

Transport et combustion de brandons dans un panache de fumée au-dessus d'un front de feu.

Nicolas SARDOY*, Jean-Louis CONSALVI, Ahmed KAISS, Bernard PORTERIE, Jean-Claude LORAUD

IUSTI-CNRS UMR 6595, Technopôle Château Gombert
5 rue Enrico Fermi, 13453 Marseille cedex 13, France

* (auteur correspondant : nicolas.sardoy@polytech.univ-mrs.fr)

Résumé – Ce travail présente un modèle traitant du transport et de la combustion de brandons dans un panache convectif au-dessus d'un feu en ligne soumis à un vent. Le panache est préalablement construit en résolvant les équations de conservation le long de sa trajectoire principale. Les trajectoires et la combustion de particules ayant la forme d'un disque, sont calculées pour différentes valeurs de vitesses de vent et d'intensités du feu. Pour chaque cas, 10000 brandons de tailles et densités différentes sont lancés depuis la base du panache. Il se dégage une double distribution de la densité de brandons au sol en fonction de la distance au front : i) une distribution « poissonienne » pour les particules entraînées jusqu'au sommet du panache et transportées par le vent sur de longues distances. On montre que ces brandons ne présentent pas un réel danger car ils arrivent au sol à l'état de braises, voire éteints, avec un potentiel énergétique insuffisant à l'allumage d'un feu secondaire; ii) une distribution exponentielle pour les particules les plus lourdes, qui sortent rapidement du panache et arrivent au sol enflammées (pour 99,9% d'entre elles). Une distance caractéristique de sautes peut-être extraite, et une loi sur cette distance est alors établie entre l'intensité du feu et la vitesse du vent : $d_0 \propto I \sqrt{U_{\text{vent}}}$.

Nomenclature

| | | | |
|-------------------|---------------------------------------|-----------------------------|---------------------------------------|
| b | demi-largeur du panache, m | v | vitesse, $m.s^{-1}$ |
| c_p | chaleur spécifique, $J.kg^{-1}K^{-1}$ | <i>Symboles grecs</i> | |
| d_0 | distance caractéristique, m | ρ | densité, $kg.m^{-3}$ |
| D | diamètre du brandon, m | τ | épaisseur du brandon, m |
| I | intensité du feu, $MW.m^{-1}$ | θ | angle d'inclinaison du panache, rad |
| s | abscisse curviligne | <i>Indices et exposants</i> | |
| tvol | temps de vol, s | 0 | valeur initiale des brandons |
| T | température, K | f | brandon |
| U_{vent} | vitesse du vent, $km.h^{-1}$ | g | phase gazeuse |
| V | volume du brandon, m^3 | i | source du panache |

1. Introduction

Plus de la moitié des feux de forêt présentent une ou plusieurs sautes de feu, consécutives à l'émission de débris végétaux enflammés ou incandescentes soulevés par le panache et entraînés par le vent loin du front de feu. Le phénomène de sautes de feu en avant d'un front de flammes est un mécanisme fréquent et redouté des opérationnels car il modifie leur stratégie de lutte contre l'incendie. Il est cependant mal connu de la communauté scientifique.

Depuis le milieu du XX^{ème} siècle, des travaux de recherche ont été entrepris, notamment sur la dégradation massique du brandon. Des modèles empiriques ont été élaborés sur des particules sphériques et cylindriques, comme celui bien connu d'Albini [1]. Fernandez-Pello a développé un modèle physique de combustion de brandons de formes géométriques variées

qui sont lancés dans un panache convectif de type Baum et McCaffrey, et un modèle aérodynamique pour ces particules [2].

L'objectif de cette étude porte sur le développement d'un modèle physique de transport et de combustion de brandons, émis dans le panache convectif d'un feu en ligne.

La modélisation bidimensionnelle du panache est basée sur une approche intégrale des équations de conservation de la mécanique des fluides.

Une fois ce calcul préliminaire réalisé, un modèle de combustion et de transport est utilisé pour suivre l'histoire des brandons depuis leur émission jusqu'à leur chute au sol ou leur disparition en vol.

2. Modèles physiques

2.1. Modélisation du panache convectif

Les équations de bilan de masse, de quantité de mouvement, et d'énergie sont établies pour chaque volume de contrôle le long de la trajectoire principale du panache (figure 1)

- Conservation de la masse

$$\frac{d}{ds} \left(2 \int_0^b \rho_g v_g dr \right) = \dot{m}_e \quad (1)$$

où le débit d'entraînement d'air \dot{m}_e est fonction de la vitesse d'entraînement v_e du panache par le vent.

