HAL open science

Analyse théorique d'un modèle de flamme semi-transparente pour l'étude des feux de forêts pour l'étude des feux de forêts

Anthony Collin, Aymeric Lamorlette

To cite this version:

Anthony Collin, Aymeric Lamorlette. Analyse théorique d'un modèle de flamme semi-transparente pour l'étude des feux de forêts pour l'étude des feux de forêts. Congrès Français de Thermique SFT, Société Française Thermique, May 2013, Gérardmer, France. hal-01446627

HAL Id: hal-01446627

https://hal.univ-lorraine.fr/hal-01446627v1

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.

Analyse théorique d'un modèle de flamme semi-transparente pour l'étude des feux de forêts

Anthony Collin[a], **Aymeric Lamorlette**[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 : Université d'Aix-Marseille, M2P2, UMR 6181, Marseille, F-13453, France
CNRS, M2P2, UMR 6181, Marseille, F-13453, France
Auteur correspondant : anthony.collin@univ-lorraine.fr

Résumé - Le travail présenté ici propose de reprendre les modèles de flammes utilisés couramment dans les études de propagation de feux de végétation et de les comparer. L'application d'une analyse de sensibilité globale sur ces modèles permet de démontrer que les grandeurs géométriques (hauteur, épaisseur) et thermiques (température, émissivité et coefficient d'absorption) sont des facteurs influents sur la densité de flux absorbée par la végétation. Cependant, cette étude prouve que l'angle d'inclinaison de la flamme l'est beaucoup moins. Ces conclusions permettent d'expliquer pourquoi cet angle est un paramètre non-identifiable à partir de mesures de flux radiatif. De plus, cette contribution démontre que l'application d'une analyse de sensibilité globale permet, en terme de prospectives, de dégager ici une piste intéressante de génération de nouveaux capteurs de flux thermique multi-facette, afin d'améliorer la sensibilité de l'angle d'inclinaison sur la mesure du flux radiatif et donc de rendre ce paramètre identifiable.

Nomenclature

e_f	Épaisseur de la flamme, [m]	S_{Ti}	Indice de sensibilité totale de i, [-]
$\mathcal{F}$	Facteur de forme réduit, [m^{-2}]	T_f	Température de la flamme, [K]
h_f	Hauteur de la flamme, [m]	$\mathcal{V}_\mathrm{f}$	Volume de la flamme, [m^3]
l_f	Largeur de la flamme, [m]	κ_f	Coeff. d'absorption de la flamme, [m^{-1}]
M_r	Densité de flux radiatif absorbé par la végétation ou par le capteur, [W/m^2]	θ_f	Angle d'inclinaison de la flamme, [rad]
S_i	Indice de sensibilité du 1er ordre de i, [-]	σ_S	Constante de Stefan-Boltzmann, [W/m^2/K^4]

1. Introduction

Chaque année, les feux de végétation détruisent plusieurs dizaines de milliers d'hectares anéantissant en même temps faune et flore. L'année 2012 a encore été le témoin de ces feux destructeurs : le plus dramatique est celui qui s'est déclaré au Chili en janvier dernier et dont le bilan fait état d'un décès et plus de 23000 hectares de végétation détruite. En France, les surfaces brûlées sont de moindre importance, totalisant néanmoins chaque année en moyenne 30000 hectares et les exemples sont toujours aussi nombreux : 400 hectares de forêts à Orgon (Bouches-du-Rhône), 400 hectares de pins à Lacanau (Gironde) et 231 hectares en Haute-Corse pour les plus importants. Prédire fidèlement la propagation d'un feu de forêts demeure toujours un élément très important du dispositif de lutte contre ces incendies pour tenter de les maîtriser. La modélisation de la propagation des feux de forêts repose très souvent sur l'établissement d'équations bilans [1]. Pour un modèle physique de propagation donné, ces équations ont été rappelées dans une contribution précédente [2]. Dans le cadre des feux de végétation, seuls les transferts radiatif et convectif jouent un rôle important dans les échanges de chaleur [3] compte tenu des échelles d'espace mises en jeu. La convection contribue tout autant que le rayonnement quand l'incendie est piloté par le vent par effet de préchauffage de la végétation en amont du

