

Analyse de sensibilité pour la modélisation des incendies de forêts

Y. Billaud¹, M. De Gennaro¹, S. Garivait², A. Junpen², A. Phongphiphat², A. Kaiss¹, Y. Pizzo¹, B. Kadoch¹, Lotfi Zekri³, Nouredine Zekri³, B. Porterie¹

¹Aix-Marseille Université, CNRS, IUSTI UMR 7343, 13453 Marseille, France

²JGSEE, King Mongkut's University of Technology Thonburi, Bangkok, Thaïlande

³Université des Sciences et de la technologie d'Oran Mohamed Boudiaf, LEPM, Oran, Algérie

yann.billaud@polytech.univ-mrs.fr

Résumé : On présente les derniers développements d'un modèle de propagation des feux de forêts et sa validation sur un brûlage dirigé de la littérature. Une étude de sensibilité portant sur les paramètres *a priori* les plus influents du modèle a été également conduite. Elle a permis l'élaboration de corrélations simples pour le calcul de la vitesse de propagation à partir de ces paramètres.

Mots clés : feu de forêt, modèle, vitesse de propagation, plan factoriel, corrélation, sensibilité.

1. Introduction

La modélisation des feux de forêt à grande échelle est un enjeu à la fois sociétal et environnemental. Sociétal car l'augmentation de l'urbanisation entraîne une augmentation des interfaces périurbaines et donc des risques directs d'exposition aux feux des personnes et les biens. Environnemental car les feux sont source d'émissions de gaz et de particules qui, on le sait maintenant, contribuent au réchauffement climatique. En retour, les épisodes de sécheresse se multiplient, accentuant la fréquence et l'intensité des feux. La simulation numérique des feux de forêt est complexe car elle fait intervenir une grande variété d'échelles et de phénomènes physiques fortement couplés. Cette complexité est accrue par la grande diversité des scénarios de feu que l'on peut rencontrer, en termes de peuplements végétaux, de conditions météorologiques et de topographies. Cette étude présente les derniers développements d'un modèle de propagation d'incendie de forêts [1] ainsi que sa validation par confrontation avec des résultats expérimentaux issus d'un brûlage dirigé bien documenté. Une étude de sensibilité est effectuée permettant d'identifier les paramètres les plus influents du modèle et de formuler des corrélations reliant la vitesse de propagation à ces différents paramètres.

2. Modèle

2.1. Présentation

Le modèle utilisé ici s'inspire de celui proposé par Koo et al. [2]. Dans la version du modèle proposée ici, la végétation est discrétisée en cellules ou sites combustibles de forme cylindrique de hauteur H et de diamètre D (Fig. 1). Le volume impliqué dans le préchauffage n'est pas le volume du site tout entier mais plutôt le volume impliqué par le rayonnement du front de flammes, caractérisé par son libre parcours moyen δ . Ce dernier est directement relié au rapport surface/volume des éléments fins de végétation, $\sigma_k = S_k/V_k$, et à la fraction volumique de la phase solide k , $\alpha_k = V_k/V$, par la relation $\delta = 4/\sigma_k \alpha_k$. On suppose dans ce volume effectif, il est possible de définir des grandeurs moyennes comme la température, la teneur en eau, etc. On ne s'intéresse qu'aux éléments fins, ceux-là mêmes qui propagent le feu. La réponse d'un site exposé aux sollicitations extérieures est supposée se faire en trois étapes successives. En dessous de 373 K, l'énergie reçue sert à élever la température des éléments fins humides (WFF) jusqu'à la température d'évaporation. Une fois cette température atteinte, l'humidité s'évapore pour ne laisser que les éléments fins secs (DFF). Une fois la totalité de l'humidité contenue dans les éléments fins évaporée, le site s'échauffe jusqu'à atteindre une température d'inflammation T_{ig} . Le principe de conservation d'énergie appliqué à un site j soumis à l'influence de N_{bc} sites en feu indicés i mène alors à :

$$\sum_{i=1}^{N_{bc}} [q_{rad,f}^+(i) + q_{rad,b}^+(i) + q_{conv}^+(i)] = q_{rad}^-(j) + \begin{cases} \rho_{WFF} c_{p_{WFF}} \alpha_k \frac{dT(j)}{dt} & \text{pour } T(j) < 373K \\ -\rho_{DFE} L_{vap} \alpha_k \frac{dFMC(j)}{dt} & \text{pour } T(j) = 373K \\ \rho_{DFE} c_{p_{DFE}} \alpha_k \frac{dT(j)}{dt} & \text{pour } 373K < T(j) < T_{ign} \end{cases} \quad (1)$$

