



Un Réseau de *Petit Monde local* à sites pondérés pour les feux de forêts

Bernard Porterie^{a,*}, Nouredine Zekri^{a,b}, Jean-Pierre Clerc^a, Jean-Claude Loraud^a

^a IUSTI/CNRS UMR 6595, École polytechnique universitaire de Marseille, technopôle de Château-Gombert, 5, rue Enrico-Fermi, 13453 Marseille cedex 13, France

^b USTO, département de physique, LEPM, BP 1505 El Mnaouer, Oran, Algérie

Reçu le 26 juillet 2004 ; accepté le 15 décembre 2004

Disponible sur Internet le 18 janvier 2005

Présenté par Pierre-Gilles de Gennes

Résumé

Un modèle à deux dimensions à sites pondérés basé sur le Réseau de Petit Monde est proposé pour étudier la propagation des feux en milieux homogènes et hétérogènes. Il combine les propriétés globales d'un réseau régulier et celles, locales, d'un Réseau de Petit Monde. Validé pour différentes conditions expérimentales de feu en milieu homogène, son application à des milieux hétérogènes illustre sa capacité à restituer des contours caractéristiques de situations de feu réelles et fait apparaître la proportion en sites actifs comme une bonne mesure de l'effet Petit Monde. **Pour citer cet article :** B. Porterie et al., C. R. Physique 6 (2005).

© 2004 Académie des sciences. Publié par Elsevier SAS. Tous droits réservés.

Abstract

A weighed local Small World Network for forest fires. A two-dimensional weighed-site model based on the Small World Network is proposed to study fire spread through homogeneous and heterogeneous media. It combines the regular network properties for the whole system with the local Small World properties. First validated with various fire conditions for homogeneous media, it is then applied to heterogeneous media to illustrate its ability to provide realistic fire patterns. It is found that the density of active sites is a good measure of the Small World effect. **To cite this article:** B. Porterie et al., C. R. Physique 6 (2005).

© 2004 Académie des sciences. Publié par Elsevier SAS. Tous droits réservés.

Mots-clés : Feux de forêts ; Réseau de Petit Monde ; Propagation des feux

Keywords: Forest fire; Small World Network; Fire spread

* Auteur correspondant.

Adresses e-mail : Bernard.Porterie@polytech.univ-mrs.fr (B. Porterie), Zekri@univ-usto.dz, zekri@polytech.univ-mrs.fr (N. Zekri).

Abridged English version

Fire spread has been modeled for a long time by using regular networks [2–7], as well as cellular automata [8–10] to include site weights. However, such networks did not account for long-range physical effects such as radiation or firebrand impacts. Long-range connections were recently modeled by a Small World Network (SWN) [11] for epidemic propagation while weights were included in such networks [16] to actually model airline connections.

A local Small World Network (*l*SWN) taking advantage of such properties is proposed to study fire spread through vegetation network. It uses a two-dimensional system where each node has both weights and a Small World effect limited to its influence zone. The influence zone is defined by one (in the symmetrical case) or two impact parameters either fixed (deterministic network) or randomly generated following a Poisson-like distribution (random network). Such parameters are determined from fire and fuel conditions. The system can then be viewed as a regular network for the whole system but with local Small World properties. Given a time step δt , two maximum weight levels n_{DT} and n_c can be associated to each node depending on thermal degradation ($t_{DT} = n_{DT} \times \delta t$) and combustion ($t_c = n_c \times \delta t$) characteristic times. After determining the rate of spread dependence on the impact parameters (Fig. 1), the *l*SWN is validated for homogeneous systems for different fire conditions: no-wind and no-slope fire (Fig. 2), upslope fire (Fig. 3), and wind-driven fires (Fig. 4). It is found that the present model satisfactorily reproduces the time evolution of fire perimeter and the nonlinear behavior of rate of spread as wind speed increases. Its application to heterogeneous systems shows the complex patterns formed for more realistic situations when the fire and fuel conditions vary in space. Furthermore, the density of active sites (combustible sites), seems to be a good measure of the Small World effect on the system as shown in Fig. 5. Since the computing time is one order of magnitude smaller than the physical one, the *l*SWN would be considered as an operational tool for fire fighting management.

