

Développement et validation d'un nouveau modèle de propagation de feux de végétation par réseaux de « petits mondes »

Alexis MARCHAND, Nicolas TREVISAN, Anthony COLLIN et Pascal BOULET

LEMTA – Université de Lorraine – CNRS

2 Avenue de la forêt de Haye – TSA 60604 – 54518 – Vandœuvre-lès-Nancy Cedex

Auteur correspondant : alexis.marchand@univ-lorraine.fr

Résumé – Chaque année des millions d'hectares de végétation sont détruits par les feux dits « naturels ». Ces incendies ont un impact environnemental, économique et humain important qui nécessite de prévoir leur comportement dans le temps et dans l'espace *via* un propagateur de feux.

De nombreux modèles ont été établis depuis les années 1940 pour tenter de reproduire la dynamique réelle de la propagation d'un feu de végétation. Différentes familles de modèles coexistent :

- les modèles physiques sont basés sur des équations bilans. Ils ne permettent pas actuellement une utilisation directe lors d'un sinistre à cause du temps de calcul trop important ;
- les modèles empiriques utilisent des données expérimentales de feux de végétation connus pour prédire la dynamique d'un incendie réel ;
- les semi-physiques associent à la fois des données expérimentales et des modèles issus de la physique. Cependant, ces modèles sont incapables de reproduire le comportement de certains phénomènes d'incendie comme le processus de digitation par exemple ;
- les modèles stochastiques basés sur le développement d'automates cellulaires ou de réseaux de petits mondes tentent de définir des lois de probabilité de transition d'un site (une parcelle) en feu à un autre.

L'objet de nos travaux est de proposer un nouveau modèle de propagation des feux dits « naturels » basé sur un réseau de petits mondes. L'originalité de ces travaux réside dans l'association d'un modèle stochastique simple et d'un modèle de rayonnement quasi-analytique, ce qui permet de réduire considérablement le temps de simulation. Les résultats produits par ce nouveau modèle, comparés à ceux de feux réels, présentent de très bons accords.

La contribution finale présentera le nouveau modèle de propagation mis en place. La communication détaillera ensuite la partie associée à la calibration et à la validation du propagateur à partir d'expériences de feux de végétation réalisées à l'échelle du laboratoire au sein de la plateforme PROMETHEI du LEMTA. Enfin, en guise d'applications, ce papier étudiera l'influence de la largeur du lit de combustible sur la dynamique de la propagation d'un incendie ce qui justifiera le rôle important du phénomène de digitation sur des feux réels.

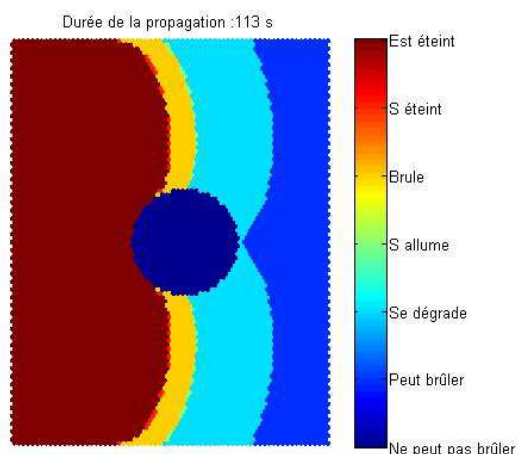


Figure 1 : Exemple de simulation de propagation d'un feu autour d'un obstacle cylindrique

Nomenclature

κ	Coefficient d'absorption [m^{-1}]	l	Épaisseur du front [m]
Φ	Flux radiatif [W]	$L_{coupure}$	Distance de coupure [m]
$\Phi_{x \rightarrow y}$	Puissance rayonnée entre x et y [W]	L_c	Distance caractéristique [m]
σ	Constante de Stefan-Boltzmann [$W.m^{-2}.K^{-4}$]	$N_{fCellules}$	Nombre de cellules en flamme [$-$]
τ_c	Énergie de combustion [J]	R_f	Rayon de flamme [m]
τ_d	Énergie de dégradation [J]	ROS	Vitesse de propagation [$m.s^{-1}$]
a	Côté d'un hexagone [m]	t	Temps [s]
F	Facteur de forme [m^{-2}]	T_f	Température de flamme [K]
H_f	Hauteur de flamme [m]	V_f	Volume des flammes [m^3]
		z	Coordonnées selon la verticale [m]