front de flamme ce qui accélère la propagation. En dehors de cette configuration, le transfert radiatif est considéré comme le moteur principal de la propagation d'un incendie, compte tenu de l'importance du rayonnement provenant de la flamme et des végétaux en feu.
En terme de modélisation physique, le transfert radiatif impliqué dans la propagation des feux est représenté à partir d'un modèle de flamme. Cette flamme peut être modélisée par :
• une surface à haute température possédant une émissivité ou une densité de flux donnée [4, 5], on parle alors de flamme solide,
• un volume de gaz à haute température qui rayonne (la flamme est considérée comme un milieu semi-transparent) [6], on parle alors de flamme volumique optiquement épaisse,
• un volume de gaz à haute température qui rayonne avec l'hypothèse que l'absorption propre de la flamme est négligeable [1, 2], on parle alors de flamme volumique optiquement mince.
Dans tous les cas, le milieu séparant la flamme de la végétation est considéré comme transparent. L'objectif commun à tous ces modèles est de quantifier le terme M_{r} correspondant à la densité de flux radiatif provenant des flammes qui est absorbée par la végétation. L'ensemble de ces modèles est repris et fait l'objet d'une comparaison dans les travaux de Sullivan *et al.* [7] et Collin et Boulet [8]. Quantifier correctement cette contribution radiative, via un modèle de flamme est donc très important pour estimer les transferts de chaleur et par conséquent pour prédire fidèlement la propagation d'un incendie réel.
Néanmoins, ce modèle de flamme nécessite de connaître parfaitement les caractéristiques géométriques (hauteur, largeur, épaisseur et angle d'inclinaison) et thermiques (température, émissivité ou coefficient d'absorption) des flammes. Toutes ces grandeurs sont en général estimées expérimentalement via des outils métrologiques (thermocouples, caméras visible / IR, capteurs de flux thermique). La question qui se pose alors est de connaître la fiabilité de ces résultats expérimentaux par rapport au protocole expérimental développé pour réaliser ces mesures.
Dans une étude antérieure [2], nous avions étudié le modèle de flamme volumique optiquement mince et nous avions combiné un algorithme d'identification paramétrique à une analyse de sensibilité globale. Nous avions alors démontré que les caractéristiques d'une flamme (hauteur, épaisseur, angle d'inclinaison et température), excepté le coefficient d'absorption (à cause du modèle de flamme utilisé lors de cette précédente étude) pouvaient être correctement prédites à partir de mesures de densité de flux radiatif sur un capteur vertical (dont la normale serait orientée horizontalement). Nous avions également souligné que la grandeur la moins sensible à ce modèle était l'angle d'inclinaison. Cette particularité implique que l'incertitude de mesure liée à cette grandeur est assez importante ce qui pénalise l'estimation de sa valeur exacte.
Cependant, les conclusions importantes de cette première étude ont une portée limitée pour deux raisons : tout d'abord, nous avions démontré que la qualité de la prédiction était liée à une zone de mesure de la densité de flux radiatif qui se trouvait à l'intérieur de la flamme. Or, à l'heure actuelle, très peu de dispositifs de mesures permettent de garantir une mesure fiable au passage d'un front de flamme. Il est alors important de ne considérer que des mesures de flux qui se trouvent en dehors de toute flamme. De plus, une récente étude [8] portant sur l'analyse des différents modèles de flammes a démontré que le modèle de flamme volumique optiquement mince est mis en défaut pour des cas réels d'applications où les épaisseurs optiques dépassent 1. Le modèle de flamme volumique optiquement épaisse est alors à privilégier.
L'objectif de ce travail est dans un premier temps de comparer les modèles de flamme entre eux. Ensuite, en utilisant une analyse de sensibilité globale, le but est d'identifer quels sont les paramètres influents de chaque modèle. Enfin, l'ambition est alors de définir, par des moyens numériques, une métrologie adaptée pour pouvoir identifier tous les paramètres de ce modèle à partir de la connaissance de la distribution du flux thermique rayonné obtenue expérimentalement en dehors de la zone de flamme. L'accent est également mis sur l'association de plusieurs me-

sures issues de capteurs de flux d'orientations différentes pour tenter de quantifier de façon fiable les caractéristiques de la flamme, et en l'occurrence l'angle d'inclinaison de la flamme qui était jusque là mal prédit.
Dans ce qui suit, le développement du modèle numérique utilisé dans cette étude pour estimer le flux radiatif reçu par le capteur thermique est brièvement décrit dans la Section 2. Après validation de cette approche, la Section 3 reprend brièvement les définitions des indices de sensibilité du premier ordre et totaux. L'application de cette analyse de sensibilité globale sur les modèles de flamme est présentée en Section 4. Cette section démontre également comment l'analyse de sensibilité peut être utile pour calibrer des techniques d'identification paramétrique. La Section 5 souligne les perspectives de cette étude.

