

Modélisation des embrasements généralisés éclairs par un modèle de type « petit monde ».

Yann Billaud*, Jean-Louis Consalvi, Andres Fuentes, Ahmed Kaiss, Bernard Porterie

Laboratoire IUSTI, Technopole de Château-Gombert
5 rue Enrico Fermi - 13453 Marseille, France

*(auteur correspondant : yann.billaud@polytech.univ-mrs.fr)

Résumé - Les embrasements généralisés éclairs, dans le domaine des incendies de forêt, n'ont pas encore livré tous leurs secrets. Il s'agit d'une inflammation extrêmement brutale de plusieurs hectares. Aucune modélisation incluant l'ensemble des phénomènes mis en jeu n'a encore été effectuée. Dans la présente étude, un modèle stochastique de type « petit monde » est utilisé pour modéliser ce phénomène. L'interaction entre sites actifs et sites imbrulés est supposée entièrement radiative et est traitée par une méthode de Monte Carlo. Une étude numérique sur terrain idéalisé (2 plans inclinés) est menée dans le but d'établir des critères d'apparition du phénomène.

Nomenclature

E_c	énergie critique d'allumage, kJ	α	porosité
t_c	temps de combustion, s	σ	rapport surface-volume, m ⁻¹
L	longueur, m	ρ	masse volumique, kg.m ⁻³
E'_p	pouvoir émissif, kW.m ⁻²	<i>Indices et exposants</i>	
Δh_c	chaleur de combustion, kJ.kg ⁻¹	f	flamme
χ_r	fraction rayonnée	k	élément fin
S	surface, m ²	w	eau
m	masse, kg	<i>heating</i>	relatif au préchauffage
T	température, K	<i>vap</i>	vaporisation
F	facteur de forme	<i>ign</i>	allumage
r_{site}	rayon d'un site, m	i	site non actif
δl	profondeur de pénétration, m	j	site actif

1. Introduction

Les embrasements généralisés éclairs (EGE) sont une inflammation extrêmement brutale de plusieurs hectares. Ils peuvent avoir lieu dans des configurations diverses et variées. Cependant la majorité des auteurs [1-4] sur le sujet s'accordent à penser que le changement subite de comportement est dû au passage d'un régime de flamme de diffusion à un régime de flamme de pré-mélange. Les circonstances dans lesquelles l'accumulation d'une poche de gaz combustible en avant du front de feu a lieu sont encore très peu comprises et surprennent régulièrement les soldats du feu, parfois de façon tragique. La plupart des accidents mortels ont donné lieu à un ou plusieurs articles scientifiques : l'accident de Palasca en Corse en 2000 [5] ou alors l'accident de Camberra en janvier 2003 [6-7]. Les feux éruptifs ont aussi été étudiés expérimentalement en laboratoire puis à échelle réelle par Viegas et Pita en 2004 [8]. Récemment Viegas [2-3] propose une formulation permettant de modéliser comment un feu éruptif se produit.

Dans le présent article deux configurations susceptibles de générer des EGE sont étudiées à l'aide d'un modèle stochastique de type 'petit monde'. Le second paragraphe présente le modèle tandis que les résultats sont discutés dans le troisième paragraphe. Finalement les conclusions de cette étude sont relatées.

2. Modèle

2.1. Description du modèle

Le modèle utilisé s'inspire largement du modèle stochastique de type « petit monde » développé par Porterie et al [9]. Comme dans une approche de type automate cellulaire, le combustible, généralement très hétérogène, est discrétisé en sites (arbres, buissons ou paquets d'herbes) supposés sphériques. Le modèle est basé sur l'utilisation d'un réseau amorphe permettant entre autre d'introduire une distribution des caractéristiques du végétal (taille de site, porosité, humidité, rapport surface volume,...) ou la présence de plusieurs espèces (sur une même zone ou aux interfaces). Les paramètres du modèle sont l'énergie critique d'allumage E_c , le temps de combustion d'un site t_c , la longueur de flamme L_f , et son pouvoir émissif E_p'' en terme de rayonnement. Ils sont estimés à partir de considérations concernant la végétation et les conditions météorologiques. Des comparaisons entre les résultats du modèle et des résultats expérimentaux obtenus sur brûlages dirigés ont montré sa capacité à prédire les vitesses de propagation et la forme du front de feu pour différentes vitesses de vent.