1. Introduction

Les modèles de propagation des feux de forêt sont classiquement regroupés en modèles statistiques, empiriques, et physiques [1]. Jusqu'à présent, la modélisation statistique de la combustion en milieu hétérogène, en particulier celle des feux de végétation, utilisait des réseaux réguliers [2–7]. Les automates cellulaires ont été également utilisés sur ces réseaux pour inclure une pondération sur les sites [8–10]. Cependant, ces réseaux ne peuvent inclure les effets à longue distance comme le rayonnement de la flamme ou les brandons qui sont à l'origine des sautes de feu. D'autre part, à la fin des années 90, Watts et Strogatz [11] ont proposé un modèle de réseau appelé Réseau de Petit Monde (RPM) qui permet, en plus de la création d'amas, des connexions à longue distance en peu d'étapes de temps [11,12]. Ce modèle a été appliqué avec succès, en particulier, à la propagation des maladies [13,14]. Par la suite, un réseau de libre échelle a été proposé [15] pour étudier les propagations de virus à travers les sites Internet. Contrairement au modèle RPM, ce réseau est caractérisé par l'absence d'un seuil de propagation. Récemment, des pondérations furent introduites dans ces réseaux, aussi bien sur les sites que sur les liens, pour étudier des systèmes complexes comme les réseaux d'aéroport où le nombre de voyageurs par site ou le nombre de connexions aériennes est supérieur à un [16].

Dans cette Note, nous proposons un modèle basé sur un Réseau de Petit Monde à deux dimensions pour décrire la propagation d'un feu de végétation. Le présent modèle intègre une pondération physique des sites.

Après une description du modèle, les prédictions de propagation en milieu homogène seront comparées aux données expérimentales obtenues pour différentes conditions de feu. L'influence du vent et de la pente sur la vitesse de propagation mais aussi sur le comportement du feu sera examinée. Le modèle sera ensuite appliqué à des milieux hétérogènes afin d'illustrer sa capacité à décrire des situations de feu réelles.

2. Modèle de Réseau de Petit Monde *local* à sites pondérés

2.1. Description du modèle

Notre modèle est basé sur le Réseau usuel de Petit Monde (RPM) proposé initialement par Watts et Strogatz [11]. Ce dernier est décrit à partir d'un nombre de plus proches voisins k et d'un nombre moyen de connexions à longue distance ϕ (courts-circuits) engendrées aléatoirement sur tout le réseau. La notion de connexions (au nombre de $k + \phi$) dans le RPM est, dans notre modèle, remplacée par celle de paramètres d'impact définissant une zone d'influence. En effet, pour un site donné, cette zone est caractérisée par un (propagation isotrope) ou deux paramètres d'impact de façon à ce que tous les sites actifs placés dans cette zone soient connectés à ce site donné. Les paramètres d'impact peuvent être égaux aux longueurs caractéristiques x_c et y_c , directement reliées à l'impact radiatif (cas déterministe) ou engendrés suivant une distribution de type Poisson basée sur ces longueurs caractéristiques (cas aléatoire). Dans le modèle développée ici, les paramètres d'impact du modèle sont déterminés

au préalable en évaluant la distance d'impact radiatif, via le facteur de forme, pour chacune des flammes élémentaires dont les propriétés sont déduites de relations empiriques. Les corrélations de Putnam [19] et d'Albini [20] ont été respectivement utilisées pour le calcul de la hauteur et de l'angle d'inclinaison de la flamme dans les conditions des expériences pré-citées (vent, pente, combustible).

Dans la mesure où le Réseau de Petit Monde se limite ici à la zone d'influence qui est petite devant la taille du réseau global, on le nommera par la suite Réseau de Petit Monde local (RPMI). Le réseau global peut être vu comme un réseau régulier à longue distance avec des Réseaux locaux de Petit Monde. La prise en compte des sautes de feu dues aux brandons ou de l'hétérogénéité du milieu renforce le caractère Petit Monde du réseau.