2. Développement du modèle numérique de flamme

L'intérêt d'étudier dans une première contribution la flamme volumique optiquement mince était double [2]. D'une part, ce modèle de flamme est actuellement utilisé dans de nombreux simulateurs de propagation de feux de végétation [1]. D'autre part, les hypothèses liées à ce modèle permettent de simplifier la contribution du terme M_r comme étant un calcul de facteur forme entre un volume et une surface. Ainsi, le terme M_r à une position $\mathbf{x}$ donnée peut s'écrire,

$$M_\mathrm{r}\left(\mathbf{x}\right) = 4\mathcal{V}_\mathrm{f}\kappa_\mathrm{f}\sigma_\mathrm{S}T_\mathrm{f}^4\mathcal{F}\left(\theta_\mathrm{f}, \mathcal{V}_\mathrm{f}, \mathbf{x}\right) \tag{1}$$

où $\mathcal{V}_\mathrm{f}$ est le volume total de la flamme, κ_f son coefficient d'absorption, T_f sa température, θ_f son angle d'inclinaison et $\mathcal{F}$ le facteur de forme réduit exprimé par,

$$\mathcal{F}\left(\theta_\mathrm{f}, \mathcal{V}_\mathrm{f}, \mathbf{x}\right) = \frac{1}{\mathcal{V}_\mathrm{f}}\int_{\mathcal{V}_\mathrm{f}} \frac{\cos\theta}{4\pi r^2}\mathrm{d}\mathcal{V}_\mathrm{f} \tag{2}$$

où r est la distance entre un point M_f de la flamme et le capteur M et θ l'angle formé entre le vecteur $\overrightarrow{MM_\mathrm{f}}$ et la normale au capteur. Nous nous plaçons délibérément dans une approche de flamme grise ici. La prise en compte du comportement spectral des flammes ne modifierait pas l'essentiel des conclusions sur les paramètres géométriques et thermiques tirées de ce travail. Compte tenu de la géométrie relativement simple utilisée pour représenter une flamme (cf. Figure 1), le terme $\mathcal{F}$ de l'équation (2) peut être calculé analytiquement après quelques manipulations mathématiques [2, 8]. L'obtention de ces relations analytiques est très importante pour économiser le temps de simulation du modèle de propagation de feux afin qu'il puisse être plus rapide que le temps réel (utilisation faite par des codes numériques employés par les sapeurs-pompiers sur le terrain). Le calcul aurait été simple également si le modèle de flamme solide avait été considéré [4]. Cependant, dans le cadre d'une flamme volumique optiquement épaisse, le calcul analytique de $\mathcal{F}$ dans le cas général est rendu pratiquement impossible sans hypothèses simplificatrices supplémentaires. Seule l'approche numérique permet de quantifier le terme M_r pour cette configuration.

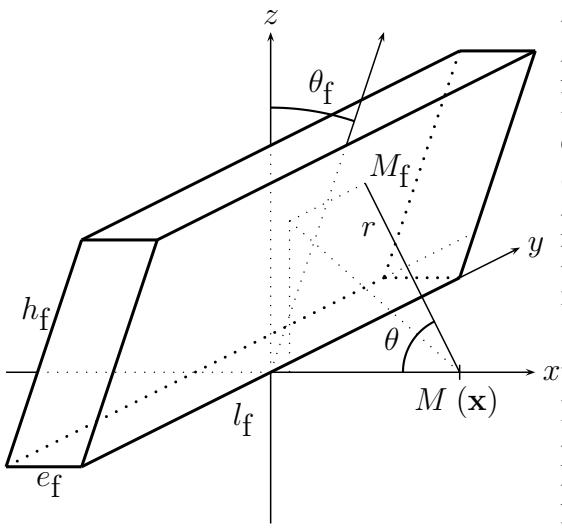

Fig.1 - *Géométrie de la flamme*

Pour cette étude, nous avons décidé de mettre en œuvre une approche de type Monte Carlo Réciproque pour simuler le transfert radiatif entre la flamme et un capteur de flux. L'intérêt de cette

approche est que le nombre total de rayons à suivre pour obtenir des résultats convergés est plus faible par rapport à une méthode de Monte Carlo directe (ou classique). Cet avantage tient au fait d'utiliser la relation de réciprocité entre les éléments rayonnants [9]. L'approche Monte Carlo Réciproque développée dans cette étude est issue des travaux de Tessé *et al.* [10] et Dupoirieux *et al.* [11], en s'intéressant plus particulièrement à la technique dite ERM (Emission Reciprocity Method). En terme de modélisation, on s'intéresse uniquement au rayonnement émis par un capteur à la position $\mathbf{x}$ et absorbé par la flamme (cf. Figure 1). Ce rayonnement est supposé être négligeable devant celui émis par la flamme : on supposera alors que le capteur est une surface noire infinitésimale de température 1 K pour respecter nos hypothèses. Ce capteur est centré par rapport à la largeur de la flamme et sa normale extérieure peut être orientée selon les axes $-x$, y ou z. Les différences en terme de modélisation entre une flamme solide, une flamme volumique optiquement mince ou épaisse résident uniquement dans le mode d'absorption de l'énergie des quanta qui traversent la flamme [8].