2.2. Détermination des paramètres

Dans la présente étude le chêne kermès (*Quercus coccifera*) est considéré dans la mesure où cette espèce est très abondante dans les régions méditerranéennes. Une distribution en taille de type Gaussienne centrée sur $r_{site}=0.5m$ et d'espérance $\mu=0.5$ est considérée pour mieux décrire l'hétérogénéité de la végétation. Le taux d'occupation est fixé à 0.4. La charge au sol en mètre carré et la fraction d'éléments fins (éléments végétaux participant à la propagation) sont estimées à partir des travaux de Dureau [10]. La masse en éléments fins d'un site se déduit de ces deux précédentes variables. Le temps de combustion d'un site est fortement dépendant du ratio surface-volume de sa phase solide [11], ce qui justifie de considérer le temps de combustion comme indépendant de la taille d'un site. En accord avec les travaux de Trabaud [12], le temps de combustion est fixé à $t_c=15s$. Nous supposons le débit de pyrolyse constant durant t_c . Le pouvoir calorifique pouvant être déterminé par l'expérience et en estimant la fraction rayonnée χ_r [13], nous calculons le pouvoir émissif par unité de surface de la flamme:

$$E_p'' = \chi_r m_k / t_c \Delta h_c / S_f \quad (1)$$

S_f est la surface de la flamme supposée cylindrique. La longueur de flamme L_f est estimée à partir des travaux expérimentaux d'Heskestad [14].

La combustion d'un site démarre lorsqu'il a accumulé une quantité suffisante d'énergie sous l'effet radiatif du front. Cette énergie critique est calculée en considérant l'énergie nécessaire pour amener la phase solide à une température d'allumage, fixée à $T_{ign}=567K$ [15]. On considère que l'évaporation de l'humidité s'effectue à la température de $T_{vap}=373K$. La masse mise en jeu dans le processus d'allumage est supposée contenue dans une calotte sphérique d'épaisseur correspondant à la profondeur de pénétration du rayonnement dans la strate $\delta l=4/\alpha_k \sigma_k$:

$$m_{k-heating} = \rho_k \alpha_k \frac{4}{3} \pi \{ r_{site}^3 - (r_{site} - \delta l)^3 \} \quad (2)$$

Le combustible étant considéré comme un corps noir thermiquement fin, l'énergie critique est donnée par :

$$E_c = \chi_{heating} [m_{w-heating} C_{p_{water}} (T_{vap} - T_{\infty}) + m_{k-heating} C_{p_{fuel}} (T_{vap} - T_{\infty}) + m_{w-heating} L_{vap} + m_{k-heating} C_{p_{fuel}} (T_{ign} - T_{vap})] \quad (3)$$

Le préfacteur $\chi_{heating}$, traduit qu'une partie seulement du site est impliqué dans la dégradation et a été calibré sur feux expérimentaux.

2.3. Procédure de contamination

La flamme issue de la dégradation thermique d'un site est assimilée à un cylindre de rayon égal au rayon du site. Le rayonnement émit par le site j est absorbé par le site i . N_f est le nombre total de sites actifs constituant le front de l'incendie.

$$(E_i)_{t+dt} = (E_i)_t + \sum_{j=1}^{N_f} F_{i-j} E''_{p_j} S_{f_j} \quad (4)$$

F_{i-j} est le facteur de forme entre les sites i et j et est déterminé par une méthode de Monte Carlo du fait de la complexité de la configuration. La procédure prend en compte le blocage du rayonnement par les sites et les flammes situés entre i et j .

3. Résultats et Discussions

Deux configurations sont considérées. La première configuration est relative à la propagation d'un feu arrivant sur une pente d'angle α par rapport à l'horizontale. La seconde est une idéalisation d'un talweg. L'étude de sensibilité consiste à faire varier l'angle α que font les plans avec l'horizontale. Cette étude est menée dans le but d'établir des critères d'apparition du phénomène. L'allumage est ponctuel, nous ne considérons aucun vent.