On considère un réseau carré de 90 000 sites (300×300) correspondant, dans les applications présentes, à un domaine physique de $1 \text{ m} \times 1 \text{ m}$. L'espacement entre deux plus proches sites voisins est alors de 0,33 cm. En l'absence de pente et de vent, le paramètre d'impact est de 3, correspondant à une distance d'impact radiatif de 1 cm.

Pour une étape de temps $\delta t = 1 \text{ s}$ et en supposant que les temps caractéristiques de combustion et de dégradation thermique des éléments végétaux fins sont respectivement de 30 s et 100 s, les nombres de niveaux correspondants sont : $n_c = t_c = 30$ et $n_{DT} = t_{DT} = 100$.

2.2. Procédure de pondération des sites

Le modèle RPMI utilise une double pondération des sites basée sur la connaissance de deux temps caractéristiques que sont le temps de combustion d'un site après inflammation (t_c) et le temps de dégradation thermique d'un site avant son inflammation (t_{DT}). En d'autres termes, un site qui vient de s'enflammer a besoin de n_c étapes de temps pour se consumer ($t_c = n_c$), alors qu'un site placé à la frontière de la zone d'influence d'un site en feu (déterminé par une distance L_c à ce site au moins égale à 3) se dégradera thermiquement durant n_{DT} étapes de temps ($t_{DT} = n_{DT}$). L'influence d'un site en feu décroît exponentiellement avec la distance et, de ce fait, le temps d'inflammation d'un site exposé croît. En particulier, un site placé à une distance s du site en feu, nécessitera $n(s)$ étapes de temps pour se consumer, de sorte que :

$$n(s) = (n_{DT})^{s/L_c}. \quad (1)$$

La prise en compte de paramètres liés, par exemple, à la nature du végétal ou à sa teneur en eau, ne modifie pas la procédure de pondération mais affecte la zone d'influence L_c .

2.3. Aspect dynamique du modèle RPMI

Un site en feu élève le niveau de dégradation thermique des sites qui lui sont connectés (zone d'influence) à chaque étape de temps jusqu'à leur inflammation. Dès leur inflammation et durant un temps t_c , ces nouveaux sites contribuent à la dégradation thermique puis à l'inflammation des sites de leurs zones d'influence respectives. Le modèle permet de déterminer le contour du feu, considéré comme un cordon de flammes dont l'épaisseur est égale à la distance parcourue par le feu pendant le temps nécessaire à la combustion des éléments fins qui brûlent dans les flammes, t_c .

Il existe un seuil dynamique lié au rapport (temps de combustion/temps nécessaire au plus proche voisin pour s'enflammer). En d'autres termes

$$R = \frac{n_c}{n(1)} \quad (2)$$

$n(1)$ étant obtenu à partir de l'Éq. (1).

En effet, pour un rapport inférieur à un, le site en feu aura fini de se consumer avant que la dégradation thermique du plus proche voisin ne soit achevée et qu'il puisse s'enflammer. Dans les applications qui suivent, ce rapport est largement supérieur à un (dans le cas présent, $R \geq 6,46$ correspondant à un terrain plat sans vent).

3. Résultats et validation du modèle RPMI en milieu homogène

L'objet de ce paragraphe est de valider le modèle RPMI appliqué à la propagation d'un feu en milieu homogène par des expériences menées en laboratoire par Mendes-Lopes et al. [17] et Dupuy [18]. L'allumage est ponctuel et le milieu homogène est constitué d'aiguilles de pin (*Pinus pinaster*).

En milieu homogène, le modèle permet de déterminer la vitesse du front en fonction du paramètre d'impact. La Fig. 1 illustre cette dépendance et fait apparaître une variation en loi puissance avec une plus faible vitesse lorsque le paramètre d'impact (L) est engendré aléatoirement. Cette vitesse est donnée par la relation $0,171L^{1,51}$ pour un paramètre d'impact fixé alors qu'elle varie en $0,135L^{1,47}$ pour un paramètre d'impact aléatoire.

