



**HAL**  
open science

## Modelling the spreading of large-scale wildland fires

Mohamed Drissi, Yann Billaud, Ahmed Kaiss, Bernard Porterie

► **To cite this version:**

Mohamed Drissi, Yann Billaud, Ahmed Kaiss, Bernard Porterie. Modelling the spreading of large-scale wildland fires. CFM 2013 - 21ème Congrès Français de Mécanique, Aug 2013, Bordeaux, France. ⟨hal-03441338⟩

**HAL Id: hal-03441338**

**<https://hal.science/hal-03441338v1>**

Submitted on 22 Nov 2021

**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.



HAL Authorization

# Un modèle de propagation de feu de végétation à grande échelle

M. DRISSI<sup>a</sup>, Y. BILLAUD<sup>a</sup>, A. KAISS<sup>a</sup>, B. PORTERIE<sup>a</sup>

a. Aix-Marseille Université, CNRS, IUSTI UMR 7343, 13453 Marseille, France

## Résumé :

*On présente tout d'abord les dernières avancées et la validation d'un modèle hybride de propagation des feux de forêts à grande échelle prenant en compte les hétérogénéités locales liées à la végétation, à la topographie du terrain et aux conditions météorologiques. Le modèle hybride est un modèle de réseau où les phénomènes qui se produisent à l'échelle macroscopique sont traités de façon déterministe, comme le préchauffage du site végétal provenant du rayonnement de la flamme et de la convection par les gaz chauds, mais aussi son refroidissement radiatif. La phase de validation a porté sur l'analyse comparative des contours de feux calculés par le modèle avec ceux mesurés lors d'un brûlage dirigé d'herbacées réalisé en Australie, montrant un très bon accord en termes de vitesse de propagation, de contours de feu et de surface brûlée. Un plan factoriel complet à deux niveaux est ensuite utilisé pour étudier la sensibilité de la solution aux variations de six paramètres a priori influents du modèle.*

## Abstract:

*The objective of the present study is twofold. First, the last developments and validation results of a hybrid model designed to simulate fire patterns in heterogeneous landscapes are presented. The model combines the features of a stochastic small-world network model with those of a deterministic semi-physical model of the interaction between burning and non-burning cells that strongly depends on local conditions of wind, topography, and vegetation. Radiation and convection from the flaming zone, and radiative heat loss to the ambient are considered in the preheating process of unburned cells. The model is applied to an Australian grassland fire experiment. Predictions compare favorably to experiments in terms of rate of spread, area and shape of the burn. Second, the sensitivity of model outcomes (here the rate of spread) to six input parameters is studied using a two-level full factorial design.*

**Mots clefs :** feu de forêt, modèle de réseau, rayonnement, convection, étude de sensibilité, validation, brûlage dirigé.

## 1. Introduction

Dans le domaine des feux de végétation, on distingue généralement deux échelles: l'échelle macroscopique (celle du pompier qui lutte sur le terrain) et l'échelle gigascopique (celle des images aériennes ou satellitaires). Quant aux phénomènes qui se produisent aux échelles inférieures, ceux-ci sont globalisés au travers de termes source dans les équations moyennées qui régissent le feu aux échelles supérieures. C'est le cas des processus de déshydratation, de pyrolyse et d'oxydation du résidu carbonneux, mais aussi des processus d'échange entre la végétation et le gaz qui l'entoure. Les modèles conçus à l'échelle macroscopique sont des modèles de combustion [1-4] qui reposent, pour la plupart, sur une description diphasique de l'écoulement et présentent une grande généralité. La plupart des phénomènes de base qui régissent l'éclosion et la propagation du feu sont généralement pris en compte : transport de gaz, turbulence, dégradation thermique du matériau, combustion turbulente, rayonnement, échanges entre le gaz et le milieu solide. Un modèle détaillé requiert la résolution numérique des équations de bilan de masse, d'énergie, et de quantité de mouvement pour chaque phase et de l'équation du transfert radiatif. Une simulation réaliste