où L_{vap} est la chaleur latente de vaporisation et FMC le teneur en eau définie comme le rapport entre la masse d'eau et la masse de combustible sec. La masse volumique ρ_{WFF} et la capacité thermique $c_{p_{WFF}}$ des éléments fins humides se déduisent de ceux des éléments fins secs et de l'eau. Les termes du membre de gauche de l'éq.(1) représentent les puissances volumiques reçues par un site j dues au rayonnement des sites en feu et à la convection des gaz chauds provenant du front de flammes. Ils sont explicités ci-dessous.

La quantité d'énergie apportée par la flamme issue de la combustion du site i , notée $q_{rad,f}^+(i)$, est calculée par une méthode de Monte Carlo exposée en détail dans [4]. Dans cette méthode, l'hypothèse de flamme solide est utilisée et l'ensemble des propriétés de flamme, assimilée à une enveloppe cylindrique, sont calculées à partir de corrélations empiriques. Ainsi, la hauteur de flamme, soumise à l'influence d'un vent d'intensité à mi-hauteur de flamme, U , s'écrit [5]:

$$H_f = H_{f0} \left(1 + 4 \frac{U^2}{gH_{f0}} \right)^{-0.5} \quad (2)$$

où g est l'accélération de la pesanteur et H_{f0} la hauteur de flamme sans vent donnée par [6]: $H_{f0} = 0.0148\dot{Q}^{2/5} - 1.02D$. Dans cette relation D est le diamètre du site et \dot{Q} la puissance dégagée par la combustion des éléments fins constituant le site. En considérant cette puissance constante pendant un temps t_c , défini comme le temps de résidence de flamme, il vient :

$$\dot{Q} = (1 - \alpha_{char}) \frac{m_{DFE}''}{t_c} \Delta h_c S_b \quad (3)$$

où α_{char} est la fraction volumique de résidu carbonneux, m_{DFE}'' la charge en éléments fins secs, Δh_c la chaleur de combustion des gaz volatils et $S_b = \pi D^2/4$. Le pouvoir émissif par unité de surface de flamme est évalué par la relation suivante :

$$P_f'' = \chi_R \dot{Q} / S_f \quad (4)$$

où S_f est la surface de flamme et χ_R la fraction d'énergie libérée par la combustion perdue par rayonnement.

La quantité d'énergie apportée par le rayonnement des braises a été calculée en intégrant la loi de Beer-Lambert sur le diamètre du site récepteur j :

$$q_{rad,b}^+(i) = a_{fb} \sigma T_b^4 \frac{1}{D_j} (\exp(-d_1/\delta) - \exp(-d_2/\delta)) \quad (5)$$

où a_{fb} est l'absorptivité du milieu végétal, T_b la température des braises, D_j le diamètre du site j , $d_1 = d_{ij} - \frac{D_i + D_j}{2}$ et $d_2 = d_{ij} - \frac{D_i - D_j}{2}$ où d_{ij} est la distance entre le centre des sites i et j .

La quantité d'énergie apportée par convection est calculée en considérant une décroissance exponentielle de la température basée sur une longueur caractéristique égale à trois fois la longueur de flamme [7] :

$$q_{conv}^+(i) = \frac{h}{\delta} (T_f - T_j) e^{-0.3d_{ij}/L_f} \quad (6)$$

où h est le coefficient de transfert convectif d'un écoulement turbulent sur une plaque plane [8].

Les pertes radiatives qui sont dues aux échanges avec l'environnement à T_∞ sont données par : $q_{rad}^-(j) = \frac{1}{\delta} \varepsilon_{fb} \sigma (T_j^4 - T_\infty^4)$. Les autres mécanismes de transfert d'énergie tels que la conduction ou le refroidissement convectif sont négligés. Le phénomène d'écrantage par un site en feu intercalé entre les sites i et j est considéré.