- Conservation de la quantité de mouvement
 - le long de la trajectoire du centre du panache

$$\frac{d}{ds} \left(2 \int_0^b \rho_g v_g^2 dr \right) = \dot{m}_e U_a(y) \cos\theta - 2 \int_0^b (\rho_g - \rho_a) g \sin\theta dr \quad (2)$$

- à travers la largeur du panache

$$-2 \int_0^b \rho_g v_g^2 dr \frac{d\theta}{ds} = \dot{m}_e U_a(y) \sin\theta + 2 \int_0^b (\rho_g - \rho_a) g \cos\theta dr \quad (3)$$

- Conservation de l'énergie

$$\frac{d}{ds} \left(2 \int_0^b \rho_g v_g c_{p_g} T_g dr \right) = \dot{m}_e c_{p_a} T_a(y) \quad (4)$$

Compte tenu de certaines hypothèses:

- profil gaussien des grandeurs physiques (densité, température, vitesses) à travers la largeur du panache ;

- stratification en altitude de la température ambiante $T_a(y) = \alpha y + T_a$;

- profil du vent en loi puissance $U_a(y) = U_{vent} \left(\frac{y}{10} \right)^{1/7}$ (pour $y \leq 10m$) et $U_a(y) = U_{vent}$ sinon ;

Ces équations permettent, après intégration le long de l'abscisse curviligne, d'aboutir à un ensemble d'équations différentielles ordinaires couplées portant sur les valeurs moyennées des grandeurs physiques du panache.

De simples calculs nous permettent ensuite de revenir aux grandeurs physiques souhaitées en chaque point du panache, ainsi que la largeur et l'inclinaison du panache.

2.2. Modélisation du transport et combustion des brandons

Dans cette étude, la géométrie retenue pour les brandons est celle du disque. En effet, les disques conduisent à des distances de sautes plus grandes que les cylindres et les sphères [2].

2.2.1. Aérodynamique

Le transport aérodynamique des brandons sous la forme de disque est décrit par les équations classiques de conservation du mouvement de la particule

$$\rho_f V_f \frac{d\vec{v}_f}{dt} = V_f (\rho_f - \rho_g) \vec{g} + \vec{F}_D + \vec{F}_L \quad (5)$$

$$\frac{d}{dt} (\bar{I}_f \cdot \vec{\omega}_f) = (x_{cp} \vec{y}') \times (\vec{F}_D + \vec{F}_L) \quad (6)$$

\vec{F}_D, \vec{F}_L sont respectivement les forces de traînée et de portance. \bar{I}_f est le tenseur d'inertie tandis que x_{cp} est la distance entre les centres de forces aérodynamiques et de masse. Comme le modèle est bidimensionnel, l'axe de rotation est supposé perpendiculaire au plan (xy).

2.2.2. Thermique

Le modèle de dégradation thermique et de combustion hétérogène des brandons a été validé à l'aide de résultats expérimentaux [1], et utilisé dans un précédent travail [3]. On suppose que les processus de pyrolyse du bois sec et de combustion hétérogène des résidus charbonneux formés sont concomitants (figure 2) :

- La pyrolyse est une réaction endothermique intra-particulaire (la particule perd en densité) dont la cinétique peut être modélisée par une simple loi d'Arrhénius du premier ordre où les constantes thermocinétiques dépendent des propriétés du brandon. On suppose que les produits gazeux de pyrolyse sont : CO et CO₂. Durant ce processus, la température de surface est supposée constante et égale à 993K [2].
- Quant à l'oxydation du résidu charbonneux, c'est une réaction exothermique de surface (la particule perd en volume par la régression du diamètre). C'est un modèle cinétique à une étape qui est choisi, où les résidus charbonneux (carbone) s'oxydent pour donner uniquement du monoxyde de carbone. Ce processus est contrôlé par la diffusion de l'oxygène à la surface externe de la particule.

3. Résultats et discussion

La végétation considérée dans cette étude est une forêt de Pins Ponderosa dans laquelle se déclare un feu en ligne. Les dimensions du domaine de calcul sont de 10 kilomètres de long et de 1.5 kilomètres de haut.