nécessite donc de résoudre un système comportant plusieurs dizaines d'équations aux dérivées partielles non linéaires et fortement couplées. Le temps de résolution numérique important qui en résulte limite les applications à des domaines de faible étendue, typiquement de quelques centaines de mètres dans les trois directions d'espace. Ces modèles détaillés doivent donc être considérés comme des modèles de connaissance, permettant de mieux comprendre le comportement du feu, de tester des hypothèses alternatives ou d'enrichir les modèles réduits, mais ne sont pas adaptés à la simulation de la propagation des incendies à l'échelle gigascopique. A l'échelle gigascopique, on parle de modèles de propagation. Ils sont de plusieurs types, selon la physique qu'ils contiennent ou mieux selon la nature de l'approche qu'ils utilisent : les modèles déterministes (ex. [5]) et les modèles stochastiques (ex. [6]). Les modèles déterministes de propagation sont des modèles semi-physiques qui nécessitent la détermination de paramètres dépendant du feu lui-même, ce qui restreint considérablement leur domaine de validité. Ils ont néanmoins un intérêt opérationnel indéniable. Parmi les modèles stochastiques, les modèles de réseau (percolation, automate cellulaire, etc.) sont les plus utilisés. Néanmoins, l'utilisation de réseaux réguliers, où les connexions sont limitées aux plus proches voisins d'un site en feu, ne permet pas d'inclure les effets à longue distance comme le rayonnement de la flamme ou la convection des gaz chauds [7]. C'est la raison pour laquelle nous avons utilisé et étendu le modèle de réseau de « petit monde » [8] qui permet de prendre en compte les effets à courte et longue distances. L'extension du modèle a notamment consisté à décrire le plus finement possible les phénomènes qui se produisent à l'échelle macroscopique, à savoir le préchauffage de la strate végétale réceptive par le rayonnement de la flamme et la convection des gaz chauds, mais aussi son refroidissement radiatif vers l'environnement. Nous verrons que cela repose sur la résolution d'une équation instationnaire de l'énergie incluant l'ensemble des processus thermiques.

## 2. Le modèle de propagation

### 2.1 Le réseau

Dans ce travail, la végétation est supposée uniforme et homogène. Elle peut alors être représentée par un réseau triangulaire de sites combustibles cylindriques, de diamètre  $D$  et de hauteur  $H$ , où les sites sont placés aux sommets de triangles équilatéraux (figure 1). Le taux de couverture végétale est alors maximum et égal à  $\pi/2\sqrt{3} \sim 0.91$ .

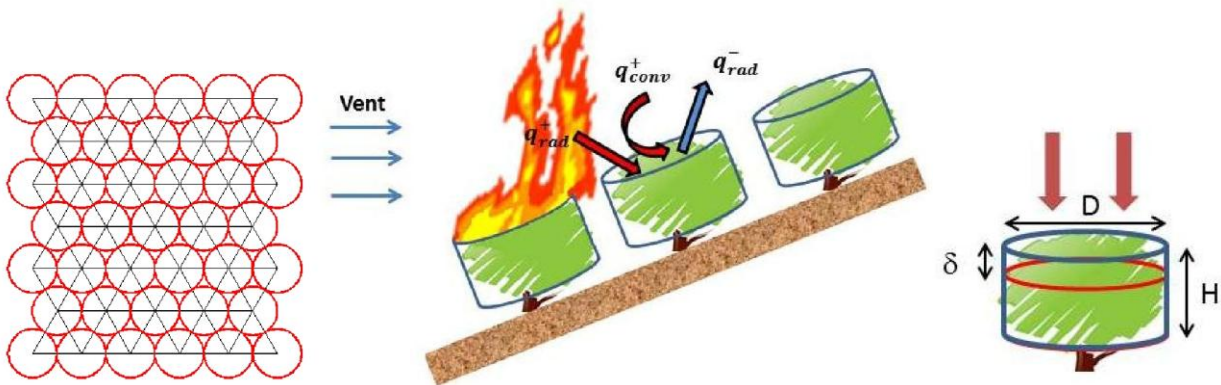


FIG. 1 – De gauche à droite: le réseau triangulaire, les transferts thermiques impliqués dans la propagation du feu et le volume de contrôle d'un site exposé au feu.