1. Introduction

Depuis plusieurs décennies de nombreux modèles physiques de propagation de feux dits "naturels" ont vu le jour. Leurs objectifs sont de comprendre et prédire la dynamique de ces incendies afin d'assister les sapeurs pompiers en intervention ou pour aider à l'aménagement des zones géographiques à risques. Parmi ces modèles, on retrouve la catégorie des automates cellulaires introduits par Ulam et Von Neumann dans les années 40. Le premier modèle de propagation basé sur cette théorie a été développé par Albinet *et al.* [1] en 1986. Depuis, de nombreux modèles ont vu le jour, Sullivan *et al.* [2] donne une synthèse de l'ensemble de ces modèles.

L'objectif de ces modèles est de décrire la propagation du feu de manière mathématique en divisant le domaine d'étude en cellules élémentaires où chacune est décrite par un état physique discret (en feu ou non, ...) à un temps donné. Le changement d'état d'une cellule est défini par des lois de transitions qui dépendent des modèles. L'avantage majeur de ces modèles est de pouvoir simuler et prédire l'avancée du feu plus rapidement que le temps réel. Cependant, de manière générale, ces lois de transitions manquent de modélisation physique et ne permettent pas leur utilisation dans des conditions réelles (végétation hétérogène par exemple).

Plus récemment, des études se sont intéressées à des approches plus physiques pour décrire ces lois de transitions. Par exemple X. Li et W. Magill [3] en 2001 ont repris l'approche du modèle de Rothermel [4] pour élaborer des lois de transitions basées sur les conditions environnementales (charge, vent, inflammabilité du combustible ...). Sullivan et Knight [5] en 2004 ont utilisé un modèle de convection pour étudier son influence sur la propagation. Porterie [6] en 2007 et Billaud [7] en 2012 ont développé un modèle de propagation de type "petit monde" basé sur des bilans thermiques. Conçue par Watts et Strogatz [8], la théorie des "petits mondes" est une classe particulière des automates cellulaires. Initialement, ces modèles se sont intéressés à l'étude de la propagation d'épidémies ou de phénomènes sociologiques (rumeurs par exemple). La différence entre les automates cellulaires et le réseau de "petit monde" réside dans la définition du voisinage d'une cellule. Pour les automates cellulaires le voisinage est défini par les cellules qui sont toutes proches (4 cellules pour un voisinage de Moore et 8 pour celui défini par Von Neumann) alors que pour le réseau de "petit monde" la notion de voisinage est étendue par des interactions à longues distances entre les cellules. Dans la propagation du feu, le rayonnement ou l'émission de brandons

sont bien des processus physiques à longue distance [6].

Notre travail s'insère dans ces efforts de modélisation, en développant un nouveau modèle de propagation de feux de type "petit monde" basé sur un réseau de cellules hexagonales. Les lois de transition dépendent d'un modèle de bilan de chaleur sur les cellules en considérant que le transfert radiatif est prépondérant. Cette hypothèse est utilisée dans le modèle d'Albini [9] dans le cas d'une propagation avec une pente et un vent faible. On suppose pour le moment que la propagation du feu s'effectue sans pente ni vent dans un milieu homogène. Des expériences à l'échelle du laboratoire ont été effectuées pour calibrer les paramètres inconnus du modèle.

2. Modèle

2.1. Définition des états

Le domaine d'étude est divisé en cellules hexagonales de côté a . Cette approche évite les biais rencontrés dans les réseaux de quadrilatères réguliers. Une cellule à un instant t est décrite par un état. On définit 5 états principaux :

- | | |
|---|------------------------|
| (0) Ne peut pas brûler | (3) Combustible en feu |
| (1) Combustible non dégradé | (4) Combustible brûlé |
| (2) Combustible en train de se dégrader | |

Il existe 2 autres états intermédiaires (s'allume et s'éteint) qui ne sont utilisés que pour faciliter la modélisation numérique. Chaque cellule passe progressivement par les différents états.

