



## Influence des brandons sur la propagation d'un feu de forêt

Bernard Porterie <sup>a,\*</sup>, Nouredine Zekri <sup>a,b</sup>, Jean-Pierre Clerc <sup>a</sup>, Jean-Claude Loraud <sup>a</sup>

<sup>a</sup> IUSTI/CNRS UMR 6595, université de Provence, technopôle de Château-Gombert, 5, rue Enrico-Fermi, 13453 Marseille cedex 13, France

<sup>b</sup> USTO, département de physique, LEPM, BP 1505 El Mnaouer, Oran, Algérie

Reçu le 27 juillet 2005 ; accepté le 22 novembre 2005

Disponible sur Internet le 5 janvier 2006

Présenté par Pierre-Gilles de Gennes

### Résumé

L'action des brandons (débris enflammés ou incandescents) sur la propagation d'un feu de végétation en milieux homogènes ou hétérogènes est étudiée à l'aide d'un réseau bidimensionnel de petit monde à sites pondérés. La distance d'émission des brandons obéit à une loi de distribution exponentiellement décroissante. En milieu homogène, l'influence des brandons est d'autant plus grande que la longueur d'impact du feu est faible et que la distance caractéristique d'émission est grande. Des variations brutales de la vitesse de propagation apparaissent et des oscillations temporelles de la surface en feu peuvent se manifester. En milieu hétérogène, l'action des brandons s'atténue lorsque le degré d'hétérogénéité et la distance d'émission augmentent. Une discussion de l'influence des longueurs caractéristiques du rayonnement, de l'émission des brandons et de l'hétérogénéité du milieu sur la propagation est proposée. *Pour citer cet article : B. Porterie et al., C. R. Physique 6 (2005).*

© 2005 Académie des sciences. Publié par Elsevier SAS. Tous droits réservés.

### Abstract

**Influence of firebrands on wildland fire spread.** A two-dimensional weighed-site small-world network is proposed to study the action of firebrands (lofted flaming or glowing debris) on fire spread through homogeneous or heterogeneous systems. The firebrand emission distance obeys an exponentially-decreasing distribution law. For homogeneous systems, the effect of firebrands is strengthened when the fire impact length decreases and the characteristic firebrand emission distance increases. As a result, jumps in the rate of spread appear and time oscillations in the burning area can occur. For heterogeneous systems, this effect becomes weaker as the degree of disorder and the distance of firebrand emission increase. The influence of characteristic lengths of radiation, firebrand emission, and medium heterogeneity on fire spread is discussed. *To cite this article: B. Porterie et al., C. R. Physique 6 (2005).*

© 2005 Académie des sciences. Publié par Elsevier SAS. Tous droits réservés.

*Mots-clés* : Brandons ; Feu de forêt ; Réseau de petit monde ; Longueurs caractéristiques ; Saute de feu

*Keywords* : Firebrands; Forest fire; Small-world network; Characteristic lengths; Spotting

\* Auteur correspondant.

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

## Abridged English version

The spotting process, whereby flaming or burning embers (e.g., leaves, pine cones, pieces of bark) produced when brush and trees burn rapidly are lofted by the fire plume and transported downwind to start new fires (spotfires) in receptive fuel beds far from the main front (from hundred of meters up to a few kilometers), is an important mechanism for fire spread. Spotting complicates wildland fire control and is the main cause of house loss in wildland–urban interface areas. The emission and transport of firebrands depend on the kind of vegetation as well as meteorological and topological conditions. There are numerous studies concerning trajectories and combustion of firebrands ([1–5], to name but a few) whereas, to the best of our knowledge, very few works have explored their action on fire propagation (e.g., [6]). To model this long-range action, a two-dimensional  $L$ -size small-world network [8] including site weights is proposed. This model extends the local small-world network which takes into account long-range radiation [10]. The influence zone of each burning site is defined by two impact parameters randomly generated following a Poisson-like distribution. Such parameters are determined from fire and fuel conditions. Weights are associated to each node depending on thermal degradation ( $t_{DT}$ ) and combustion ( $t_c$ ) characteristic times of an active site. The spotting distance obeys an exponentially-decreasing distribution law as found both experimentally [13] and numerically [14] with a characteristic emission distance  $D_0$ . It is assumed that each burning site, during its combustion, generates one efficient firebrand. This means that the burning of the efficient firebrand lasts enough time to ignite the site where it falls. The heterogeneity of the system is introduced by means of two kinds of vegetation,  $A$  and  $B$ , having the same characteristic times but different impact parameters ( $l_A$  and  $l_B \leq l_A$ ). The density of each kind of vegetation being fixed to 50%, the degree of heterogeneity is then defined by the ratio of impact parameters ( $h = l_B/l_A$ ).