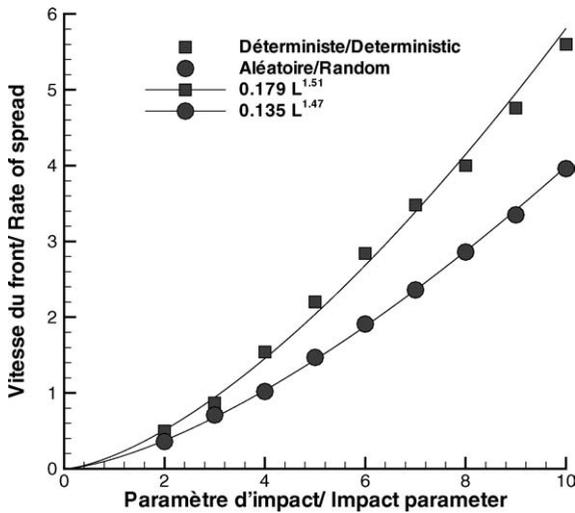


Fig. 1. Vitesse du front de feu vs. le paramètre d'impact en unités d'étapes de temps et de longueur.

Fig. 1. Rate of fire spread versus impact parameter in units of time and length steps.

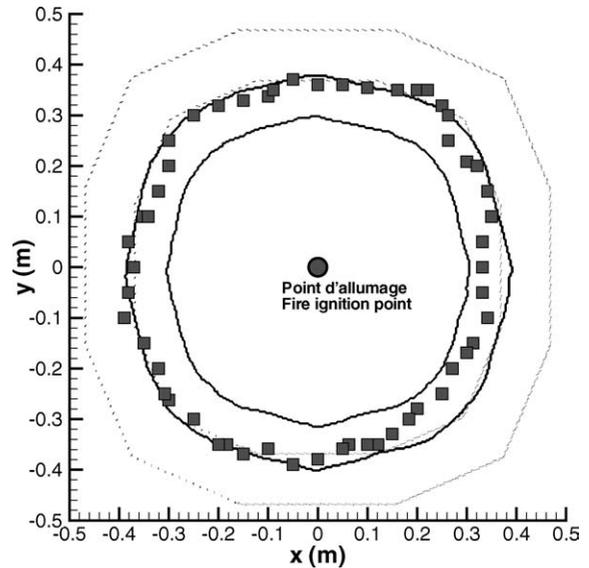


Fig. 2. Contour du feu pour un terrain plat en l'absence de vent après 144 étapes de temps. Les courbes en pointillés correspondent à une longueur caractéristique fixée : $x_c = 3$. Les courbes en trait plein correspondent à un paramètre d'impact évalué aléatoirement avec un maximum de 3. Les symboles correspondent aux données expérimentales du périmètre de feu [18].

Fig. 2. Fire edges for a flat terrain in zero state conditions 144 time steps after point ignition. Dotted lines correspond to a fixed characteristic length of $x_c = 3$. Solid lines correspond to an impact parameter randomly evaluated with a maximum value of 3. The experimental fire perimeter [18] is represented by symbols.

Le modèle RPMI présente en outre un rapport (temps de calcul/temps physique) de l'ordre du dixième ; ce qui lui confère un caractère opérationnel indéniable. A titre d'exemple, la propagation du feu exige environ 1 s de calcul pour une propagation réelle de 10 s.

3.1. Propagation en absence de vent

Sur un terrain plat et en l'absence de vent, le contour de feu devrait conserver une forme circulaire autour du point d'allumage initial. Ceci est confirmé par les résultats présentés sur la Fig. 2 obtenus après 144 étapes de temps (ici 144 s) pour un paramètre d'impact de 3 correspondant à une distance d'impact radiatif de 1 cm. Dans le cas déterministe, le modèle conduit à une surestimation de la surface brûlée. Dans le cas aléatoire, la prédiction du périmètre de feu est en bonne concordance avec celui obtenu expérimentalement et ce, malgré la légère dissymétrie des résultats expérimentaux probablement due à la difficulté de s'affranchir totalement de la présence de vent.