2.2. Lois de transitions

Les lois de transitions sont caractérisées par deux grandeurs caractéristiques : τ_d et τ_c . τ_d correspond à l'énergie nécessaire pour qu'une cellule chauffe et s'enflamme. τ_c est l'énergie qu'il faut pour dégrader l'ensemble du combustible solide présent dans une cellule j .

L'état d'une cellule j est déterminé par la quantité d'énergie emmagasinée τ_j^t à un instant t . À chaque pas de temps Δt , une cellule j reçoit une certaine quantité d'énergie $\Delta\tau_j^t$. Cette quantité dépend du nombre de cellules en feu dans son voisinage $N_{fCellule j}$. Ce voisinage est déterminé à partir du modèle radiatif et d'une longueur de coupure qui limite ce voisinage à une certaine distance notée L_c . Au pas de temps suivant, l'énergie de la cellule est donc :

$$\tau_j^{t+\Delta t} = \tau_j^t + \Delta\tau_j^t \quad (1)$$

On distingue alors deux cas :

- Une cellule qui ne brûle pas reçoit de l'énergie des cellules voisines en feu :

$$\Delta\tau_j^t = \Delta t \sum_{k=1}^{N_{fCellule j}} \Phi_{Flamme_k-Cellule j} \quad (2)$$

- Une cellule qui brûle reçoit de l'énergie des cellules voisines en feu et de la flamme à laquelle elle offre un support : c'est ce que l'on nomme ici l'autoflux :

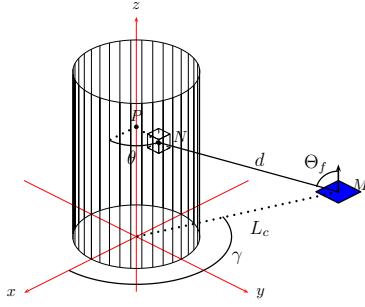


Figure 1 : Volume de flamme équivalent d'une cellule

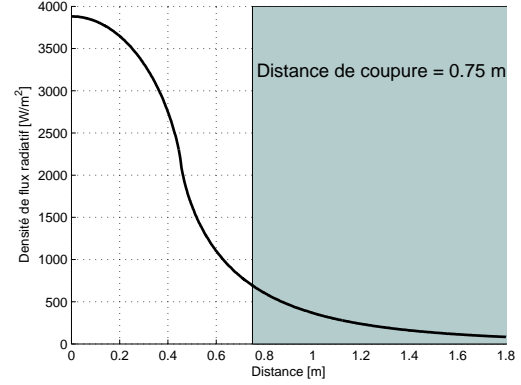


Figure 2 : Densité de flux émise depuis un cylindre en fonction de la distance

$$\Delta\tau_j^t = \Delta t \left(\Phi_{Flamme_j-Cellule_j} + \sum_{k=1}^{N_f \text{ Cellule}_j} \Phi_{Flamme_k-Cellule_j} \right) \quad (3)$$

À partir des expressions (1), (2) et (3) on peut définir des lois de transitions qui permettent aux cellules de passer d'un état à un autre. On distingue alors quatre lois principales :

- Combustible intact : $\tau_j = 0$
- Combustible chauffé : $0 < \tau_j < \tau_d$
- Combustible en train de se dégrader : $\tau_d < \tau_j < \tau_d + \tau_c$
- Combustible consommé : $\tau_c + \tau_d < \tau_j$

Les transitions entre les différents états dépendent des flux émis par les différentes cellules en feu.