The following conclusions can be drawn. For homogeneous systems: (i) the action of firebrands is all the more pronounced as the impact parameter is small and the spotting distance is large (spotfires have enough time to develop before being caught by the primary fire front); (ii) for a system whose size is smaller than the influence zone, a ballistic propagation regime appears; (iii) when the size of the system is finite and smaller than  $D_0$ , the probability of emission of efficient firebrands within the system becomes size-dependent. At the thermodynamic limit, this probability becomes constant. For heterogeneous systems: (i) heterogeneity reduces the action of efficient firebrands on the fire propagation; (ii) saturation occurs during propagation for  $h = 0$  (inactive  $B$  sites) when the largest cluster size is smaller than  $D_0$ .

Characteristic lengths and times that affect fire propagation and spotting processes have been emphasized. A forthcoming extensive study will address the influence of these parameters on fire behavior in homogeneous and heterogeneous systems.

## 1. Introduction

Les brandons sont des débris végétaux enflammés ou incandescents entraînés dans le panache convectif d'un incendie de forêt. Ils peuvent être à l'origine de feux secondaires à plus ou moins longue distance du front de feu (de plusieurs centaines de mètres, voire plusieurs kilomètres) et sont la première cause d'inflammation des habitations à l'interface forêt-habitat. Ils conditionnent, de ce fait, les stratégies de prévention et de lutte contre l'incendie. La génération et le comportement aérodynamique des brandons (comme, par exemple, des morceaux d'écorces, des aiguilles de pin ou des feuilles) dépendent du type de végétation et de son état hydrique, des conditions météorologiques et topologiques.

Si les trajectoires et la combustion des brandons émis par un feu de végétation ont été largement étudiées [1–5], leur effet sur la propagation du feu lui-même n'a été, à notre connaissance, que très peu traité (e.g., [6]). Parmi les modèles de propagation de feux existants, statistiques, empiriques ou déterministes, les modèles statistiques (automates cellulaires, percolation) semblent être les mieux appropriés. Cependant, l'utilisation de réseaux réguliers ne permet pas d'inclure les effets à longue distance comme le rayonnement de la flamme [7] ou les projections de brandons qui sont à l'origine des sautes de feu. À la fin des années 1990, Watts et Strogatz [8] ont proposé un modèle de réseau appelé réseau de « petit monde » qui permet, en plus de la création d'amas, des connexions à longue distance en un nombre fini d'étapes [8,9]. Récemment, un modèle, basé sur le réseau de petit monde et incluant une pondération physique des sites, a été développé pour prendre en compte le rayonnement [10]. Les prédictions de propagation en milieu homogène ont été comparées aux données obtenues pour différentes conditions de feux expérimentaux et ont révélé un excellent accord. L'objet de cette note est d'étendre le modèle précédent à l'étude de l'action des brandons sur la propagation du feu. Cette action se traduit par des connexions à longue distance dans le réseau de petit monde.

## 2. Modèle de réseau de petit monde local à sites pondérés

### 2.1. Description du modèle

L'existence de réseaux de « petit monde » a été révélée par l'expérience de Milgram en 1967 [11] dans laquelle il a constaté qu'il ne faut pas plus de six intermédiaires, en moyenne, pour que deux personnes quelconques dans le monde soient mises

en contact. Trente ans après, Watts et Strogatz [8] en donnent une représentation sous la forme d'un réseau social ayant des propriétés d'amas et permettant une connexion entre deux individus en un nombre fini d'étapes (effet « petit monde »). Ce réseau de petit monde utilise donc deux types de connexions, les unes impliquant les plus proches voisins, les autres à longue distance (court circuits). Ces dernières sont engendrées aléatoirement avec une probabilité uniforme sur tout le réseau. L'adaptation du modèle à la propagation des feux de forêts a été décrite en détail précédemment [10,12]. La notion de connexions entre proches voisins dans le modèle de petit monde est remplacée, dans notre modèle, par celle de paramètres d'impact définissant une zone d'influence d'un site en feu directement connectée au site en question. Ces paramètres d'impact sont engendrés suivant une distribution de type Poisson basée sur les longueurs caractéristiques  $l_x$  et  $l_y$ , directement reliées à l'impact radiatif du feu et déterminées dans des conditions météorologiques et des situations de feu données. Les connexions à longue distance dans le modèle de petit monde correspondent ici à l'émission de brandons à partir de chaque site en feu. De plus, dans notre modèle la distance d'émission est engendrée non uniformément. Il a été montré expérimentalement [13] et numériquement à l'aide d'un modèle physique déterministe [14] que cette probabilité d'émission est exponentiellement décroissante avec la distance,  $d$ , au site en feu :  $P(d) \propto \exp(-d/D_0)$ ,  $D_0$  étant la distance caractéristique d'émission des brandons. Les longueurs  $l_x$ ,  $l_y$  et  $D_0$  sont exprimées ici en unité arbitraire de longueur, ual, correspondant au pas du réseau. Pour l'application aux incendies de forêt, cette unité correspond à la distance moyenne entre deux arbres voisins.