Pour valider le modèle numérique mis en place, deux cas de flammes aux propriétés différentes sont considérés en vue de comparer les résultats des approches numérique et analytique. Les cas sont les suivants :

- Cas 1 - Flamme solide (FS) : 3 mètres de hauteur, 2 mètres de large, inclinée de 45°, température de 1200 K et une émissivité de 0,26. Les résultats seront comparés à ceux obtenus par la relation obtenue par Rossi *et al.* [4],
- Cas 2 - Flamme volumique optiquement mince (FV mince) : 3 mètres de hauteur, 1 mètre d'épaisseur, 2 mètres de large, inclinée de 45°, température de 1200 K et un coefficient d'absorption de 0,3 m^{-1}, les résultats seront comparés à ceux obtenus par la relation obtenue par Collin *et al.* [2, 8].

D'un point de vue numérique, 10000 rayons sont suivis pour chaque position du capteur (1000 positions équi-réparties sur 10 m). La figure 2 présente les comparaisons des résultats numériques et analytiques pour les 2 cas précédemment présentés. Les résultats montrent un bon accord pour les deux configurations testées ce qui valide l'utilisation du modèle numérique pour quantifier les différentes valeurs de M_{r}. Les temps de simulations sont de l'ordre de 80 secondes pour chaque cas pour 3% d'erreur maximale comparés à 12 minutes avec une approche de Monte Carlo directe avec une précision moyenne de 5% sur les résultats (envoi de 10 milliards de rayons) [2]. Sur la figure 2 sont également représentés les résultats obtenus pour la flamme volumique optiquement épaisse en reprenant exactement les mêmes paramètres que ceux du cas 2. Les hypothèses optiquement épaisse et mince conduisent à des résultats qui présentent des différences qui peuvent atteindre 15% (les résultats de la flamme volumique optique épaisse étant pris comme références). Ce constat est une illustration parfaite des résultats obtenus par Collin et Boulet [8] sur la mise en défaut du modèle de flamme volumique optiquement mince quand l'épaisseur optique avoisine ou dépasse 1 (ici 0.9). Les résultats présentés sur la figure 2 démontrent que les résultats en densité de flux sont différents pour chaque modèle de flamme. Cette remarque justifie l'application individuelle d'une analyse de sensibilité sur

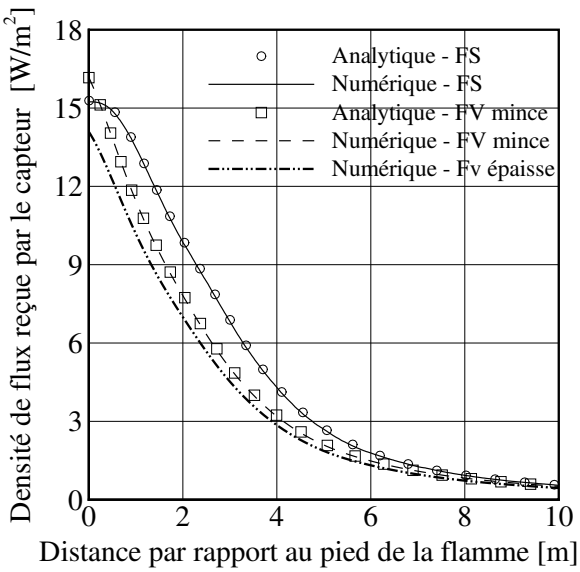

Fig.2 - *Comparaisons de différentes flammes*

	Hauteur H_f [m]	Épaisseur e_f [m]	Angle θ_f [-]	Température T_f [K]	Coeff. d'absorption κ_f [m^{-1}]	Émissivité ϵ_f [-]
Valeur min.	0.5	0	0	1 000	0.1	0
Valeur max.	2	1	45$^\mathrm{O}$	1 600	1	1

Tableau 1 *Gamme de variabilité des grandeurs étudiées*

chaque modèle pour rendre compte de l'influence de chaque paramètre.