### 2.2 Le modèle macroscopique de combustion

Il est un fait établi que la propagation du feu n'implique que les éléments végétaux les plus fins, typiquement de taille inférieure à 6mm de diamètre [9], les éléments plus épais brûlant plus lentement en arrière du front de flammes. Le problème physique est illustré sur la figure 1. On suppose que le volume de contrôle impliqué dans le processus de dégradation thermique et de combustion est un cylindre de volume  $V = \pi D^2 \delta$ , où  $D$  est le diamètre du site et  $\delta$  ( $\delta \leq H$ ) le libre parcours moyen du rayonnement à travers le milieu végétal. Au-delà de  $\delta$ , on suppose que le milieu n'interagit plus avec le rayonnement. On rappelle que  $\delta$  peut être relié au rapport surface/volume des éléments fins de végétation,  $\sigma_k$ , et à la fraction volumique de la phase solide,  $\alpha_k$ , par [10] :  $\delta = 4/\alpha_k \sigma_k$ .

Le modèle de combustion suppose que la dégradation se fait en trois étapes successives [11] au cours

desquelles les éléments fins humides (WFF) sont chauffés jusqu'à la température d'ébullition de l'eau, 373K, l'eau s'évapore, et les éléments fins secs (DFF) sont chauffés jusqu'à la température d'inflammation,  $T_{ign}$ . La conservation de l'énergie d'un site récepteur  $j$  exposé à  $N_{bc}$  sites en feu peut s'écrire alors :

$$\sum_{i=1}^{N_{bc}} [q_{rad}^+(i) + q_{conv}^+(i)] = q_{rad}^-(j) + \begin{cases} \rho_{WFF} c_{pWFF} \alpha_k \frac{dT(j)}{dt} & \text{for } T(j) < 373K \\ -\rho_{DFF} L_{vap} \alpha_k \frac{dFMC(j)}{dt} & \text{for } T(j) = 373K \\ \rho_{DFF} c_{pDFF} \alpha_k \frac{dT(j)}{dt} & \text{for } 373 K < T(j) < T_{ign} \end{cases}$$

où  $q_{rad}^+(i)$  et  $q_{conv}^+(i)$  correspondent aux transferts d'énergie liés au rayonnement des flammes et à la convection des gaz chauds provenant des sites en feu. Le terme  $q_{rad}^-(j)$  représente les pertes radiatives du site  $j$  vers l'environnement.  $L_{vap}$  est la chaleur latente de vaporisation de l'eau,  $FMC(j)$  la teneur en eau du site  $j$ , définie comme le rapport de la masse d'eau sur la masse des éléments fins secs,  $T(j)$  est la température du site  $j$ ,  $\rho$  et  $c_p$  sont la masse volumique et la chaleur spécifique de la phase solide. On suppose en outre que le volume des éléments fins reste constant durant tout le processus de dégradation. Chacun des termes de l'équation de l'énergie est explicité ci-dessous.

Le rayonnement reçu par le site  $j$  s'exprime de la façon suivante:  $q_{rad}^+(i) = a_{fm} p_i N_{ij} / V_j$  où  $V_j$  est le volume de contrôle du site  $j$  et  $a_{fm}$  l'absorptivité du milieu végétal.

Le modèle de rayonnement couple la méthode de Monte Carlo et le modèle de flamme solide où la flamme est représentée par un cylindre dont seule la surface émet. La méthode de Monte Carlo permet de déterminer le nombre de quanta d'énergie lancés depuis le site en feu  $i$  et qui atteint le site  $j$ . Chaque quantum transporte une puissance élémentaire  $p_i = P_i'' / n''$  (en W) où  $n''$  est le nombre de quanta émis par chaque mètre carré de flamme et  $P_i''$  le pouvoir émissif de la flamme attachée au site en feu  $i$ . La méthode est détaillée dans [12]. Le modèle de rayonnement est relativement simple mais requiert la connaissance des propriétés de flammes et leur pouvoir émissif. Il tient compte également de l'effet d'écran qui peut se manifester lorsqu'un autre site en feu se trouve placé entre les sites  $i$  et  $j$ , mais aussi de l'atténuation du rayonnement par la couche d'air atmosphérique entre ces sites. La transmittance de la couche d'air en fonction de son épaisseur et de son humidité relative est déterminée par le modèle SNB de Malkmus [13].