En outre, le modèle utilise une 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 ( $t_{DT}$ ). Un site en feu élève le niveau de dégradation thermique des sites qui lui sont connectés (zone d'influence) à chaque unité arbitraire de temps (uat) 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. L'influence d'un site en feu décroît exponentiellement avec la distance à ce site et, de ce fait, le temps d'inflammation d'un site exposé augmente. 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. 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  $t_c$ . Chaque site en feu est supposé émettre un brandon efficace pendant le temps de sa combustion  $t_c$ . Un brandon est dit efficace quand, une fois arrivé au sol, le temps de combustion qui lui reste avant extinction est supérieur ou égal à celui de dégradation thermique de la végétation qui l'entoure  $t_{DT}$ . Ainsi chaque brandon efficace sera à l'origine d'une saute de feu. Le nombre maximum de brandons efficaces émis dans tout le système est alors donné par la relation suivante :

$$N_{br} = N_{sf} [1 - \exp(-L/D_0)] \quad (1)$$

Dans cette expression,  $N_{sf}$  est le nombre de sites en feu et  $L$  est la taille du système.

Dans les applications qui suivent, le temps de combustion est largement supérieur à celui nécessaire au plus proche voisin pour s'enflammer.

## 2.2. Nature du milieu

Dans le cas d'un milieu homogène, un seul type de végétation couvre la totalité du système. L'hétérogénéité, quant à elle, peut se traduire par l'existence de deux ou plusieurs types de végétation (comme des espèces différentes ou des espèces identiques avec des états hydriques différents) conduisant à des comportements différents face au feu. On s'intéresse ici à deux types de végétation  $A$  et  $B$  dont les proportions en sites sont respectivement  $p$  et  $1 - p$ . Ces deux types de végétation sont caractérisés par leur paramètre d'impact  $l_A$  et  $l_B$ , avec  $l_B \leq l_A$ , et on supposera ici qu'ils possèdent des temps caractéristiques de dégradation thermique et de combustion identiques. Le degré d'hétérogénéité est alors défini par la donnée de  $p$  et du rapport  $h = l_B/l_A$ . Lorsque  $h = 0$ , le milieu est constitué de  $p$  sites de paramètre d'impact  $l_A$  et  $1 - p$  sites de paramètre d'impact  $l_B = 0$  (sites inactifs), ce qui correspond à une hétérogénéité totale (modèle de percolation). Dans ce cas, il existe une valeur seuil,  $p_c$ , de la proportion en sites  $A$  à partir de laquelle la propagation du feu a lieu d'un bord à l'autre du système. A l'inverse, un milieu homogène correspond à  $h = 1$ . La répartition des sites  $A$  et  $B$  est ici engendrée aléatoirement avec une distribution uniforme.

## 2.3. Longueurs caractéristiques de la propagation

### 2.3.1. Zone d'influence du feu

Dans les systèmes homogènes ou hétérogènes, en l'absence de brandons, la propagation du feu est caractérisée par la zone d'influence d'un site en feu [10,12]. Pour un système situé dans la zone d'influence, la propagation est indépendante de la taille de ce système. Dans ce cas, la propagation est du type balistique car tous les sites du système sont connectés. Elle est diffusive lorsque le système est plus grand que la zone d'influence.

### 2.3.2. Longueur d'émission des brandons

Les brandons introduisent une longueur supplémentaire  $D_0$  caractéristique de la décroissance exponentielle de leur probabilité d'émission en fonction de la distance. A partir de l'Éq. (1), deux comportements asymptotiques de cette probabilité apparaissent selon la taille du système :