3. Estimation des indices de sensibilité

Considérons un modèle mathématique sous la forme générale, $y = f(x_1, \ldots, x_n)$ où $y \in \mathbb{R}$ représente la sortie du modèle (ici la densité de flux radiatif reçue par le capteur), $x_i \in \mathbb{R}$, $i = 1, \ldots, n$, avec n le nombre de paramètres inconnus. Les paramètres x_i sont considérés comme des variables aléatoires indépendantes. Dans [12], un indicateur de la sensibilité du paramètre x_i sur y, noté S_i, est défini par :

$$S_i = \frac{V(E(y|x_i))}{V(y)} \tag{3}$$

où $V(E(y|x_i))$ représente la variance de l'espérance conditionnelle de y sachant $x_i = x_i^*$ et $V(y)$ la variance de y. La valeur de l'indice de sensibilité S_i est comprise entre 0 et 1. Plus sa valeur sera proche de 1, plus le paramètre x_i contribuera à la variance de y. Si le modèle est non linéaire et non additif, l'interaction entre les différents paramètres va aussi influer la variance de y. Dans ce cas, on préfère l'indice de sensibilité total S_{Ti}, défini par [12] :

$$S_{Ti} = 1 - \frac{V(E(y|x_{\sim i}))}{V(y)} \tag{4}$$

Le terme $V(E(y|x_{\sim i}))$ représente la variance de l'espérance conditionnelle connaissant tous les paramètres sauf x_i. Les indices de sensibilité présentés précédemment ne peuvent pas toujours être calculés de façon analytique lorsque la fonction f du modèle n'est pas connue ou est complexe et que les paramètres sont nombreux. Par conséquent, il est nécessaire de pouvoir estimer ces indices autrement. Pour cela, il existe différentes techniques dans la littérature [13, 14]. L'approche utilisée dans cette étude est fondée sur la méthode de Monte Carlo [14], qui a déjà été rappelée dans [2].

4. Résultats

Pour calculer les indices de sensibilité du premier ordre et totaux, les dimensions des flammes modélisées et la distance sur laquelle des mesures du terme M_r sont réalisées, sont calées sur les dimensions de la veine d'essai de la plateforme d'essais PROMETHEI (LEMTA-Université de Lorraine) : 6 m de long, 3 m de large et 3 m de haut. Le capteur de flux est supposé être centré par rapport à la largeur de la veine d'essai. La flamme a une largeur fixe de 3 m. Chaque échantillon comporte 20000 expériences. Pour chaque expérience, les densités de flux sont calculées en 20 positions différentes, réparties de manière uniforme sur les 6 m de long. Pour chaque calcul d'une densité de flux, 10000 quanta sont suivis. Ce choix concernant les paramètres numériques garantit l'invariance des résultats qui sont obtenus. L'analyse de sensibilité va être menée sur la hauteur de la flamme, son épaisseur, sa température, son angle d'inclinaison et son coefficient d'absorption (ou émissivité dans le cas de la flamme solide). Les gammes de variabilité employées pour ces analyses sont données dans le tableau 1. Les densités de probabilité sont supposées être uniformes sur chaque gamme de variabilité.

Pour traiter le cas d'une flamme optiquement épaisse, seuls H_f, e_f, θ_f, T_f et κ_f seront utiles. Par contre, dans le cas des autres modèles de flamme, certaines variables sont corrélées : T_f et κ_f pour une flamme optiquement mince ; T_f et ϵ_f pour une flamme solide. Afin de travailler sur des variables indépendantes et respecter les hypothèses faites pour appliquer une analyse de sensibilité globale, des groupements de variables sont proposés pour traiter ces deux modèles. Une nouvelle variable est introduite, notée PE, et s'exprime par $\mathrm{PE} = \kappa_\mathrm{f} T_\mathrm{f}^4$ pour une flamme optiquement mince et par $\mathrm{PE} = \epsilon_\mathrm{f} T_\mathrm{f}^4$ pour une flamme solide. Par souci de lisibilité, seuls les indices du premier ordre seront commentés. Les indices totaux présentent la même tendance que ceux du premier ordre et démontrent que l'ensemble des paramètres interagissent les uns avec les autres sur le calcul de la densité de flux radiatif.