La première étape consiste à construire numériquement les différents panaches de feu en faisant varier l'intensité du feu (20, 30 et 40 MW/m) et la vitesse du vent (25, 32, 40 et 48 km/h). Les intensités choisies, typiques des feux de cime méditerranéens, sont directement reliées à la largeur du panache au-dessus de la flamme, par la relation suivante

$$I = 2 \int_0^{b_i} C_{p_{g_i}} v_{g_i} \rho_{g_i} (T_{g_i} - T_a) dx \quad (\text{Tableau 1}).$$

| | |
|--------------------------------|---|
| Conditions ambiantes | $\rho_a = 1.1716 \text{ kg m}^3, T_a = 300\text{K}, \alpha = \frac{dT_a}{dy} = -0.0098$ |
| Conditions de la source | $v_{g_i} = 7 \text{ m s}^{-1}, T_{g_i} = 900 \text{ K}, \theta_i = 90^\circ,$ $b_i = 6.72 \text{ m}, 10.08 \text{ m et } 13.44 \text{ m (respectivement } I=20, 30 \text{ et } 40\text{MW/m)}$ |

Tableau 1 : conditions ambiantes et conditions de la source

Les brandons sont ensuite émis depuis la base du panache sans vitesse initiale.

3.1. Deux comportements distincts

La figure 3 montre les trajectoires de brandons émis depuis un feu d'intensité 30MW/m et soumis à un vent de 40 km/h. Elle illustre le comportement de brandons dont on a fait varier le diamètre (4, 6, 8 et 10 cm), la densité (100, 200 et 300 kg/m³) et l'épaisseur (1 et 2 mm). Ces 24 particules partent du sommet de la canopée, la position étant fixée aléatoirement.

En envoyant par la suite 10000 brandons et en faisant varier aléatoirement leur densité (50-500kgm⁻³), épaisseur (1-3mm), diamètre (4-10cm) et position dans la canopée, on confirme qu'il y a deux types de comportement.

Certains brandons tombent près du front de feu, alors que d'autres tombent loin en avant du front. La figure 4 montre la distribution bimodale de la densité de brandons au sol en fonction de la distance au front de feu pour cet échantillon de 10000 brandons.

Globalement, ce sont les particules avec des produits $\rho_f^0 \tau$ importants, qui tombent près du front de feu sans être réellement entraînées par les structures convectives du panache. Elles sont éjectées hors du panache rapidement et retombent sous l'effet de la traînée et de la portance, jusqu'à quelques centaines de mètres du front. Ces particules ont un intérêt particulier puisque 99.9% d'entre elles arrivent enflammées au sol avec une masse restante conséquente. Les résultats du modèle montrent que la pyrolyse a lieu dans un régime thermiquement fin, ce qui montre que la masse restante admet un comportement exponentiel en fonction du paramètre $t_{vol}/\rho_f^0 \tau$ où t_{vol} représente le temps caractéristique de pyrolyse [3].

Les particules les plus légères sont transportées par le panache et en sortent lorsque la température et les vitesses du gaz retrouvent celles de l'air ambiant. Les brandons perdent en altitude et tombent lentement tout en étant transportées par le vent grâce notamment à la force de portance. La distribution au sol de ces brandons peut s'étaler sur plusieurs kilomètres. Ces particules arrivent soit à l'état de braises avec une température inférieure à 500K, soit éteintes. Elles ont assurément un potentiel énergétique insuffisant pour être à l'origine de feux secondaires quelle que soit la végétation réceptive et ne présentent donc que très peu d'intérêt pour l'étude. Une analyse dimensionnelle de l'équation de conservation de la masse des résidus carbonneux permet d'extraire un temps caractéristique d'oxydation t_{vol} , proportionnel à $\rho_f^0 D_0^{5/3}$. Il en découle un comportement linéaire de la masse restante en fonction de $t_{vol}/(\rho_f^0 D_0^{5/3})$.

3.2. Evaluation de la distance caractéristique de sautes

Les brandons qui sortent assez rapidement dans les structures du panache présentent un fort potentiel énergétique et sont susceptibles de générer des feux secondaires.

La distribution de ces brandons efficaces au sol, normalisée par le nombre de brandons au sol, apparaît dans la figure 5 pour un feu d'intensité 30MW/m et un vent de 40 km/h. La distance de sautes maximale avoisine les 650m en avant du front et il apparaît qu'une fonction de densité de probabilité peut-être extraite et permet de fitter exponentiellement cette distribution (il a été mesuré dans des feux expérimentaux en taille réelle, Spotfire Project, CSIRO [4], que la densité décroît de façon exponentielle). La variance de cette fonction de densité de probabilité est par conséquent la distance caractéristique de saute. La loi exponentielle est de la forme $N/N_0 \propto e^{-d/d_0}$ où d_0 est bien entendu la distance caractéristique de sautes (figure 5).