$$D_0 \gg L; \quad N_{\text{br}}(t) = N_{\text{sf}}(t) \frac{L}{D_0} \quad (2)$$

et

$$D_0 \ll L; \quad N_{\text{br}}(t) = N_{\text{sf}}(t) \quad (3)$$

Ils mettent en évidence un effet d'échelle de l'émission des brandons pour de grandes distances d'émission, et une saturation du nombre de brandons émis pour de petites distances d'émission. En d'autres termes, pour des valeurs de  $D_0$  grandes devant la taille du système, la proportion en sautes de feu relative à l'aire qui brûle,  $N_{\text{br}}/N_{\text{sf}}$ , est proportionnelle à la taille du système relativement à  $D_0$ . Dans le cas d'un système de taille infinie, pour lequel  $D_0 \ll L$ , cette proportion devient constante et égale à un (tous les brandons émis tombent à l'intérieur du système). On comprend alors la nécessité de réduire la taille du système et donc l'effet des brandons sur la propagation par la mise en place de certains moyens de lutte comme la compartimentation des massifs forestiers sensibles.

### 2.3.3. Taille du plus grand amas (systèmes hétérogènes)

Lorsque le degré d'hétérogénéité est total ( $h = 0$ ), le système présente des amas de sites actifs de tailles différentes. La taille du plus grand amas dépend de la proportion des sites actifs,  $p$ , dans le système. Dans le cas des réseaux réguliers, cet amas relie les deux bords du système à partir d'une proportion critique  $p_c$  appelée seuil de percolation (on dit que la taille de l'amas diverge pour un réseau de taille infinie). Par définition, ce seuil critique est la valeur de  $p$  pour laquelle la transition non propagation/propagation du feu a lieu. Dans les réseaux de petit monde, on montre que la taille des amas actifs ne diverge pas au seuil de percolation  $p_c$ , mais augmente en puissance en fonction de  $p - p_c$  au delà de  $p_c$ . Ainsi, juste au-dessus de  $p_c$  (lorsque la propagation a lieu) la taille effective du système est réduite à celle de l'amas le plus grand,  $\zeta$ , qui est relativement petit. Une compétition existe donc entre cette dernière,  $\zeta$ , et la distance caractéristique des sautes de feu  $D_0$ . L'analyse est analogue à la précédente en remplaçant la taille du système,  $L$ , par  $\zeta$ . De sorte que : si  $D_0 \gg \zeta$ , alors les brandons tomberont avec une forte probabilité dans une zone de sites inactifs et leur effet sur la propagation globale du feu sera négligeable. Dans le cas contraire :  $D_0 \ll \zeta$ , les brandons tomberont avec une forte probabilité dans l'amas le plus grand et ainsi renforceront la propagation. Il est donc évident que l'effet des sautes de feu ne sera significatif que bien au delà de  $p_c$ . Leur effet sur la propagation du feu devrait être d'autant plus faible que l'hétérogénéité (correspondant à une faible proportion de sites actifs) est forte.

Notons enfin que la propagation du feu entraîne une diminution au cours du temps de la proportion des sites actifs  $p$  car les sites une fois brûlés peuvent être considérés comme inactifs, contrairement à la propagation dans un réseau électrique où  $p$  est constant [15]. Ceci traduit un phénomène de percolation dynamique.

Dans le problème particulier des feux de forêt, le rayonnement de la flamme d'un site en feu active des liens dans toute sa zone d'influence ; ce qui modifie la valeur du seuil de percolation que l'on obtiendrait avec un réseau régulier [16]. Nous avons montré dans la Réf. [12] que le seuil de percolation de ce nouveau réseau n'est pas constant mais qu'il dépend de la taille de la zone d'influence.

## 3. Résultats

Les résultats présentés dans cette étude concernent un allumage ponctuel représentatif de l'éclosion et du développement d'un feu de végétation. La taille du système est de  $300 \text{ ual} \times 300 \text{ ual}$ , soit 90 000 sites uniformément répartis. Dans les systèmes hétérogènes, la position du site en feu le plus avancé et le nombre de sites en feu sont déterminés à partir de moyennes calculées sur  $n$  réalisations. Statistiquement, compte tenu de la taille des systèmes considérés, un nombre de 100 réalisations fournit une précision suffisante. Un site en feu peut se trouver soit dans le front de feu primaire soit dans un front secondaire généré par une saute de feu. Les temps caractéristiques de combustion et de dégradation thermique d'un site combustible sont respectivement de 30 et 100 uat. A titre indicatif, lorsque la distance entre deux arbres est de 3 m, le réseau considéré couvre une surface de 8,1 ha et des durées d'échauffement et de combustion de 500 et 150 s fournissent un ordre de grandeur de l'unité arbitraire de temps :  $1 \text{ uat} = 5 \text{ s}$ . Le paramètre d'impact dans la direction transverse à celle de propagation du feu est maintenu constant et égal à  $l_x = 2 \text{ ual}$ . La forme de la zone d'influence d'un site en feu est alors caractérisée par la seule donnée du paramètre d'impact dans la direction de propagation  $l_y$ . Une valeur élevée de ce paramètre d'impact peut correspondre à une forte anisotropie de la forme du front due à l'action du vent et/ou de la pente du terrain.