#### Pertes radiatives

Elles s'expriment en fonction de l'émissivité du milieu végétal  $\varepsilon_{fm}$ , de la constante de Stefan-Boltzmann ( $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 / \text{K}^4$ ) et de la température ambiante,  $T_\infty$ , de la façon suivante :  $q_{rad}^-(j) = \varepsilon_{fm} \sigma (T_j^4 - T_\infty^4) / \delta$ .

#### Convection des gaz chauds

La flamme n'est pas une barrière infranchissable et le vent, grâce à des effets tridimensionnels, peut la traverser. Ainsi, un site intact  $j$  situé dans le sillage d'un site en feu  $i$  peut être chauffé par convection en fonction de la distance entre ces deux sites,  $d_{ij}$ , en obéissant à une loi exponentiellement décroissante dont la longueur caractéristique est égale à environ trois fois la longueur de flamme [14] :  $q_{conv}^+(i) = \frac{h}{\delta} (T_f - T_j) e^{-0.3 d_{ij}/L_f}$ , où  $L_f$  et  $T_f$  sont les longueurs et température de flamme, un coefficient convectif moyen évalué empiriquement pour un écoulement turbulent sur plaque plane [15] :  $h = 0.037 k Re^{0.8} Pr^{1/3} / d_{ij}$ . Le nombre de Reynolds, défini par  $Re = U d_{ij} / \nu$ , est basé sur la composante tangentielle du vent local,  $U = |\vec{n} \wedge (\vec{U} \wedge \vec{n})|$ , où  $\vec{n}$  est la normale au terrain. Les termes  $Pr$ ,  $\nu$  et  $k$  sont respectivement le nombre de Prandtl, la viscosité cinématique et la conductivité thermique de l'air évalués à la température moyenne  $0.5 (T_f + T_\infty)$ .

## 2.3 Données d'entrée du modèle de propagation

Les données d'entrée du modèle ainsi que les corrélations sont détaillées dans la référence [12]. Nous les rappelons brièvement ci-dessous.

La hauteur de flamme visible en présence de vent est tout d'abord évaluée par la corrélation:  $H_f = H_{f0}(1 + 4 \frac{U^2}{gH_{f0}})^{-0.5}$  où  $H_{f0}$  est la hauteur de flamme sans vent, déduite de la puissance libérée par la combustion  $\dot{Q}$ , et du diamètre de la source,  $D$ , comme:  $H_{f0} = 0.0148 \dot{Q}^{2/5} - 1.02 D$ .

La puissance libérée correspond à la combustion avec flamme des gaz volatils, de sorte que:  $\dot{Q} = (1 - \alpha_{char}) \frac{m''_{DFF}}{t_c} \Delta h_c S_b$  avec  $S_b = \pi D^2/4$ . Les termes  $\alpha_{char}$ ,  $m''_{DFF}$ ,  $\Delta h_c$  et  $t_c$  représentent respectivement le contenu en résidu carbonneux des éléments fins secs, la charge de ces éléments, la chaleur de combustion des composés volatils et le temps de résidence de flamme.

En présence de vent, l'angle de flamme avec la verticale est déduit de la relation d'Albini:  $\tan \alpha = 1.22 U / \sqrt{gH_f}$ . En revanche, en raison de la faible influence du vent sur la longueur de flamme, cette dernière est prise égale à la hauteur de flamme sans vent.

Le pouvoir émissif par unité d'aire de flamme s'exprime en termes de surface de flamme,  $S_f = \pi D L_f$  et de la fraction de la puissance perdue par rayonnement,  $\chi_R$ , de la façon suivante:  $P_f'' = \chi_R \dot{Q} / S_f$ . On peut alors en déduire la température de flamme en supposant que la flamme est un corps gris d'émissivité  $\varepsilon_f$ :  $T_f = (P_f'' / \varepsilon_f \sigma)^{1/4}$  avec  $\varepsilon_f = 1 - e^{-0.6 L_f}$ .