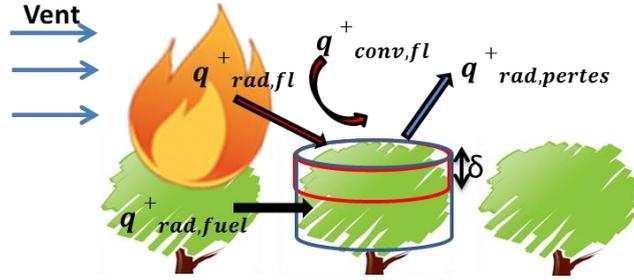


Figure 1 : Illustration des termes sources du bilan d'énergie d'un site.

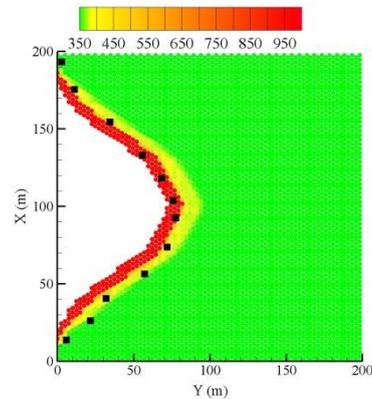
2.2. Validation

Le modèle est validé sur un brûlage dirigé réalisé en Australie [9,10]. Le domaine de $200m \times 200m$ est constitué d'herbacées de type *Themeda Australis* dont les propriétés sont indiquées dans le Tableau 1. La végétation recouvre l'intégralité du domaine. Le vent est constant pendant toute la durée de l'expérience et souffle dans la direction normale à la ligne d'allumage (Figure 2).

Tableau 1 : Paramètres utilisés pour la validation.

Teneur en résidu charbonneux	α_{char} [-]	0.2
Rapport surface/volume	σ_k [m^{-1}]	12240
Densité	$(\rho_k)_{DFE}$ [$kg \cdot m^{-3}$]	512
Capacité thermique	$(Cp_k)_{DFE}$ [$J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$]	1470
Teneur en eau initiale	$FMCO$ [-]	0.058
Fraction vol. phase solide	α_k [-]	1.12×10^{-3}
Épaisseur optique	δ [m]	0.29
Absorptivité du milieu végétal	a_{fb}	0.9
Emissivité du milieu végétal	ε_{fb}	0.9
Température d'inflammation	T_{ig} [K]	561
Hauteur de strate	H_f [m]	2.09
Temps de résidence de flamme	t_c [s]	6
Fraction rayonnée	χ_r [-]	0.3
Coefficient d'extinction	κ [m^{-1}]	0.4
Charge en éléments fins secs	m''_{DFE} [$kg \cdot m^{-2}$]	0.3
Vitesse du vent	U [$m \cdot s^{-1}$]	4.5
Humidité relative de l'air	RH [-]	0.2

La figure 4 montre les photographies de l'expérience F19 après 56s et 86s de propagation et la comparaison entre les contours de feu prédits et relevés expérimentalement. Concernant le périmètre du feu, l'accord est excellent dans les deux cas. Un second critère de comparaison est l'épaisseur du front de flamme au niveau de la tête du feu car celui-ci dépend à la fois de la vitesse et du temps de résidence de flamme ($d = ros \times t_c$). Un très bon accord est trouvé, avec une épaisseur prédite de 11m très proche de celle de 10m observée expérimentalement.



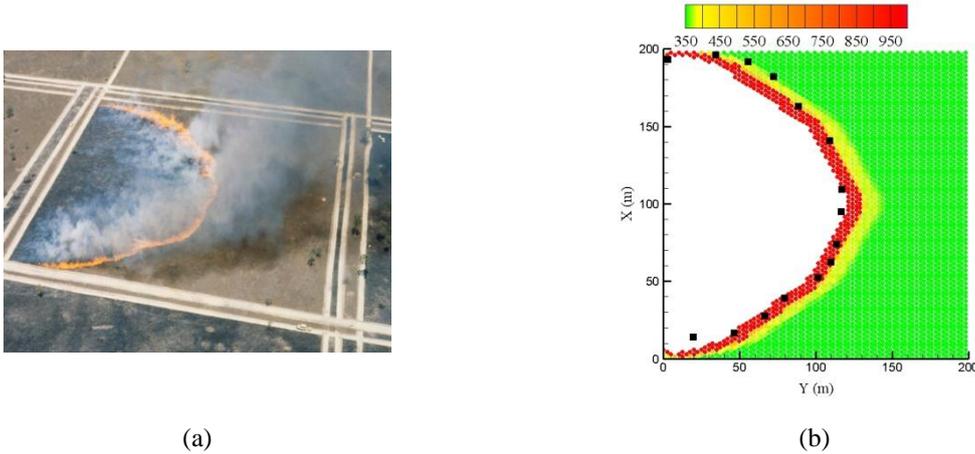


Figure 2 : (a) Photographies du feu après 56s et 86s de propagation et (b) comparaison des contours simulés (en rouge) et relevés expérimentalement (carrés noirs).