2.3. Modèle radiatif

Pour déterminer les flux $\Phi_{Flamme_k-Cellule_j}$ et $\Phi_{Flamme_j-Cellule_j}$, un modèle radiatif a été développé. La flamme d'une cellule en feu est modélisée par un cylindre équivalent (figure 1) à une température de flamme T_f , une hauteur H_f , un volume V_f et un coefficient d'absorption κ . On considère que la flamme est un milieu optiquement mince puisque $2R_f\kappa \ll 3$ [10]. Par conséquent, il n'est donc pas utile de gérer les phénomènes d'écrantage que l'on observe pour des feux de plus grand ampleur. On définit alors la puissance dégagée par la flamme :

$$\Phi_{flamme_k} = 4\kappa\sigma T_f^4 V_{fk} \quad (4)$$

La part de flux émis par une flamme k et reçue par une cellule j est estimée à partir du calcul d'un facteur de forme, noté F_{kj} :

$$\Phi_{flamme_k \rightarrow cellule_j} = 4F_{kj}\kappa\sigma T_f^4 V_{fk} S_{cellule_j} \quad (5)$$

Avec comme définition du facteur de forme :

$$F_{kj} = \frac{1}{V_f} \int_{V_f} \frac{\cos\Theta_f}{4\pi d^2} dV_f \quad (6)$$

Après deux intégrations selon la verticale z et le rayon r pour le volume V_f du cylindre on se retrouve avec une expression qu'il n'est plus possible d'intégrer analytiquement selon θ . On calcule alors la troisième intégrale à l'aide d'une intégration numérique. Le résultat est une relation semi-analytique traduite par :

$$F = \frac{1}{4\pi V_f} \sum_i^{N_\theta} (g(L_c, R_f, H_f, \theta_i) - g(L_c, R_f, 0, \theta_i) - g(L_c, 0, H_f, \theta_i) + g(L_c, 0, 0, \theta_i)) \Delta\theta \quad (7)$$

θ_i est compris entre 0 et 2π , et discrétisé en N_θ valeurs (avec $N_\theta = 19$). La fonction $g(l, r, z, \theta)$ est définie par :

$$g(l, r, z, \theta) = \sqrt{l^2 - 2rl \cos \theta + r^2 + z^2} + l \cos \theta \ln(r - l \cos \theta + \sqrt{l^2 - 2rl \cos \theta + r^2 + z^2}) \quad (8)$$

Un exemple de densité de flux en fonction de la distance est donné par la figure 2. La densité de flux est calculée à partir des données suivantes : $R_f = 0,0227 m$, $T_f = 1400 K$, $H_f = 0,33 m$ et $\kappa = 0,1 m^{-1}$. Les données de T_f et κ_f sont extraites de Boulet *et al.* [11]. Pour notre modèle seuls τ_d et τ_c sont, pour l'heure, inconnus. Afin de réduire les temps de calcul lors des simulations, on utilise une distance de coupure L_c à partir de laquelle on néglige la densité de flux reçu. Elle est fixée à la valeur de $0,75 m$ ici (comme illustré sur la figure 2). Le pas du réseau est imposé à $0,025 m$. Ces deux derniers paramètres pourront faire l'objet d'une analyse de sensibilité ultérieurement.

3. Résultats expérimentaux

3.1. Méthodologie

Depuis 2012, le laboratoire LEMTA est équipé d'une plateforme expérimentale nommée PROMETHEI. Des expériences de propagation de feux à l'échelle du laboratoire sont effectuées sur des tables à combustion de $3 m$ par $4 m$. Le combustible utilisé est de la frisure de bois avec une charge de $0,5 kg.m^{-2}$. Deux caméras visibles filment la propagation du feu en fonction du temps. Un algorithme de traitement d'images basé sur une segmentation par la méthode Otsu [12] permet d'obtenir les fronts arrière et avant du feu. Ensuite une méthode DLT (Direct Linear Transformation) [13] est utilisée pour transposer les points détectés du plan image (en pixel) vers le plan réel (en mètres). Il est alors possible de reconstruire le front de flammes à divers instants t . Après reconstitution du front de flammes, on évalue la vitesse de propagation ROS (rate of spread) et l'épaisseur moyenne du front l .