A l'aide des résultats concernant les trois intensités de feu et les quatre vitesses de vent, on montre que cette distance caractéristique suit une loi de proportionnalité:

$$d_0 \propto I \sqrt{U_{\text{vent}}}$$

Cette relation relativement simple apparaît avoir un intérêt majeur, notamment dans les modèles probabilistes de propagation de feux.

4. Conclusion

Un modèle numérique a été développé dans le but de comprendre le transport et la combustion de brandons générés par un feu en ligne. Une étude paramétrique a été menée pour étudier la sensibilité des résultats à la vitesse du vent, à l'intensité du feu, et à certaines caractéristiques des brandons. Une étude statistique sur un large échantillon de particules a mis en évidence une double distribution de la densité des brandons au sol en fonction de la distance au front. Les brandons susceptibles d'allumer un feu secondaire sont ceux qui tombent près du front et leur distribution suit une loi exponentielle à partir de laquelle on peut dégager une distance caractéristique de sautes. Cette distance, qui constitue une donnée importante dans des modèles probabilistes de propagation de feux, est reliée simplement à la vitesse du vent, et l'intensité du feu.

Références

- [1] F.A. Albini, *Spot Fire Distance from Burning Trees – a Predictive Model*. USDA For. Serv. Gen. Tech. Rep. INT-56, 73p. Intermtn. For. and Range Exp. Stn., Ogden, Utah, 1979.
- [2] R.A. Anthenien, S.D. Tse, A.C. Fernandez-Pello, *On the trajectories of embers initially elevated or lofted by small scale ground fire plumes in high winds*, Fire Safety J. 41 (2006), 349-363.
- [3] N. Sardoy, J-L Consalvi, B. Porterie, A. Carlos Fernandez-Pello, *Modeling transport and combustion of firebrands from burning trees*, (2006, accepté à Combustion and Flame).
- [4] <http://www.ffp.csiro.au/nfm/fbm/vesta/spotfire.html>

5. Figures

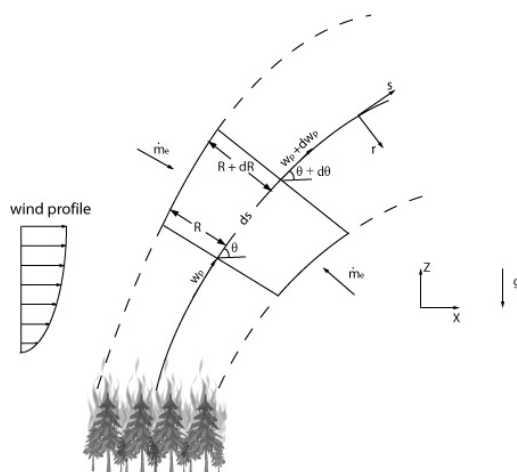


Figure 1 : Représentation schématique du panache et d'un volume de contrôle utilisé dans le modèle intégral