3. Etude de sensibilité

3.1. Présentation

Une étude de sensibilité portant sur 5 paramètres du modèle a été conduite. Le choix s'est porté sur les paramètres *a priori* les plus sensibles. Cette étude, basée sur un plan factoriel complet à deux niveaux [11], analyse l'effet de variations de ces paramètres sur la vitesse de propagation. Ces paramètres, notés X_i , sont indiqués dans le tableau 2 avec les valeurs *Min* et *Max* utilisées.

Tableau 2 : Paramètres de l'étude de sensibilité et domaine de variation.

Variable	Paramètre	Symbole [unité]	Variation	Min	Max
X_1	Vitesse du vent	U [$m \cdot s^{-1}$]	$\pm 22\%$	3.5	5.5
X_2	Température d'inflammation	T_{ig} [K]	$\pm 4\%$	540	582
X_3	Fraction rayonnée	χ_r [-]	$\pm 17\%$	0.25	0.35
X_4	Temps de résidence de flamme	t_c [s]	$\pm 17\%$	5	7
X_5	Charge en élément fin	m''_{DFE} [$kg \cdot m^{-2}$]	$\pm 17\%$	0.25	0.35

Le principe de la méthode consiste à approximer la réponse du système, ici la vitesse de propagation, en fonction des paramètres du modèle :

$$ros = \beta_0 + \sum_{i=1}^5 \beta_i X_i + \sum_{i=1}^5 \sum_{j=1}^5 \beta_{ij} X_i X_j + \dots \quad (7)$$

Concrètement, cela consiste à construire un système d'équations en simulant l'ensemble des combinaisons possibles, soit $2^5 = 32$ simulations, et en mesurant la vitesse de propagation de chaque simulation. Les coefficients $\beta_0, \beta_i, \beta_{ij}, \dots$ sont calculés en inversant le système ainsi obtenu. Ils représentent respectivement la solution de référence, les effets principaux et d'interaction entre paramètres.

3.2. Résultats

Les paramètres déterminants sont, par ordre d'influence, la vitesse du vent, la charge sèche de combustible, la température d'inflammation, la fraction rayonnée, et le temps de résidence de flamme (Figure 3). On observe également une influence non négligeable de certaines interactions comme β_{15} entre le vent et la charge. Ces deux paramètres sont liés par la flamme : une forte charge génère une flamme puissante opposant une forte résistance au vent, en revanche une faible charge va générer une flamme plus sensible aux effets du vent. Les termes d'ordres supérieurs comme $\beta_{2345}, \beta_{234}$ ou β_{1235} reflètent le caractère fortement couplé des différents mécanismes physiques pris en compte dans le modèle.

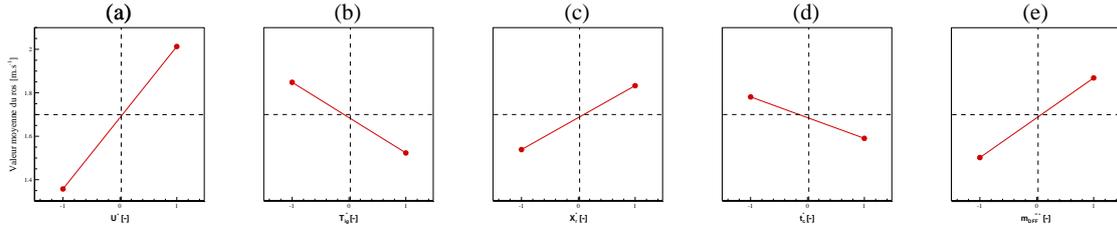


Figure 3 : Illustration de la sensibilité des paramètres : (a) vitesse du vent, (b) température d'inflammation, (c) fraction rayonnée, (d) temps de résidence de flamme et (e) charge sèche.