3.2. Résultats

36 expériences pour des largeurs de lit comprises entre $0,25 m$ et $3,5 m$ et une longueur de lit $2 m$ ont été effectuées (9 largeurs différentes et la série d'expériences est répétée 4 fois). Les résultats sont représentés sur les figures 3 et 4. On constate une dépendance de la vitesse de propagation et de l'épaisseur du front de flammes avec la largeur du lit. La vitesse de propagation est mesurée entre $0,007 m.s^{-1}$ et $0,01 m.s^{-1}$ pour une largeur de $0,25 m$ et augmente entre $0,013 m.s^{-1}$ et $0,017 m.s^{-1}$ pour une largeur de $3,5 m$. On observe une variation d'environ 50 % pour la vitesse de propagation et de 20 % pour l'épaisseur du front avec la largeur. De plus, on remarque qu'il existe des seuils au

delà desquels l'effet de la largeur du lit de combustible n'est plus sensible, ici estimée à environ 2 m. Ce comportement affecte donc la propagation du front de flammes à petite échelle. L'écart moyen par rapport à la moyenne sur le ROS est évaluée à 9% et à 18% pour l'épaisseur moyenne. L'origine de la dispersion des différents points expérimentaux peut être due à plusieurs facteurs : la température ambiante, l'humidité ambiante ou du combustible ...

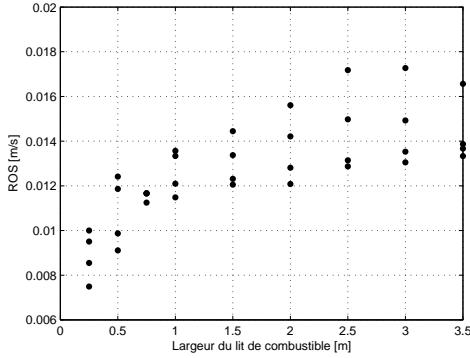


Figure 3 : Vitesse de propagation (ROS) en fonction de la largeur du lit

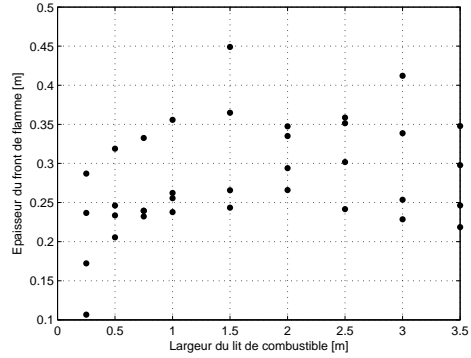


Figure 4 : Epaisseur du front en fonction de la largeur du lit

4. Identification des paramètres

4.1. Algorithme d'optimisation

Les lois de transitions de notre modèle sont caractérisées par τ_d et τ_c , paramètres qui ne sont pas connus. Il faut donc les identifier pour calibrer le modèle "petit monde" développé dans ce travail. Pour ce faire nous avons utilisé un algorithme d'optimisation PSO (Particle Swarm Optimization) [14] en utilisant les 36 expériences effectuées précédemment ($N_{\text{expériences}} = 36$). Ce genre d'algorithme d'optimisation nécessite de définir une fonction coût à minimiser afin de trouver le meilleur couple de paramètres. Cette fonction est construite de façon à prendre en compte les valeurs de la vitesse de propagation et de l'épaisseur du front de flammes.

$$F_{\text{cout}} = \sum_{i=1}^{N_{\text{expériences}}} \left(\left| \frac{ROS_{\text{num}}^i - ROS_{\text{exp}}^i}{\max(ROS_{\text{exp}})} \right| + \left| \frac{l_{\text{num}}^i - l_{\text{exp}}^i}{\max(l_{\text{exp}})} \right| \right) \quad (9)$$

L'optimisation a été effectuée avec un nombre de particules égal à 40 et pour 150 itérations. Les espaces de recherches sont compris entre 20 J et 400 J pour τ_d et τ_c . Les valeurs des différents paramètres sont : $a = 0,025 \text{ m}$, $T_f = 1400 \text{ K}$, $\kappa = 0,1 \text{ m}^{-1}$ et $H_f = 0,33 \text{ m}$. Les vitesses de propagation numériques et expérimentales sont calculées lorsque la propagation est stationnaire.