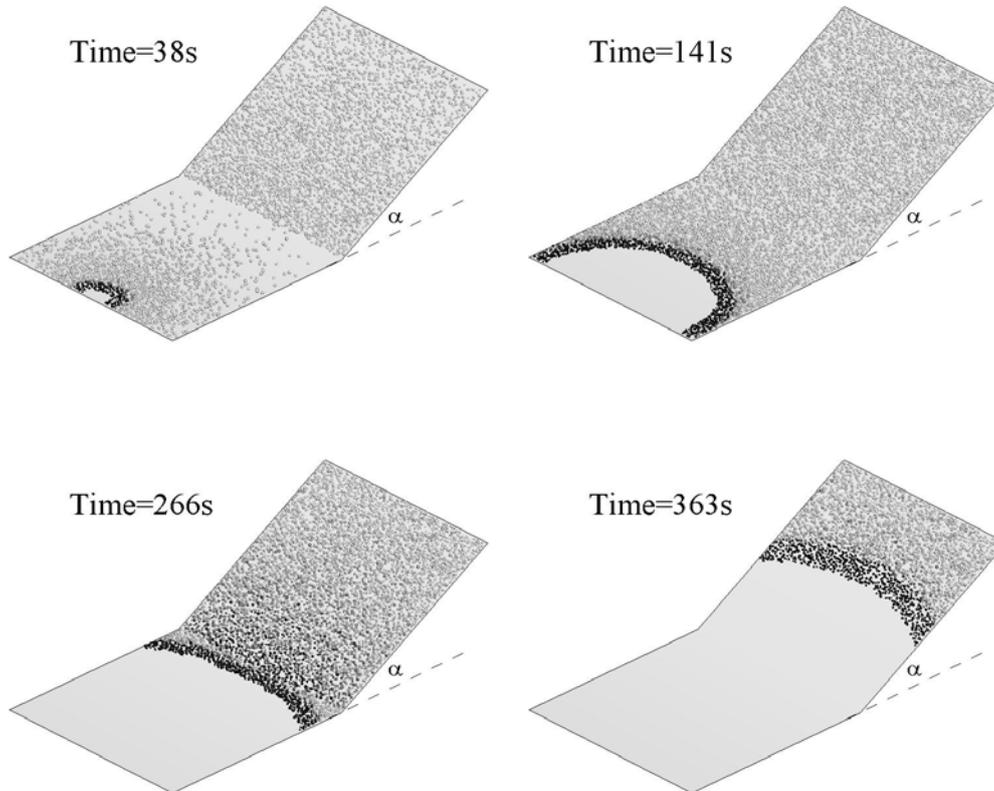


Figure 1 : Evolution spatio-temporelle du front de flamme (noir) et niveau de dégradation de la végétation (gris) dans une configuration de type 'rupture de pente'. $\alpha=30^\circ$

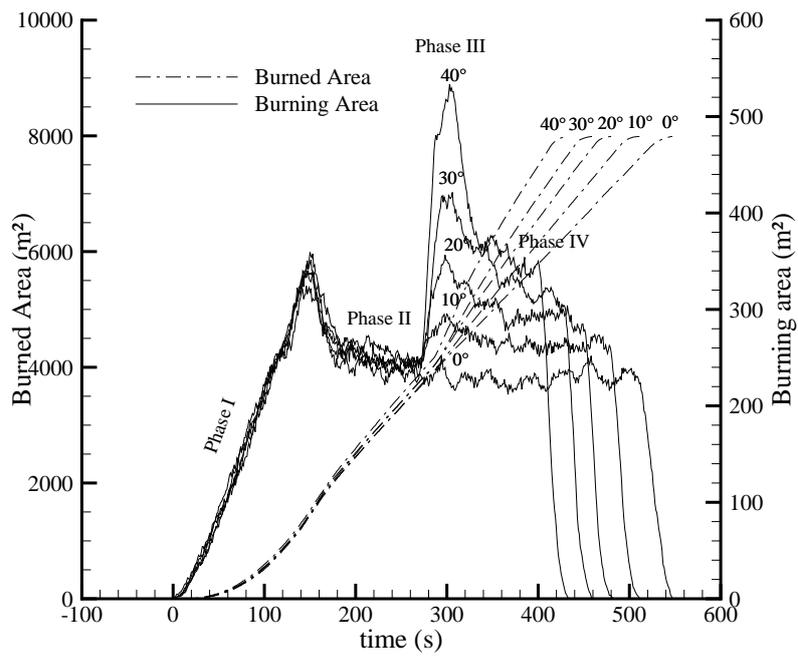


Figure 2 : Evolution de la surface brûlée (pointillé) et de la surface en feu (trait plein) au cour du temps pour différents angles (0° - 40°) dans une configuration de type 'rupture de pente'.