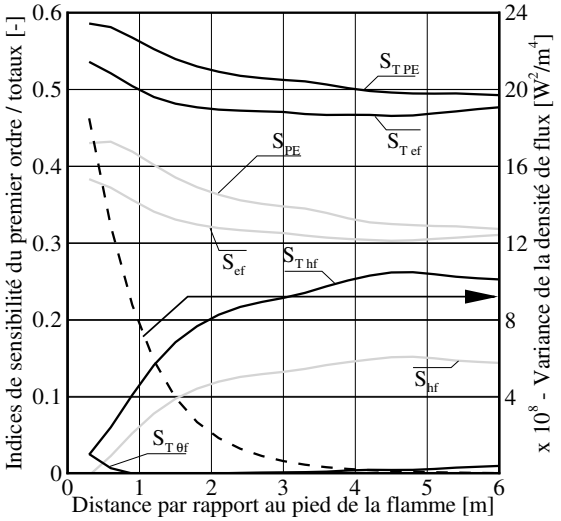

Fig.3 - *Flamme vol. opt. mince, capteur* $-x$

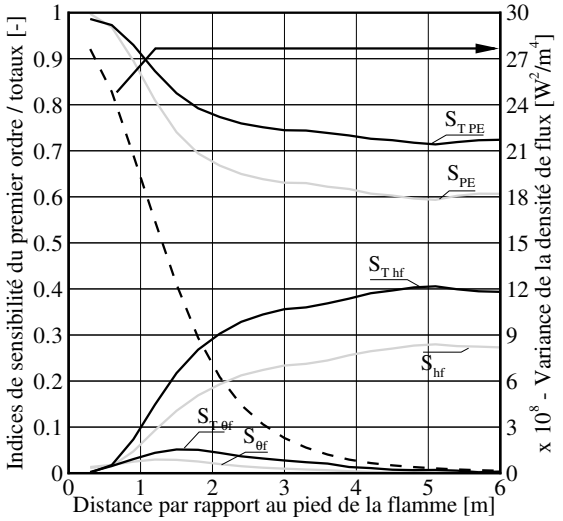

Fig.4 - *Flamme solide, capteur* $-x$

La figure 3 présente les fonctions de sensibilité pour le cas de la flamme optiquement mince. Les résultats obtenus ici sont très similaires à ceux déjà présentés dans [2] : les indices du premier ordre montrent que le couple $\kappa_\mathrm{f} T_\mathrm{f}^4$ (PE) et e_f sont très influents sur la valeur de la densité de flux ($S_i > 0,4$) et que h_f joue un rôle significatif au fur et mesure que le capteur s'éloigne de la flamme ($S_{h_\mathrm{f}} \to 0,15$). Ici encore, l'indice de sensibilité relatif à l'angle d'inclinaison de la flamme est nul (non représenté sur la figure 3), démontrant que θ_f a peu d'influence sur M_r. Ainsi, en cas d'identification paramétrique, ce paramètre ne sera pas facilement identifiable. En conclusion, il n'est pas garanti que tous les paramètres du modèle de flamme optiquement mince soient aisément quantifiables par technique inverse.

La figure 4 trace les indices de sensibilité pour le modèle de flamme solide. Ici, les résultats montrent nettement que le couple $\epsilon_\mathrm{f} T_\mathrm{f}^4$ joue un rôle prépondérant dans la détermination du terme M_r avec un indice de sensibilité du premier ordre qui peut atteindre pratiquement 1 au pied de la flamme et supérieur à 0,7 ailleurs. Bien qu'il s'agisse d'un modèle de flamme différent, h_f a le même comportement qu'avec le modèle de flamme optiquement mince ($S_{h_\mathrm{f}} \to 0,25$). Pour le cas d'une flamme solide, il est intéressant de constater que l'angle d'inclinaison de la flamme est légèrement plus influent que dans le cas précédent, jusqu'à 5% de la variance du terme M_r. Couplé à une variance sur la densité de flux assez importante ($\approx 9.10^8$ W^2/m^4 à une position de 1,6 m), l'angle d'inclinaison de la flamme peut, cette fois-ci, être un paramètre parfaitement identifiable par des mesures du terme M_r. Par conséquent, il est envisageable d'estimer tous les paramètres de ce modèle par méthode inverse.

La figure 5 donne les fonctions de sensibilité pour le cas d'une flamme optiquement épaisse. Il est intéressant de comparer ces résultats à ceux obtenus avec le modèle de flamme optiquement

mince. Il est assez surprenant de constater que l'épaisseur, la hauteur et l'angle d'inclinaison de la flamme présentent les mêmes fonctions de sensibilité pour les deux modèles. La différence