4.2. Résultat de l'optimisation

L'algorithme d'optimisation a été répété 3 fois. On vérifie que pour les 3 optimisations les coefficients calculés convergent vers les mêmes valeurs (cf. figure 5) avec le même résultat pour la fonction coût (cf. figure 6). Les valeurs des paramètres trouvés sont $\tau_d = 67,47 \text{ J}$ et $\tau_c = 206,3 \text{ J}$. La fonction coût est évaluée à $F_{\text{cout}} \simeq 9,5$.

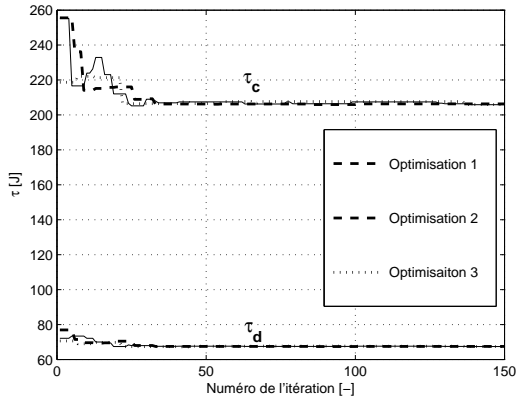


Figure 5 : Valeurs des paramètres pour 3 optimisations

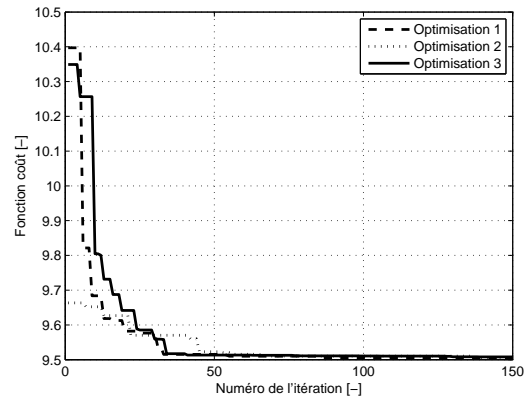


Figure 6 : Fonction coût pour 3 optimisations

En utilisant les valeurs des paramètres τ_d et τ_c trouvés, on simule différentes propagations de feux pour différentes largeurs de lit de combustible. Les résultats sont comparés avec les résultats expérimentaux (cf. figure 7 et 8). On remarque que le modèle est capable de reproduire le comportement du feu vis à vis de la largeur tenant compte de l'effet de "seuil" constaté expérimentalement.

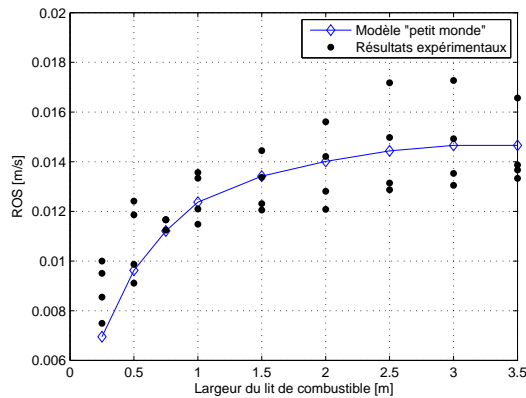


Figure 7 : Résultat de l'optimisation pour la vitesse de propagation

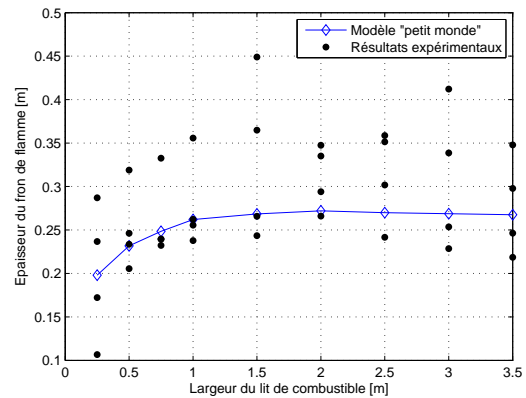


Figure 8 : Résultat de l'optimisation pour l'épaisseur du front

5. Conclusion

Un modèle "petit monde" à réseau de cellules hexagonales pour la propagation de feux à l'échelle du laboratoire a été élaboré. L'évaluation de l'état des cellules est déterminée par des lois de transitions qui dépendent de l'énergie reçue par les cellules voisines en feu. Cette énergie provient du rayonnement émis par des flammes d'un cylindre équivalent (volume à une température de flammes T_f , un volume V_f , une hauteur H_f et un coefficient d'absorption κ). Deux paramètres caractérisent les lois de transitions : une énergie de dégradation τ_d et une énergie de combustion τ_c . Ces paramètres n'étant pas connus, 36 expériences de propagation de feux pour des largeurs