## 3.1. Milieux homogènes

La propagation d'un feu, susceptible de générer des brandons dont la distance caractéristique d'émission est  $D_0 = 30, 70$  et  $190$  ual est représentée sur la Fig. 1. Les contours de feu obtenus à deux instants illustrent l'apparition de sautes de feu dues à

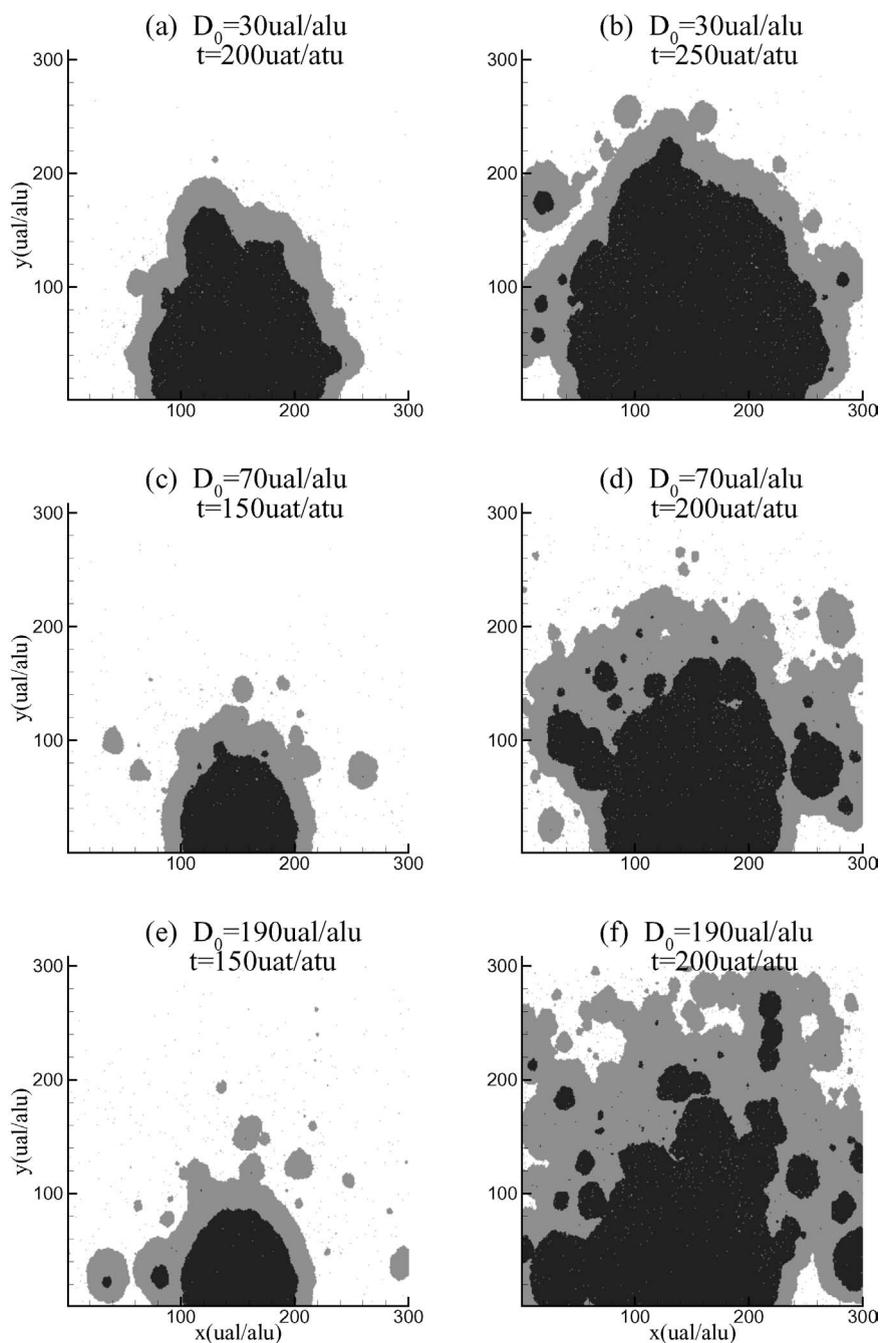


Fig. 1. Contours du feu à deux instants pour différentes distances caractéristiques d'émission des brandons :  $D_0 = 30, 70$  et  $190$  ual. La zone grisée correspond à la zone en feu, celle en noir à la zone brûlée. Le feu est initié par un allumage ponctuel ( $x = 150, y = 0$ ).  $l_x = 2$  ual et  $l_y = 4$  ual.