Lorsque la propagation s'effectue sur un terrain en pente, le contour de feu prend la forme d'une ellipse comme le montre la Fig. 3 représentant les limites du contour de feu obtenu avec le modèle après 78 étapes de temps, soit 78 s, pour des paramètres d'impact de 3 et 7 respectivement dans les directions x et y , et une pente de 30° . Si l'on compare les périmètres de feu calculés à celui observé expérimentalement, on note, comme précédemment, une surestimation de la surface brûlée prédite par la version déterministe du modèle, mais un très bon accord du périmètre de feu obtenu à l'aide de la version aléatoire.

3.2. Propagation à plat en présence de vent

La Fig. 4 montre l'influence de la vitesse du vent sur la vitesse de propagation de la partie la plus avancée du contour de feu (tête). La comparaison des résultats obtenus par le modèle dans sa version aléatoire avec l'expérience montre une bonne reproduction de l'effet du vent sur la vitesse de propagation du feu.

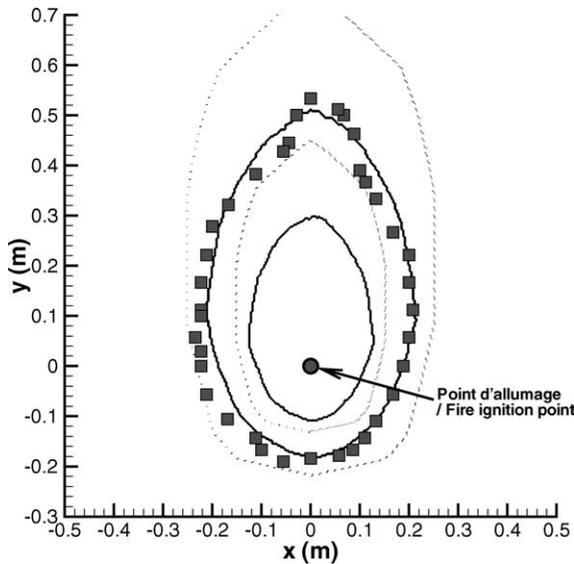


Fig. 3. Contour du feu pour un terrain de pente 30° en l'absence de vent après 78 étapes de temps. Les courbes en pointillés correspondent à des longueurs caractéristiques fixées : $x_c = 3$ et $y_c = 7$. Les courbes en trait plein correspondent à des paramètres d'impact évalués aléatoirement avec des maxima respectifs de 3 et 7. Les symboles correspondent aux données expérimentales du périmètre de feu [18].

Fig. 3. Fire edges for a 30° upslope terrain with no wind 78 time steps after point ignition. Dotted lines correspond to fixed characteristic lengths: $x_c = 3$ and $y_c = 7$. Solid lines correspond to impact parameters randomly evaluated with maximum values of 3 and 7. The experimental fire perimeter [18] is represented by symbols.

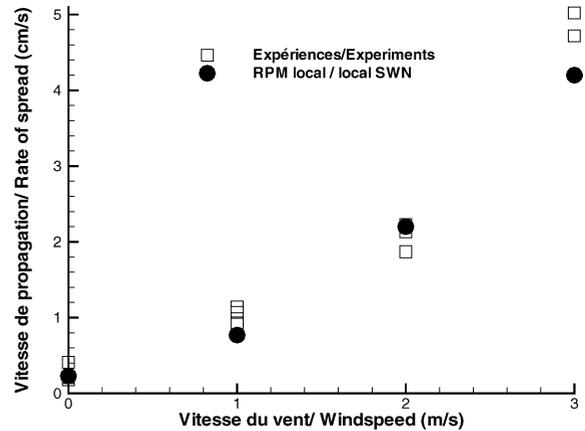


Fig. 4. Vitesse de propagation en fonction de la vitesse du vent : expérience (carrés), RPMI (cercles).

Fig. 4. Rate of spread versus windspeed: experimental (squares) [17], ISWN (circles).