de lit de combustible comprises entre 0,25 m et 3,5 m ont été réalisées au sein de la plateforme PROMETHEI du laboratoire LEMTA. La vitesse de propagation (ROS) et l'épaisseur du front de flammes ont été mesurées. Elles montrent une influence de la largeur du lit de combustible sur la propagation du feu avec la présence de distances critiques au delà desquelles l'effet de la largeur du lit de combustible n'est plus observé. Les résultats de ces expériences couplés à un algorithme d'optimisation par essais particuliers ont permis de calibrer les paramètres τ_d et τ_c du modèle "petit monde". On constate que le modèle est capable de reproduire l'effet de la largeur de combustible sur la propagation du feu. Les futurs travaux s'intéresseront à modéliser la hauteur de flammes pour chaque cellule en feu et à étudier l'effet de la charge sur la dynamique de l'incendie.

Références

- [1] G. Albinet, G. Searby, and D. Stauffer. Fire propagation in a 2-d random medium. *Journal of Physics*, 47 :1–7, 1986.
- [2] A.L. Sullivan. Wildland surface fire spread modelling, 1990-2007. 3 : Simulation and mathematical analogue models. *International Journal of Wildland Fire*, 18 :387–403, 2009.
- [3] X. Li and W. Magill. Modelling fire spread under environmental influence using a cellular automaton approach. *Complexity International*, 8 :1–14, 2001.
- [4] R. C. Rothermel. A mathematical model for predicting fire spread in wildland fuels. 1972.
- [5] A.L. Sullivan and I.K. Knight. A hybrid cellular automata/semi-physical model of fire growth. 12 :64–73, 2004.
- [6] B. Porterie, N. Zekri, J-P. Clerc, and J-C. Loraud. Modeling forest fire spread and spotting process with small world networks. *Combustion and Flame*, 149 :63–78, 2007.
- [7] Y. Billaud, N. Zekri, A. Kaiss, M. Drissi, Y. Pizzo, Z. Acem, A. Collin, P-A. Santoni, F. Bosseur, P. Boulet, and B. Porterie. A hybrid small-world network/semi-physical model for predicting wildfire spread in heterogeneous landscapes. *Journal of Physics : Conference Series*, 395, 2012.
- [8] D.J. Watts and S.H. Strogatz. Collective dynamics of 'small-world' networks. *Nature*, 393 :440–442, 1998.
- [9] F. A. Albini. A model for fire spread in wildland fuels by radiation. *Combustion Science and Technology*, 42 :229–258, 1985.
- [10] A. Collin and P. Boulet. Evaluation of simple models of flame radiation in the frame of fire propagation. *Journal of Heat and Mass Transfer*, 59 :83–92, 2013.
- [11] P. Boulet, G. Parent, Z. Acem, A. Kaiss, Y. Billaud, B. Porterie, Y. Pizzo, and C. Picard. Experimental investigation of radiation emitted by optically thin to optically thick wildland flames. *Journal of Combustion*, (10.1155/2011/137437), 2011.
- [12] N. Otsu. A threshold selection method from gray-level histograms. *Systems, Man and Cybernetics, IEEE Transactions on*, 9 :62–66, 1979.
- [13] E. Pastor, A. Àgueda, J. Andrade-Cetto, M. Muñoz, Y. Pérez, and E. Planas. Computing the rate of spread of linear flame fronts by thermal image processing. *Fire Safety Journal*, 41 :569–579, 2006.
- [14] M. Clerc. *L'optimisation par essais particuliers*. Hermes Science Publications, 2005.