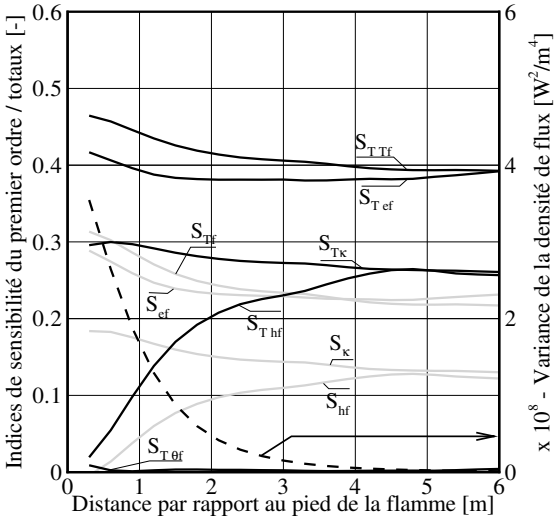

Fig.5 - *Flamme vol. opt. épaisse, capteur* $-x$

réside uniquement dans le partitionnement du groupe $\kappa_{\mathrm{f}} T_{\mathrm{f}}^4$ en deux variables distinctes κ_{f} et T_{f}. Les indices de sensibilité relatifs à κ_{f} et T_{f} sont supérieurs, respectivement, à 0,1 et 0,2 quelle que soit la distance séparant la flamme du capteur. Cette observation est importante, car elle tend à montrer qu'il serait possible d'identifier de façon distincte les valeurs κ_{f} et T_{f} à partir de mesures du terme M_{r}. Néanmoins, l'angle d'inclinaison demeure toujours un paramètre quasiment non influent pour la densité de flux radiatif ce qui limite totalement la recherche de sa valeur en cas d'identification paramétrique.

L'idée est donc de trouver un nouveau dispositif de mesure de la densité de flux radiatif pour augmenter la sensibilité du terme M_{r} à l'angle d'inclinaison de la flamme : le plus simple est de modifier l'orientation du capteur. Jusqu'à présent le capteur était orienté face à la flamme de normale horizontale, il s'agit maintenant de tester les cas où le capteur est orienté parallèlement à la largeur de la flamme (selon y) et verticalement (selon z).

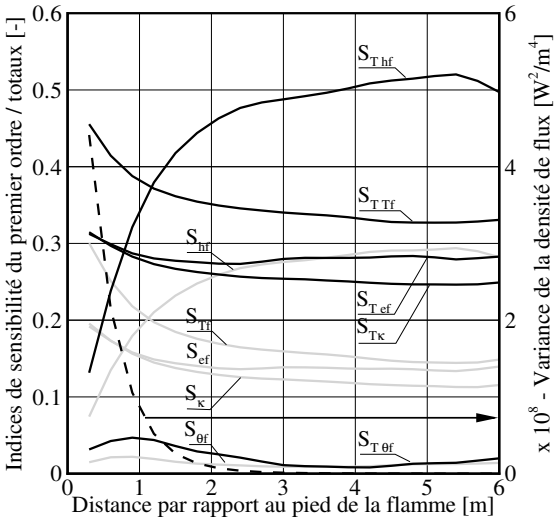

Fig. 7 - *Flamme vol. opt. épaisse, capteur* z

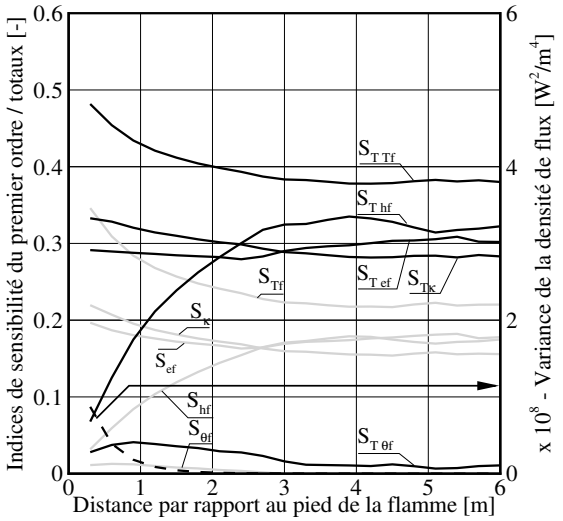

Fig.6 - *Flamme vol. opt. épaisse, capteur* y

La figure 6 donne les indices de sensibilité pour le cas de la flamme optiquement épaisse quand le capteur est orienté suivant y. Les flux mesurés par ce capteur ont une variabilité moins importante que ceux obtenus précédemment car la variance a été pratiquement divisée par 5. Cette observation n'est pas un atout pour une future identification paramétrique. Les fonctions de sensibilité sont quasiment identiques à celles estimées précédemment. Néanmoins, dans cette configuration là, l'angle d'inclinaison de flamme est responsable de quelques pourcents (aux alentours de 2%) de la variabilité de la mesure du flux radiatif. L'association d'une faible variance sur les mesures du terme M_{r} et à un indice de sensibilité faible permet d'améliorer très légèrement le protocole expérimental permettant d'identifier fidèlement l'angle d'inclinaison de la flamme, par rapport à des essais effectués avec un capteur orienté suivant $-x$.

La figure 7 trace les fonctions de sensibilité pour le cas d'une flamme optiquement épaisse quand le capteur est orienté suivant z. Cette fois-ci, les flux mesurés ont une variabilité plus importante que ceux obtenus avec la configuration initiale (capteur selon -x). L'indice de sensibilité lié à la hauteur de la flamme est le plus important et celui de θ_{f} est désormais de 3% au maximum. L'utilisation des informations liées à ce capteur peut permettre d'améliorer le protocole d'identification en donnant une meilleure estimation de l'angle d'inclinaison de la flamme et par la même occasion en augmentant la précision sur la valeur de la hauteur de flamme.