Le changement de pente de la courbe représentant la vitesse de propagation en fonction de la vitesse du vent, qu'on sait être dû à la transition d'un régime dominé par les forces de gravité à un régime dominé par l'action du vent [21], est obtenu par le modèle, en bon accord avec les résultats expérimentaux.

4. Extension du modèle RPMI aux milieux hétérogènes

Les milieux naturels dans lesquels se propagent les feux sont, par essence, hétérogènes, dans le sens où certaines régions ne participent que peu ou pas du tout à cette propagation soit spontanément soit sous l'action d'agents inhibiteurs (eau, retardants). Il apparaît donc indispensable d'étendre le modèle à ces milieux hétérogènes. Ceci peut se faire par l'introduction d'une proportion p de sites actifs (combustibles) disposés aléatoirement, les autres sites étant inactifs (peu ou pas combustibles).

En plus du seuil dynamique de propagation cité précédemment, il existe un seuil géométrique (percolation) lié à la proportion de sites actifs, p . Une étude approfondie de ces seuils de propagation [22] montre que, pour un paramètre d'impact supérieur à 3 et un temps de combustion $t_c = 30$ s, la propagation est possible pour $p \geq 30\%$.

La Fig. 5 montre les zones touchées par le feu après 78 étapes de temps (78 s) de propagation sur un terrain en pente de 30° en l'absence de vent pour deux valeurs de p : 30 % et 50 %. Les zones en noir correspondent à la surface brûlée, celles en gris à la zone en cours de combustion. Les zones blanches internes au périmètre de feu correspondent à des sites inactifs, la probabilité de trouver un site actif inaccessible au feu étant très faible. La différence d'aspect entre les zones touchées par le feu reflète la prédominance de l'effet Petit Monde sur l'effet réseau régulier pour $p = 30\%$. Cette particularité peut expliquer l'apparition de doigts ou de feux disséminés en bordure de feu.

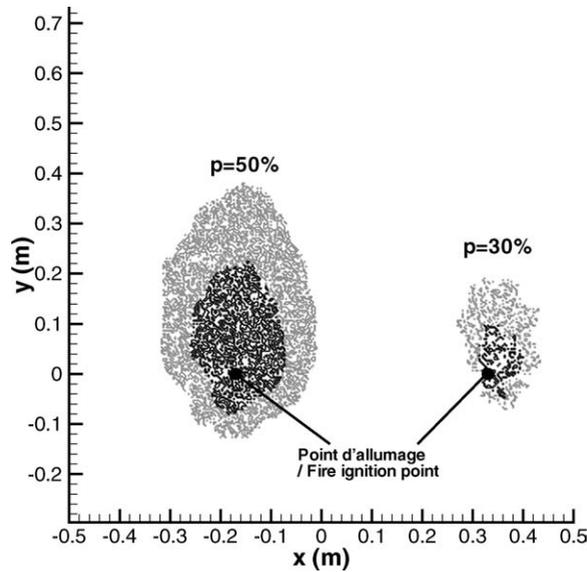


Fig. 5. Surfaces brûlées 78 étapes de temps après allumage ponctuel pour 50 % et 30 % de sites combustibles.

Fig. 5. Burnt areas 78 time steps after point ignition for 50% and 30% combustible sites.

5. Conclusion

Un modèle RPM/ basé sur le Réseau de Petit Monde avec une double pondération des sites a été utilisé pour décrire la propagation des feux de végétation. Cette pondération repose sur des concepts physiques liés à la dégradation thermique du combustible et à sa combustion. Les liens lointains dans le modèle RPM/ correspondent aux longueurs caractéristiques d'impact radiatif du feu.

Le présent travail a conduit aux conclusions suivantes :

- Le modèle RPM/ reproduit de façon satisfaisante la propagation du feu sur un terrain plat ou en pente en l'absence de vent. Il restitue correctement la vitesse de propagation en fonction du vent, en particulier son évolution non linéaire lorsque la vitesse du vent augmente.
- L'extension du modèle RPM/ aux milieux hétérogènes fait apparaître la proportion en sites actifs comme une bonne mesure de l'effet Petit Monde.
- Le modèle RPM/, qui fournit des résultats dans un temps très inférieur au temps physique, est ainsi susceptible de constituer la base d'un outil opérationnel de lutte contre les feux.