### 3. Validation du modèle

Pour la validation du modèle, nous nous sommes intéressés aux brûlages dirigés australiens de Cheney et al. [15,16]. La végétation, homogène et continue, est constituée essentiellement d'herbacées (*Themeda Australis*) et couvre l'intégralité d'une parcelle de 200m×200m. Le vent est perpendiculaire au bord droit le long duquel un allumage en ligne de 175m a été réalisé. Les données sont les suivantes:  $U = 4.6\text{m/s}$ ,  $T_\infty = 303\text{K}$ ,  $RH = 42\%$ ,  $D = 3\text{m}$ ,  $H = 0.51\text{m}$ ,  $\text{FMC}_0 = 0.058$ ,  $\chi_R = 0.3$ ,  $t_c = 6\text{s}$ ,  $\sigma_k = 12240\text{m}^{-1}$ ,  $m''_{DFF} = 0.391\text{kg/m}^2$ ,  $\alpha_{char} = 0.2$ ,  $c_{pDFF} = 1480\text{J/kg/K}$ ,  $\rho_{DFF} = 720\text{kg/m}^3$ ,  $a_{fm} = 0.9$ ,  $\varepsilon_{fm} = 0.9$ . Sur la figure 2, nous avons comparé les contours de feu prédits et mesurés, 56s et 86s après le début de l'allumage. La comparaison est excellente. Après 86s, comme cela a été observé par les auteurs, la direction du vent a changé, ce qui rend la comparaison impossible. Nous avons également constaté un très bon accord de la largeur de la zone de combustion puisque le modèle prédit 11m alors que la largeur mesurée était de 10m. Le choix de la dimension des sites (strates) est conditionné par la hauteur de flamme observée expérimentalement ce qui peut être considéré comme un moyen de calibration du modèle.

Notons que le modèle purement radiatif [12] est insuffisant et ne peut pas prédire correctement la propagation du feu au moins dans ce cas de brûlage dirigé. Il a fallu introduire la contribution convective et les pertes radiatives, non négligeables à l'échelle macroscopique du front de flamme [11].

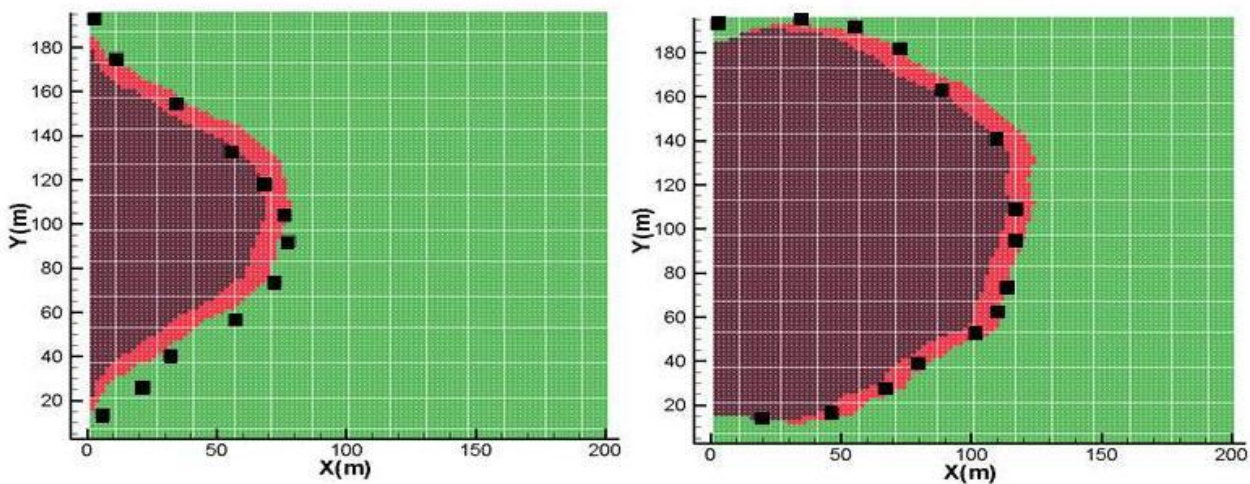


FIG. 2 – Contours de feu calculés et mesurés (■) après 56s et 86s de propagation.