Fig. 1. Fire edges at two instants for spotting distances of  $D_0 = 30, 70$  and  $190$  alu. The gray area corresponds to the burning zone and the black to the burned zone. Point-ignition occurs at  $x = 150$  and  $y = 0$ .  $l_x = 2$  alu and  $l_y = 4$  alu.

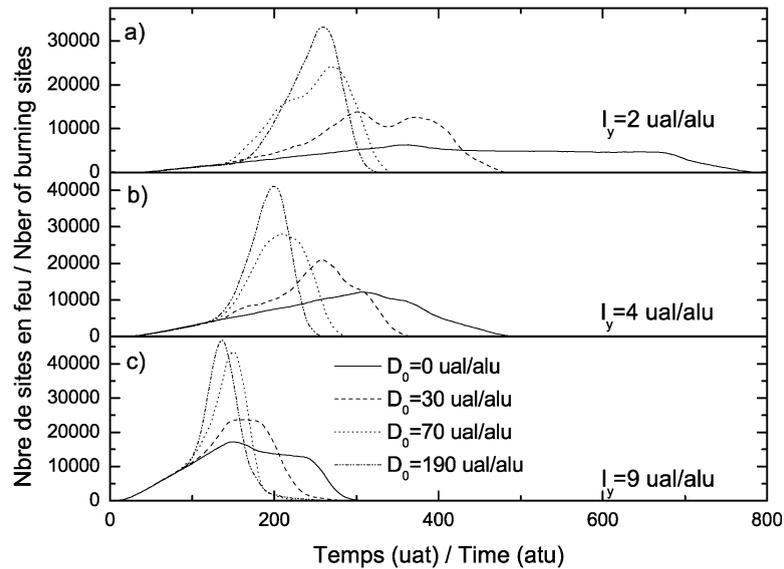


Fig. 2. Evolution du nombre de sites en feu au cours du temps pour différentes distances caractéristiques d'émission des brandons : (a)  $l_y = 2$  ual, (b)  $l_y = 4$  ual et (c)  $l_y = 9$  ual. Dans tous les cas :  $l_x = 2$  alu.

Fig. 2. Time evolution of the number of burning sites for different spotting distances: (a)  $l_y = 2$  alu, (b)  $l_y = 4$  alu, and (c)  $l_y = 9$  alu. For all cases:  $l_x = 2$  alu.

l'émission de brandons ainsi que le développement de ces feux secondaires et leur absorption ultérieure par le front primaire. Lorsque la distance d'émission des brandons augmente, l'extension de la zone en feu ainsi que l'augmentation de la dimension fractale du front apparaissent clairement. Les sautes lointaines donnent alors naissance à des feux secondaires qui ont le temps de se développer avant d'être rattrapés par le front primaire.

La Fig. 2 montre l'augmentation sensible et rapide de la zone en feu en fonction de la distance d'émission  $D_0$  pour différents paramètres d'impact et l'apparition d'un maximum. Lorsque le paramètre d'impact  $l_y$  diminue, le front se propage plus lentement, laissant les feux secondaires se développer avant qu'ils ne soient rattrapés. Cette séquence de création/absorption d'un ou plusieurs feux secondaires peut se reproduire et donner lieu à des oscillations dans l'évolution du nombre de sites en feu au cours du temps, comme le montre nettement la Fig. 2(a) pour  $D_0 = 30$  et  $70$  ual. Ce type d'oscillations ressemble à celui observé dans les phénomènes proies-prédateurs et aussi dans l'évolution temporelle des épidémies [17]. Pour  $D_0 = 190$  ual, quelle que soit la valeur du paramètre d'impact, aucune oscillation n'est observée, les feux secondaires se développent presque indépendamment.

Pour des valeurs de  $D_0$  faibles devant la taille du système, la proportion de brandons émis relative à l'aire qui brûle,  $N_{br}/N_{sf}$ , est constante et égale à 1, conformément à l'Éq. (3). Pour de grandes valeurs de  $D_0$ , ici  $D_0 = 190$  ual, cette proportion diminue jusqu'à 0,8 d'après l'Éq. (1), ce qui explique l'inversion des évolutions du nombre de sites en feu en début d'émission des brandons ( $t > 100$  uat) observée sur la Fig. 2a.