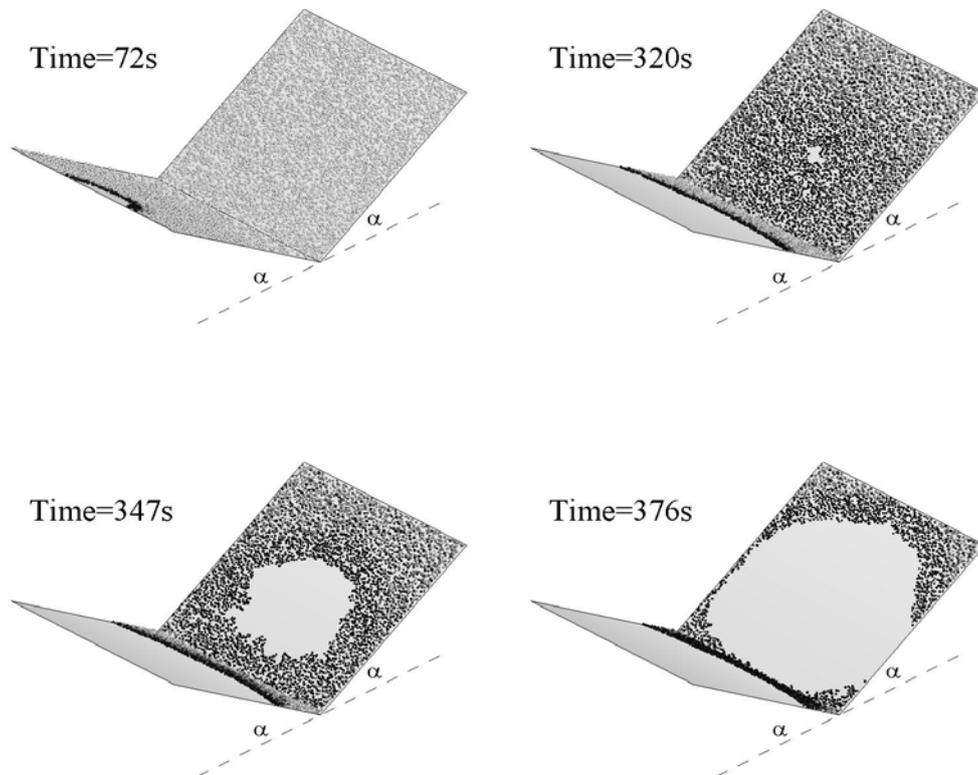


Figure 3 : Evolution spatio-temporelle du front de flamme (noir) et niveau de dégradation de la végétation (gris) dans une configuration de type 'talweg'. $\alpha=30^{\circ}$

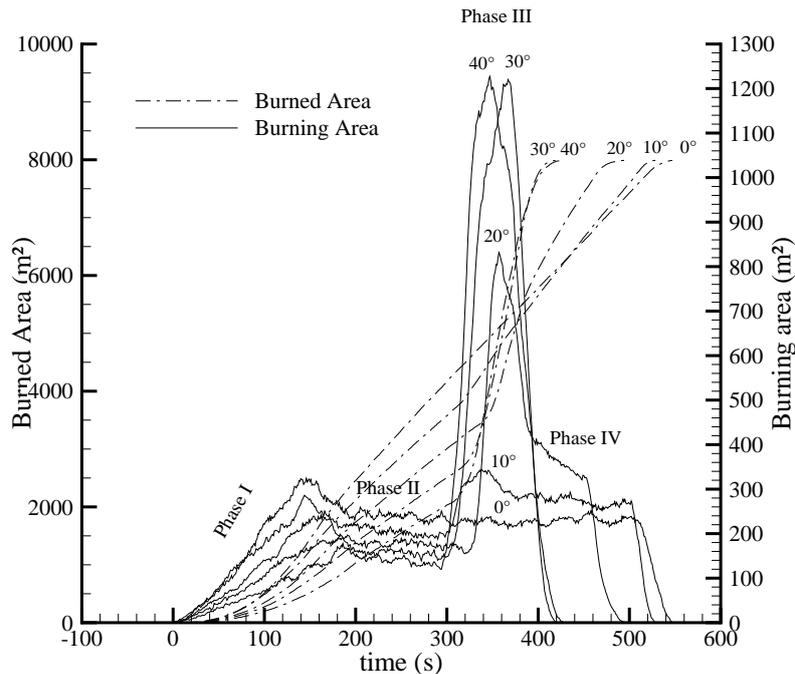


Figure 4 : Evolution de la surface brûlée (pointillé) et de la surface en feu (trait plein) au cours du temps pour différents angles (0° - 40°) dans une configuration de type 'talweg'.

Dans la configuration dite en 'rupture de pente', l'évolution de la surface en feu se décompose en 4 phases : la première montre une augmentation relative à un développement latéral du feu. Une fois que le front atteint les bords du domaine, la surface en feu reste relativement constante (phase II). Dans le cas où la pente est nulle cette valeur de la surface en feu persiste jusqu'à la fin de la propagation. Dans les autres cas, la surface en feu augmente lorsque le front rencontre la pente (Phase III). Cette augmentation provient, d'une part de l'accélération du front due à la pente, mais également au préchauffage de la végétation qui a eu lieu durant la propagation sur la partie plane. Cette augmentation est d'autant plus importante que la pente est grande, conduisant à des surfaces en feu qui peuvent être 2.5 ($\alpha=40^{\circ}$) fois plus grandes que dans le cas de pente nulle. Par la suite, cet effet transitoire s'atténue pour ne laisser apparaître que l'effet de la pente, conduisant tout de même à des vitesses de propagation plus importantes que dans le cas plat (Phase IV). Les résultats obtenus nous aident à mieux appréhender les mécanismes. Durant les 2 premières phases, le front préchauffe la végétation située sur la face opposée. Ce préchauffage conduit à la libération de produits de pyrolyse qui, se mélangeant à l'air, peuvent s'accumuler et s'embraser au contact du front.