#### 4. Analyse de sensibilité

Le but de cette analyse de sensibilité est d'étudier l'effet des variations de quelques facteurs d'entrée supposés *a priori* influents sur la vitesse de propagation. La végétation est représentée par un réseau triangulaire de sites de 2m de diamètre et de 2,5m de haut, répartis sur un terrain plat de 100 m×100 m. On utilise alors comme paramètres d'entrée du modèle les propriétés géométriques et thermo-physiques du chêne kermès [17].

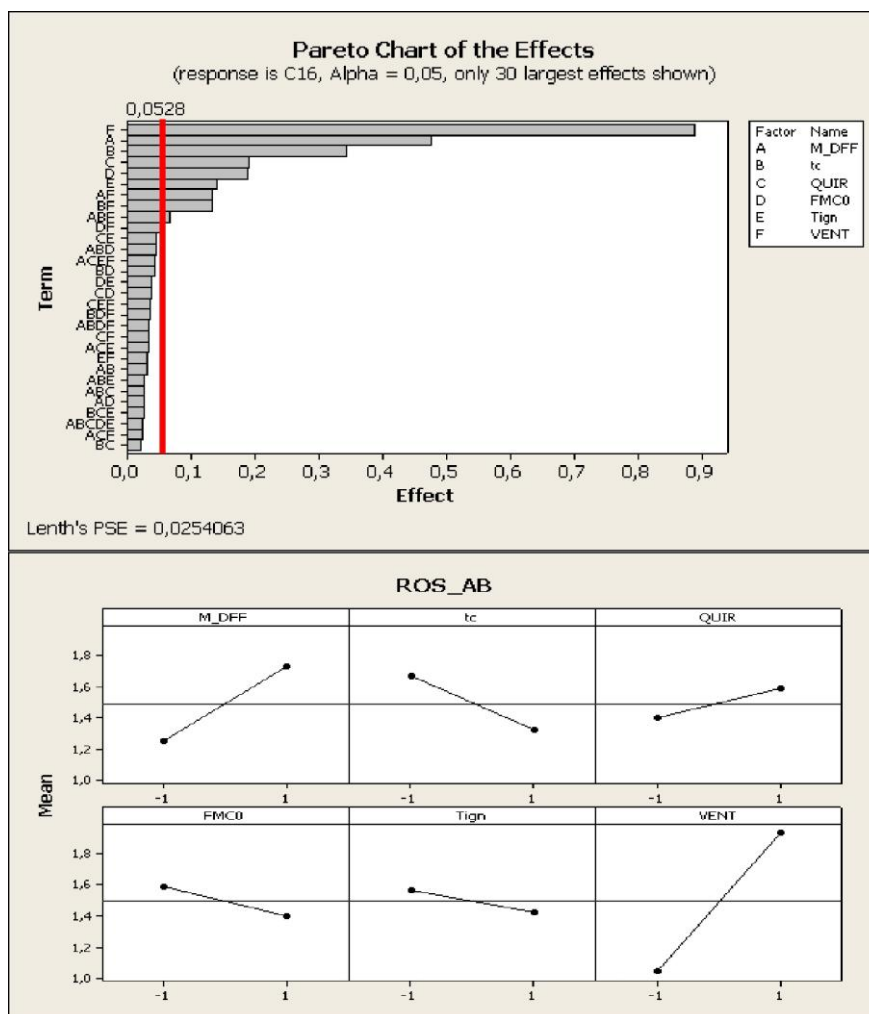


FIG. 3 – Diagrammes de Pareto et des effets principaux sur la vitesse de propagation.

Nous avons retenu six paramètres qui présentent une grande variabilité dans la littérature ou des incertitudes quant à leur détermination expérimentale: la charge en éléments fins secs, le temps de résidence de flamme, la teneur en eau initiale du végétal, la température d'inflammation, la fraction rayonnée et la vitesse du vent.