Cette méthode permet également de calculer la vitesse de propagation en appliquant la formule générale (eq. 7). Par exemple, au premier ordre, elle peut s'écrire :

$$ros_1 = 1,6853 + \frac{0,3278}{1}(U - 4,5) - \frac{0,16}{21}(T_{ig} - 561) + \frac{0,1471}{0,05}(\chi_R - 0,3) - \frac{0,0955}{1}(t_c - 6) + \frac{0,1855}{0,05}(m''_{DFP} - 0,3) \quad (8)$$

On peut calculer la moyenne de l'erreur relative commise en utilisant cette formule par rapport aux résultats des calculs, celle-ci est de 6.17%. On peut améliorer cette estimation en rajoutant les termes d'ordre 2 comme par exemple $\frac{0,0542}{1 \times 0,05}(U - 4,5)(m''_{DFP} - 0,3)$. L'erreur relative vaut alors 4.44%.

4. Conclusion

Les dernières avancées d'un modèle de propagation hybride ont été présentées. Le modèle prend désormais en compte le réchauffement convectif par les gaz chauds provenant de la zone de flammes et le rayonnement des braises. Le modèle a été validé sur un feu expérimental en termes de vitesse de propagation et de contour du feu. Un plan d'expérience complet a été appliqué au modèle afin d'identifier les paramètres du modèle les plus influents sur la vitesse de propagation. L'analyse de sensibilité a permis d'établir des corrélations simples donnant la vitesse de propagation en fonction de ces paramètres.

Remerciements

Les auteurs tiennent à remercier la Commission for Higher Education in Thailand, le Thailand Research Fund, le National Science and Technology Development Agency in Thailand, ainsi que le ministère des Affaires étrangères et le ministère de l'Enseignement supérieur et de la recherche pour leur soutien financier dans le cadre du programme Hubert Curien SIAM 2012 (N° 27571PF).

Références

- [1] J.K. Adou, Y. Billaud, D.A. Brou, J.-P. Clerc, J.-L. Consalvi, A. Fuentes, A. Kaiss, F. Nmira, B. Porterie, L. Zekri and N. Zekri, A hybrid small-world network/semi-physical model for predicting wildfire spread in heterogeneous landscapes, *Ecol. Model.*, Volume 221, Pages 1463–1471, 2010.
- [2] E. Koo, P.J. Pagni, J. Woycheese, S. Stephens, D. Weise and J. Huff, A simple physical model for forest fire spread, *IAFSS Proc.*, Volume 8, Pages 851-862, 2005.
- [3] R.C. Rothermel, Intermountain Forest and Range Experiment Station, *RP INT-115*, Odgen, Utah, 1972.
- [4] Y. Billaud, A. Kaiss, J.-L. Consalvi, B. Porterie, Monte Carlo estimation of thermal radiation from wildland fires, *International Journal of Thermal Sciences*, Volume 50, Issue 1, Pages 2–11, January 2011
- [5] A.A. Putnam, A model study of wind-blown free-burning fires, *Symp Combust Proc*, Volume 10, Pages 1039-1046, 1965.
- [6] G. Heskestad, Luminous heights of turbulent diffusion flames, *Fire Safety Journal*, Volume 5, Pages 103-108, 1983.
- [7] P.J. Pagni and T.P. Peterson, Flame spread through porous fuels, *Symp. Combust. Proc.*, Volume 14, Pages 1099-1107, 1973.
- [8] F.P. Incropera and D.P. DeWitt, *Fundamentals of Heat and Mass Transfer* (John Wiley & Sons, NY), 1985.
- [9] N.P. Cheney, J.S. Gould and W.R. Catchpole, The influence of fuel, weather and fire shape variables on fire spread in grasslands, *Int. Journal of Wildland Fire*, Volume 3(1), Pages 31-44, 1993.
- [10] N.P. Cheney, J.S. Gould and W.R. Catchpole, Prediction of fire spread in grasslands, *Int. Journal of Wildland Fire*, Volume 9 (1), Pages 1-13, 1998.
- [11] D.M. Hamby, A review of techniques for parameter sensitivity analysis, *Environmental Monitoring and Assessment*, Volume 32, Pages 135-154, 1994.