L'effet des brandons sur la vitesse de propagation du feu (Fig. 3) se traduit par une succession de variations abruptes de cette vitesse. Cet effet notable pour de faibles valeurs du paramètre d'impact se réduit pour de fortes valeurs de ce paramètre. On peut s'attendre, lorsque  $D_0 \gg L$  et après la phase de dégradation thermique des brandons ( $t \geq t_{DT}$ ), à ce que l'effet « petit monde » se manifeste par des sauts de feu d'un bord à l'autre du système.

Les Figs. 2 et 3 montrent que l'action des brandons commence à apparaître d'autant plus tôt que la valeur du paramètre d'impact est élevée. D'après l'Éq. (1), cet effet nécessite un nombre de sites en feu suffisamment grand pour donner naissance à un feu secondaire. Ce nombre de sites en feu est atteint plus rapidement lorsque la valeur du paramètre d'impact est élevée.

Ces figures montrent également que l'effet des brandons commence à se manifester après un temps caractéristique qui augmente avec le paramètre d'impact et en deçà duquel l'intervention des services de lutte est plus facile.

### 3.2. Milieux hétérogènes

La propagation d'un feu dans un système binaire constitué à parts égales de sites  $A$  et de sites  $B$  ( $p = 0,5$ ) est étudiée. Dans ce cas, le seul paramètre caractérisant l'hétérogénéité du système est le rapport des paramètres d'impact,  $h$ . Ce rapport varie de  $h = 0$  (systèmes totalement hétérogènes) à  $h = 1$  (systèmes homogènes) en passant par  $h = 0,5$  pour lequel un site

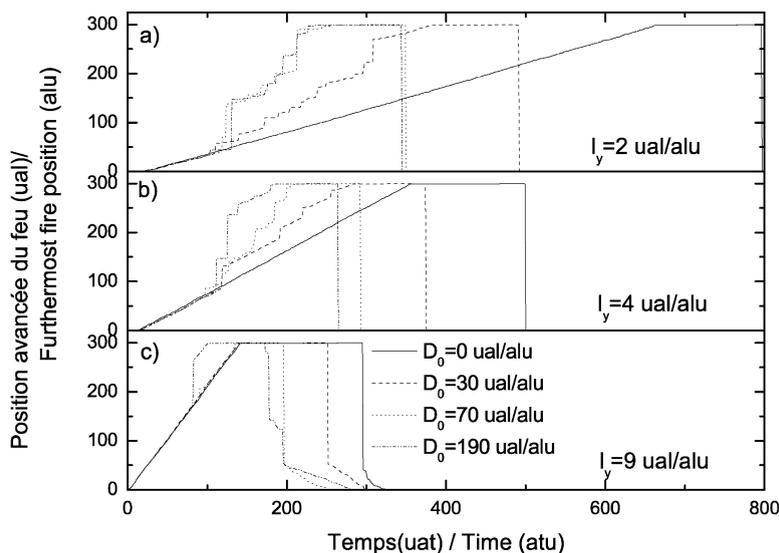


Fig. 3. Evolution de la position la plus avancée du feu au cours du temps pour différentes distances caractéristiques d'émission des brandons : (a)  $l_y = 2$  ual, (b)  $l_y = 4$  ual et (c)  $l_y = 9$  ual. Dans tous les cas :  $l_x = 2$  ual.

Fig. 3. Time evolution of the furthest position of the fire front for different spotting distances: (a)  $l_y = 2$  alu, (b)  $l_y = 4$  alu and (c)  $l_y = 9$  alu. For all cases:  $l_x = 2$  alu.

$B$  a un paramètre d'impact moitié de celui d'un site  $A$ . Le lecteur pourra trouver l'ensemble des résultats obtenus en milieux hétérogènes dans [18]. Les commentaires qui suivent sont relatifs à ces résultats.

Le front primaire et les feux secondaires se développent plus rapidement dans le cas homogène que dans le cas où  $h = 0,5$ , ce qui se traduit par un nombre plus élevé de sites en feu et donc par un effet plus prononcé des brandons sur la propagation (Figs. 4a–4d [18]). Lorsque le milieu présente 50 % de sites inactifs ( $h = 0$ ), la propagation est considérablement ralentie et fait apparaître, comme on pouvait s'y attendre, des zones non brûlées uniformément réparties dans le périmètre du feu. Pour  $h = 0$ , la structure fractale du front est ici mise en évidence avec une dimension réduite.

L'action des brandons sur l'évolution temporelle du nombre de sites en feux et du site le plus avancé (Figs. 5 et 6 [18]) pour les différents degrés d'hétérogénéité, il apparaît que cet effet diminue avec  $h$ . Dans ce cas, les zones secondaires se développent difficilement du fait de la présence de sites  $B$  et la probabilité de saute diminue également. Ceci conduit à des variations moins abruptes de la vitesse de propagation du feu.