Dans la configuration 'talweg', le front se propage initialement en descente. Les quatre phases discutées précédemment apparaissent également. Cette fois-ci l'accroissement de la surface en feu atteint dans cette configuration une valeur 6 fois plus grande ($\alpha=30,40^{\circ}$) que dans le cas de pente nulle. Il en résulte que cette configuration apparaît plus critique pour l'apparition des EGE que la première. Ceci est dû à une géométrie plus propice au préchauffage ainsi qu'à une vitesse de propagation plus faible lors des 2 premières phases ce qui a pour effet d'augmenter le temps d'exposition de la végétation au rayonnement.

4. Conclusion

Deux configurations susceptibles de conduire à des EGE ont été étudiées à l'aide d'un modèle stochastique de « type » petit monde. La première configuration considère une

propagation sur une surface plane jusqu'à une rupture de pente d'angle variant entre 0 et 40°. La surface en feu augmente avec la pente du fait d'un préchauffage du front de flamme durant sa propagation sur la zone plane. La surface en feu peut alors être 2.5 fois plus importante que dans le cas sans pente. La seconde configuration est une modélisation d'un talweg. Au niveau de ce talweg la surface en feu peut être 6 fois plus importante que dans le cas à plat. Ces deux configurations sont, par conséquent, susceptibles de conduire à des EGE.

Références

- [1] E. Peuch, Wild fire safety: feed back on sudden ignitions causing fatalities. *4th International Wildland Fire Conference*. Seville, Spain (2007).
- [2] D. X. Viegas, A mathematical model for forest fires blowup. *Combust. Sci. and Tech.* 177. 27-51 (2005).
- [3] D. X. Viegas, Parametric study of an eruptive fire behaviour model. *International Journal of Wildland Fire*. 15, 169-177 (2006).
- [4] J.W. Dold, R.O. Weber, M. Gill, R. McRae, N. Cooper, Unusual phenomena in an extreme bushfire. *5th Asia Pacific Conference on Combustion*. Adelaide. 309-312 (2005).
- [5] N. Raffalli, C. Picard, F. Giroud, Safety and awareness of people involved in forest fires suppression. *4th Int. Conf. on Forest Fire Research*. Coimbra, Portugal (2002)
- [6] L. Donoghue, G. Jackson, R. Angel, G. Beebe, K. Bishop, K. Close, R. Moore, E. Newman, M. Schmidt, C. Whitlock, Cramer Fire Fatalities. Accident Investigation Factual Report. *U.S. Dep. Agr., Forest Serv., North Fork Ranger District*, (2003).
- [7] C. Williams, Ignition impossible: when wildfires set the air alight. *New Scientist* (2615). 38-40, (2007)
- [8] D. X. Viegas, L.P. Pita, Fire spread in canyons. *International Journal of Wildland Fire*. Vol 13. 253-274, (2004)
- [9] B. Porterie, N. Zekri, J-P. Clerc, J-C. Loraud, Modeling forest fire spread and spotting process with small world networks. *Comb. Flame*. 149, 63-78, (2007).
- [10] R. Dureau, Gestion des garrigues à chêne kermès sur coupures de combustible. Réseau Coupures de combustible - *Éd. de la Cardère Morières*, (2003), 83 p.
- [11] H.E. Anderson, Heat transfer and fire spread. *USDA Forest Service Research*. Paper INT-69 (1969).
- [12] L. Trabaud, Etude du comportement du feu dans les garrigues du chêne Kermès à partir des températures et des vitesses de propagation. *Ann. Sci. Forest*. Vol. 36, 13-38, (1979)
- [13] J.G. Quintiere. Principles of Fire Behavior. *Delmar Publishers*. Albany, (1997).
- [14] G. Heskestad, Fire Safety Science, *Proceedings of the Fifth International Symposium*. International Association for Fire Safety Science (1998).
- [15] A.M. Grishin, Mathematical Modeling of Forest Fires and New Methods of Fighting them, *Pub. House*. Tomsk University, Tomsk, Russia (1992).