sans vent sur une litière végétale homogène et plane (cf. figure 3). Nous avons placé le capteur devant le front de flamme à une distance de 1,5 m du bord du bac de combustion afin de mesurer le flux radiatif venant de la flamme.



FIG. 3 : Dispositif expérimental et propagation

##### 4.1 Vitesse de propagation

Dans l'intervalle du temps où la propagation est stationnaire, nous avons déterminé, avec un système de traitement d'images, la vitesse de propagation, soit:  $V = 0,96 \text{ cm/s}$ . Cette valeur est identique à celle obtenue par Naville (1997) pour le même type et la même densité de végétation.

##### 4.2 Flux radiatif

Le flux radiatif mesuré par le capteur  $\varphi_r$  en un point fixe  $M_0(x_0, y_0, z_0)$ , hors de la végétation, a été calculé en considérant la flamme comme une surface plane, caractérisée par une hauteur  $h_f$  et une puissance émise  $\varphi_0$  et se déplaçant avec une vitesse constante  $V$ . Ce flux peut s'écrire sous la forme:

$$\varphi_r(t, V, h_f, \varphi_0) = f_r(t, V, h_f) \varphi_0 - B(1 - f_r(t, V, h_f)) T_r^4 \quad (6)$$

où:

$$f_r(t, V, h_f) = \frac{1}{\pi} \int_{-L}^L \int_0^{h_f} \frac{(x_0 - Vt)^2}{[(x_0 - Vt)^2 + (y - y_0)^2 + (z - z_0)^2]^2} dy dz \quad (7)$$

$B$  est le coefficient de Stefan-Boltzman.

$T_r$  est la température de la plaquette de cuivre mesurant le flux  $\varphi_r$  et  $L$  est la demi-largeur du bac de combustion.

### 4.3 La hauteur de flamme et sa puissance émise

#### (a) Fonctionnelle de l'optimisation

Pour identifier la hauteur de la flamme  $h_f$  et le flux émis par celle-ci  $\varphi_0$ , nous avons choisi la fonction objectif suivante:

$$Obj(h_f, \varphi_0) = \int_{t_i}^{t_f} (\varphi_r(t, h_f, \varphi_0) - \varphi_r^{\text{exp}}(t))^2 dt \quad (8)$$

$\varphi_r^{\text{exp}}(t)$  est le flux radiatif mesuré par le capteur au point  $M_0$ ,  $[t_i, t_f]$  est l'intervalle de temps où la propagation de la flamme est stationnaire.

#### (b) Analyse de sensibilités

Avant toute estimation, il est important de vérifier l'identifiabilité des paramètres étudiés  $h_f$  et  $\varphi_0$ . Pour ceux-là nous traçons les courbes des sensibilités réduites, définies par:

$$X_j^*(t, \xi) = \xi_j \frac{\partial \varphi_r(t, \xi)}{\partial \xi_j} \quad (9)$$

$\xi = \begin{pmatrix} h_f \\ \varphi_0 \end{pmatrix}$  est le vecteur de paramètres que nous cherchons à estimer.

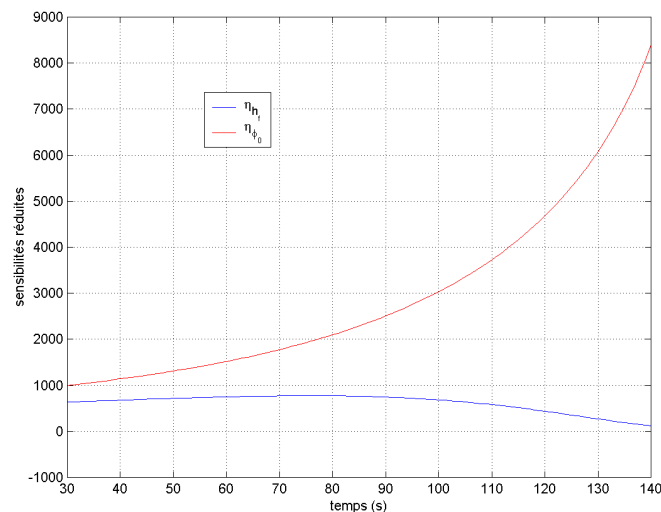


FIG. 4 : Sensibilités réduites aux paramètres

La figure 4 ci-dessus montre que les deux paramètres sont décorrélés et peuvent donc être identifiés simultanément.

### (c) Méthode d'optimisation et résultats

Nous avons utilisé un algorithme basé sur la méthode de Newton. Chaque itération implique une solution approximative d'un grand système linéaire en utilisant la méthode du gradient conjugué préconditionné (PCG). Les paramètres initiaux, que nous avons pris en compte, sont:  $h_f = 50 \text{ cm}$  (valeur estimée par un système de traitement d'images) et  $\varphi_0 = 9,6 \text{ kW/m}^2$  (valeur proposée par Weber (1989) pour une flamme d'émissivité  $\varepsilon_f = 0,28$  et de température  $T_f = 882 \text{ }^\circ\text{K}$ ). Après un certain nombre d'itérations, l'algorithme converge et donne les résultats suivants:

	$h_f \text{ (cm)}$	$\varphi_0 \text{ (kW/m}^2\text{)}$
Valeurs de paramètres	85	16,6

TAB. 2 : Paramètres physiques de propagation

Ce tableau nous permet de calculer l'émissivité de la flamme soit  $\varepsilon_f = 0,48$ , valeur supérieure à celle trouvée par Weber (1989).

## 5 Conclusion

Nous avons présenté, au cours de ce travail, différents modèles de propagation des feux de forêt. Nous avons mesuré la vitesse de propagation et le flux de chaleur venant de la flamme en un point fixe  $M_0(x_0, y_0, z_0)$  pour une propagation stationnaire sur une litière végétale homogène et plane. Une méthode d'assimilation physique de paramètres, par un algorithme d'optimisation de type (PCG), a permis d'identifier la hauteur de la flamme et le flux émis par celle-ci.

## Références

- Grishin, A.M. 1997 Mathematical modeling of forest fires and new methods of fighting them, translated by M. Czuma, L. Chikina and L. Smokotina, ed. Frank Albini.
- Larini et al. 1998 A multiphase formulation for fire propagation in heterogeneous combustible media, *International Journal of Heat and Mass transfer.*, **Vol. 41**, Nos 6-7, pp. 881-897.
- Margerit, J. et Séro-Guillaume, O. 2000 Modeling Forest Fires Part II: Reduction to two dimensional model and simulation of propagation, *International Journal of Heat and Mass transfer.*
- Naville, L. 1997 Etude expérimentale et modélisation de la propagation d'une flamme sur un combustible poreux : Applications aux feux de végétation, *thèse de troisième cycle, Université de la Méditerranée (AIX-MARSEILLE II)*.
- Rothermel, R.C. 1972 A mathematical model for predicting fire spread in wildland fuels, *USDA Forest Service, Research paper INT-115, Ogden, Utah, USA*, 40 p.
- Séro-Guillaume, O. et Margerit, J. 2000 Modeling Forest Fires Part I: A complete Set of Equations Derived by Extended Irreversible Thermodynamics, *International Journal of Heat and Mass transfer.*
- Weber, R.O. 1989 Analytical models for fire spread due to radiation, *Combustion and Flame*, **Vol. 78**, pp. 398-408.