Les Figs. 5c et 6c de [18] montrent un effet de saturation pour  $200 \text{ uat} < t < 400 \text{ uat}$  et  $D_0 = 70\text{--}190$  ual : la taille du plus grand amas est alors inférieure à  $D_0$  et les sautes de feu sont générées au delà de cet amas ; de sorte que ces dernières ne contribuent pas à son développement.

#### 4. Conclusion

L'action des brandons sur le comportement d'un feu de végétation est étudiée à l'aide d'un réseau de petit monde à sites pondérés. La distribution de la probabilité d'émission des brandons efficacement décroissante avec la distance aux sites en feu fait apparaître une longueur caractéristique qui s'ajoute aux autres longueurs caractéristiques que sont la longueur d'impact d'un site en feu et la taille du plus grand amas dans le cas de systèmes hétérogènes. La compétition entre ces différentes longueurs conduit à des effets d'échelle relatifs au système étudié.

Pour un système homogène, l'action des brandons est d'autant plus marquée que le paramètre d'impact est faible et que la distance caractéristique d'émission est grande, les sautes de feu ayant le temps de se développer avant que le front primaire ne les rattrape. Les effets d'échelle se manifestent par un effet balistique pour un système situé dans la zone d'influence du feu. Lorsque la taille du système est finie et très inférieure à  $D_0$ , la probabilité d'émission des brandons efficaces dans le système dépend de sa taille. A la limite thermodynamique, cette probabilité devient constante.

Pour un système hétérogène, l'hétérogénéité réduit l'action des brandons efficaces sur la propagation du feu. Un effet de saturation en systèmes complètement hétérogènes apparaît en cours de propagation lorsque la taille du plus grand amas qui s'est formé devient inférieure à  $D_0$ .

Cette étude a fait apparaître plusieurs longueurs et temps caractéristiques affectant les phénomènes de propagation et de sautes de feu. Une étude systématique de l'influence de ces paramètres sur le comportement du feu en milieux homogènes et hétérogènes est en cours.

## Remerciements

Les auteurs remercient M. le Professeur J. Villain pour avoir attiré leur attention sur l'existence d'un temps caractéristique d'intervention sur un feu en présence de brandons.

## Références

- [1] C.S. Tarifa, P.P. Del Notario, F.G. Moreno, Proc. Combustion Institute 10 (1965) 1021.
- [2] F.A. Albin, Combust. Flame 32 (1983) 277.
- [3] A. Muraszew, J.B. Fedele, W.C. Kuby, Combust. Flame 30 (1977) 321.
- [4] S.D. Tse, A.C. Fernandez-Pello, Fire Safety J. 30 (1998) 333.
- [5] J.P. Woycheese, P.J. Pagni, in: Int. Conf. Fire Research Eng., Boston, 1998.
- [6] W.W. Hargrove, R.H. Gardner, M.G. Turner, W.H. Romme, D.G. Despain, Ecological Modelling 135 (2000) 243.
- [7] P.G. de Gennes, La Recherche 7 (1976) 919.
- [8] D.J. Watts, S.H. Strogatz, Nature 393 (1998) 440.
- [9] D.J. Watts, Small Worlds, Princeton Univ. Press, Princeton, NJ, 1999.
- [10] B. Porterie, N. Zekri, J.P. Clerc, J.C. Loraud, C. R. Physique 6 (2005) 151.
- [11] S. Milgram, Psychology Today 2 (1967) 60.
- [12] N. Zekri, B. Porterie, J.P. Clerc, J.C. Loraud, Phys. Rev. E 71 (2005) 046121.
- [13] <http://www.ffp.csiro.au/nfm/fbm/vesta/spotfire.html>.
- [14] N. Sardoy, J.L. Consalvi, B. Porterie, J.C. Loraud, JITH 2005, Tanger (2005).
- [15] J.P. Clerc, G. Giraud, J.M. Luck, Adv. Phys. 39 (1990) 1063.
- [16] J.A.M.S. Duarte, in: D. Stauffer (Ed.), Annual Reviews Comput. Phys., World Scientific, Singapour, 1997, p. 1.
- [17] R.M. Anderson, R.M. May, Infectious Diseases of Humans, Dynamics and Control, Oxford Univ. Press, Oxford, UK, 1991.
- [18] <http://iusti.polytech.univ-mrs.fr/IUSTI/Equipes/Edr/edr.htm>.