La réponse est la vitesse de propagation du feu entre les points A et B du domaine situés respectivement sur les lignes situées à  $Y=20\text{m}$  et  $Y=80\text{m}$ . Notons que l'allumage est ponctuel en  $(X=49\text{m}, Y=0\text{m})$ . L'analyse de sensibilité repose sur un plan factoriel complet qui consiste à introduire, pour chacun des six facteurs, un niveau bas et un niveau haut par rapport à un niveau de référence, ce qui revient à effectuer  $2^6=64$  simulations. Les résultats de l'analyse sont présentés sous la forme d'un diagramme de Pareto qui montre combien les facteurs et leurs interactions peuvent influencer sur la vitesse de propagation. L'impact, négatif ou positif, des facteurs principaux sur la vitesse de propagation peut être évalué à partir du diagramme des effets principaux (Figure 3). On remarque que lorsque l'on augmente le temps de résidence de flamme, la vitesse de propagation diminue. Cela résulte, toutes choses égales par ailleurs, d'une diminution de la puissance libérée par la combustion ( $\dot{Q}$ ) qui est inversement proportionnelle au temps de résidence.

## 5. Conclusion

Le modèle hybride de propagation qui combine l'approche stochastique de petit monde et l'approche semi-physique basée sur l'équation instationnaire de l'énergie incluant l'ensemble des processus thermiques a été validé sur un feu expérimental australien. L'accord est excellent en termes de vitesse de propagation, de contours de feu et de surface brûlée. Un plan factoriel complet à deux niveaux portant sur quelques paramètres influents du modèle a permis de hiérarchiser ces paramètres et de montrer la sensibilité de la solution à leur variation. A court terme, nous envisageons de poursuivre la phase de validation du modèle pour des conditions de feu très contrastées, du feu thaïlandais au feu méditerranéen, pour lesquels nous disposons déjà de données de terrain.

## Remerciements

Ce travail a été réalisé avec le soutien financier d'organismes thaïlandais (Ministry of Education/Thailand Research Fund / National Science and Technology Development Agency) et français (MAEE/MESR) dans le cadre du projet PHC SIAM 2012-2013 n° 27571PF.

## Références

- [1] Grishin A.M., Mathematical modeling of forest fires and new methods of fighting them, Pub. House Tomsk State University, Tomsk, Russia, 1997.
- [2] Porterie B. et al., Firespread through fuel beds: modeling of wind-aided fires and induced hydrodynamics, *Phys. Fluids*, 12(7), 1762-1782, 2000.
- [3] Porterie B. et al., Dynamics of wildland fires and their impact on structures, *Combust. Flame*, 149, 314-328, 2007.
- [4] Mell W. et al., A physics-based approach to modeling grassland fires. *Int. J. Wildland Fire*, 16, 1-22, 2007.
- [5] Balbi J-H. et al., A physical model for wildland fires, *Combust. Flame*, 156, 2217-2230, 2009.
- [6] Hargrove, W.W. et al., Simulating fire patterns in heterogeneous landscapes, *Ecol. Model.*, 135, 243-263, 2000.
- [7] De Gennes P-G., La percolation: un concept unificateur, *La Recherche*, 919-927, 1976.
- [8] Watts D. J. et Strogatz S. H., Collective dynamics of small-world networks, *Nature*, 393, 409-410, 1998.
- [9] Luke R.H., McArthur A.G., *Bushfires in Australia*, Australian Government Publishing Service, Canberra, 1977.
- [10] De Mestre N.J. et al., Uniform propagation of a planar fire front without wind, *Combust. Sci. Technol.*, 65, 231-244, 1989.
- [11] Koo E. et al., *Proc. IAFSS 8*, 851-862, 2005.
- [12] Adou J.K. et al., Simulating wildfire patterns using a small-world network model, *Ecol. Model.*, 221, 1463-71, 2010.
- [13] Collin A., Thèse de Doctorat de l'Université de Lorraine – Nancy 1, 2006.
- [14] Pagni P.J. et Peterson T.P., Flame spread through porous fuels, *Proc. Symp. Combust.*, 14, 1099-1107, 1973.
- [15] Cheney N.P. et al., The influence of fuel, weather and fire shape variables on fire spread in grasslands, *Int. J. Wildland Fire*, 3(1), 31-44, 1993.
- [16] Cheney N.P. et al., Prediction of fire spread in grasslands, *Int. J. Wildland Fire*, 9(1), 1-13, 1998.
- [17] Drissi M., Thèse de Doctorat de l'Université d'Aix-Marseille, 2012.