Il est cependant nécessaire d'appliquer ce modèle à des conditions de brûlages dirigés et de feux réels, où le Réseau de Petit Monde trouve sa pleine justification et ainsi confirmer l'étendue de ses possibilités. D'autre part, une étude statistique des amas engendrés par ce modèle combinant aussi bien les propriétés d'un réseau régulier que celles d'un Réseau de Petit Monde est utile pour caractériser les zones particulièrement sensibles au feu et évaluer ainsi les moyens de prévention et de lutte à engager. Ceci fera l'objet d'investigations futures.

Remerciements

Les auteurs remercient tout particulièrement les experts, qui ont examiné le présent article, pour leurs commentaires et suggestions constructives.

Un des auteurs (N.Z.) remercie également le laboratoire IUSTI/UMR CNRS 6595 de l'Ecole Polytechnique Universitaire de Marseille pour son soutien financier.

Références

- [1] R.O. Weber, *Prog. Energy Combust. Sci.* 17 (1991) 67.
- [2] G. Albinet, G. Searby, D. Stauffer, *J. Phys. (Paris)* 47 (1986) 1.
- [3] J. Nahmias, H. Téphany, E. Guyon, *Rev. Phys. Appl.* 24 (1989) 773.
- [4] D. Stauffer, A. Aharony, *Introduction to Percolation Theory*, Taylor and Francis, Londres, 1991.
- [5] J. Nahmias, H. Téphany, J.A.M.S. Duarte, *C. R. Acad. Sci. II* 322 (1996) 113.
- [6] J.A.M.S. Duarte, in : D. Stauffer (Ed.), *Annual Reviews of Computational Physics*, World Scientific, Singapore, 1997, p. 1.
- [7] H. Téphany, J. Nahmias, J.A.M.S. Duarte, *Physica A* 242 (1997) 57.
- [8] J. Margerit, O. Séro-Guillaume, in : 13ième Congrès de Mécanique, Poitiers, 1997, pp. 235–238.
- [9] G.L. Ball, D.P. Guertin, *Int. J. Wildland Fire* 2 (1992) 47.
- [10] F.J. Barros, M.T. Mendes, *Simulation Practice and Theory* 5 (1997) 185.
- [11] D.J. Watts, S.H. Strogatz, *Nature* 393 (1998) 440.
- [12] D.J. Watts, *Small Worlds*, Princeton University Press, Princeton, NJ, 1999.
- [13] N. Zekri, J.P. Clerc, *Phys. Rev. E* 64 (2001) 056115.
- [14] N. Zekri, J.P. Clerc, *C. R. Physique* 3 (2002) 741.
- [15] R. Albert, A.L. Barabasi, *Rev. Mod. Phys.* 74 (2000) 47.
- [16] A. Barrat, M. Barthélemy, R. Pastor-Satorras, A. Vespignani, *Proc. Nat. Acad. Sci. USA* 101 (2004) 3747.
- [17] J.M.C. Mendes-Lopes, J.M.P. Ventura, J.M.P. Amaral, *Int. J. Wildland Fire* 12 (2003) 67.
- [18] J.L. Dupuy, *Int. J. Wildland Fire* 5 (1995) 153.
- [19] A.A. Putnam, in: 10th Symposium (Int.) on Combustion, The Combustion Institute, Pittsburgh, PA, 1965, pp. 1039–1046.
- [20] F.A. Albini, *Combust. Flame* 43 (1981) 155.
- [21] B. Porterie, D. Morvan, J.C. Loraud, M. Larini, *Phys. Fluids* 12 (7) (2000) 1762.
- [22] N. Zekri, B. Porterie, J.P. Clerc, J.C. Loraud, soumis à *Phys. Rev. E* (2004).