5. Conclusion

Cette étude a permis de mettre en œuvre une analyse de sensibilité globale sur les trois types de modèles de flamme utilisés dans la littérature pour modéliser des feux de végétation. Elle a contribué notamment à définir pour chaque modèle quels sont les paramètres les plus influents. Quand ces modèles sont utilisés au sein d'une technique d'identification de paramètre, l'analyse de sensibilité globale permet de définir quels sont les paramètres qui sont aisément identifiables et quels sont ceux qui le seront moins. En guise d'exemple, ce travail s'est appuyé sur le modèle de flamme optiquement épaisse, le plus précis $apriori$ et a démontré que l'angle d'inclinaison n'est pas un paramètre identifiable avec une grande précision. L'analyse de sensibilité globale a permis également de prévoir les résultats d'une nouvelle métrologie qui associe plusieurs capteurs d'orientations différentes et a démontré que chaque position de capteur était utile pour tous les paramètres du modèle de flamme. La prochaine étape consiste à tester cette nouvelle métrologie numériquement et expérimentalement.

Références

[1] J. Margerit et O. Séro-Guillaume. Modelling forest fires. Part II : Reduction to two-dimensional models and simulation of propagation. *Int. J. of Heat and Mass Trans.*, Vol. 45, pp. 1723-1737, 2002.

[2] A. Collin, A. Lamorlette, Z. Acem. Analyse théorique d'un modèle de flamme pour l'étude des feux de forêts : de l'identification de paramètres au développement d'outils métrologiques. Congrès de la Société Française de Thermique, Bordeaux, 29 mai au 01 juin 2012.

[3] D. Morvan, S. Méradji et G. Accary. Physical modelling of fire spread in grassland. *Fire Safety J.*, Vol. 44, pp. 50-61, 2009.

[4] J.L. Rossi, K. Chetehouna, A. Collin, B. Moretti et J.H. Balbi. Simplified flame models and prediction of the thermal radiation emitted by a flame front in an outdoor fire. *Comb. Science and Tech.*, Vol. 182, pp. 1457 - 1477, 2010.

[5] J.K. Adou, Y. Billaud, D.A. Brou, J.-P. Clerc, J.L. Consalvi,A. Fuentes, A. Kaiss, F. Nmira, B. Porterie, L. Zekri et N. Zekri. Simulating wildfire patterns using a small-world network model. *Ecol. Mod.*, Vol. 221, pp. 1463 - 1471, 2010.

[6] I.K. Knight, A.L. Sullivan. A semi-transparent model of bushfire flames to predict radiant heat flux. *Int. J. Wildland Fire*, Vol. 13, pp. 201 - 207, 2004.

[7] A.L. Sullivan, P.F. Ellis, I.K. Knight. A review of radiant heat flux models used in bushfire applications. *Int. J. Wildland Fire*, Vol. 12, pp. 101 - 110, 2003.

[8] A. Collin, P. Boulet. Evaluation of simple models of flame radiation in the frame of fire propagation. *Int. J. Heat Mass Trans.*, Vol. 59, pp. 83 - 92, 2013.

[9] J. Taine, E. Iacona, J.P. Petit. Transferts thermiques : Introduction aux transferts d'énergie. Dunod, Collection Sciences Sup, 2008.

[10] L. Tessé, F. Dupoirieux, B. Zamuner, J. Taine. Radiative transfer in real gases using reciprocal and forward Monte Carlo methods and a correlated-k approach. *Int. J. Heat Mass Trans.*, Vol. 45, pp. 2797 - 2814, 2002.

[11] F. Dupoirieux, L. Tessé, S. Avila et J. Taine. An optimized reciprocity Monte Carlo method for the calculation of radiative transfer in media of various optical thicknesses. *Int. J. Heat Mass Trans.*, Vol. 49, pp. 1310 - 1319, 2006.

[12] A. Saltelli, M. Ratto, T. Andres, F. Campolongo, J. Cariboni, D. Gatelli, M. Saisana et S. Tarantola. Global sensitivity analysis, The Primer. John Wiley and Sons, 2008.

[13] R.I. Cukier, R.I. Levine et K.E. Shuler. Nonlinear sensitivity analysis of multiparameter model systems. *J. Comput. Physics*, Vol. 26, pp. 1-42, 1978.

[14] I.M. Sobol. Sensitivity estimates for nonlinear mathematical models. *Math. Mod. and Comput. Exp.*, Vol. 1, pp. 407-414, 1993.