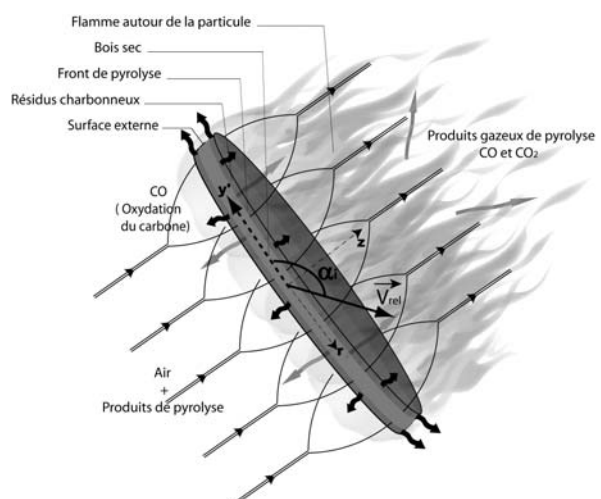
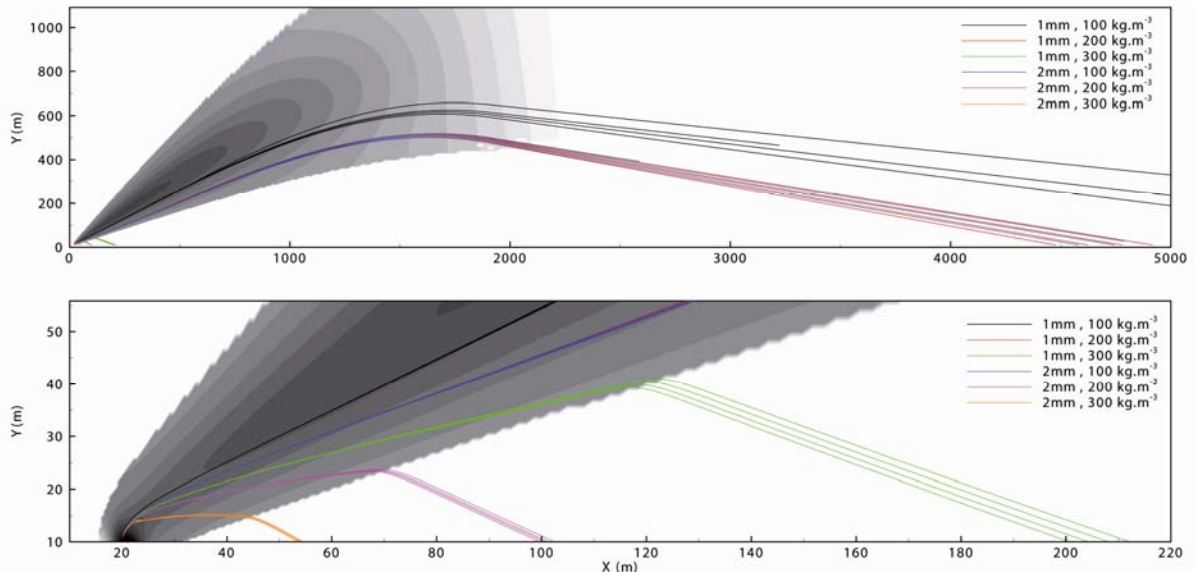


Figure 2 : Représentation schématique d'un brandon (disque) avec les deux processus concomitant de combustion



Figures 3a-3b : Trajectoires de brandons éjectés au sommet de la canopée, superposés aux champs de vitesses verticales du panache d'un feu d'intensité 30MW/m. La vitesse du vent est de 40km/h. La figure 3b représente une partie zoomée de la figure 3a près du front de feu.

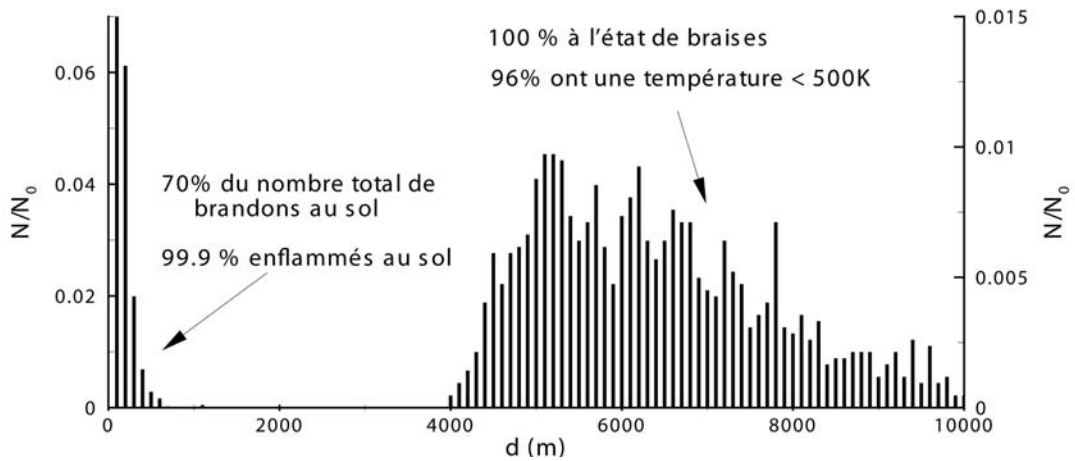


Figure 4 : Densité (adimensionnée) de brandons au sol en fonction de la distance au front. 10000 brandons sont générés aléatoirement en densité, épaisseur, diamètre et position dans la canopée (4600 tombent au sol). Le feu dont l'intensité est de 30MW/m, est soumis à un vent de 40km/h.

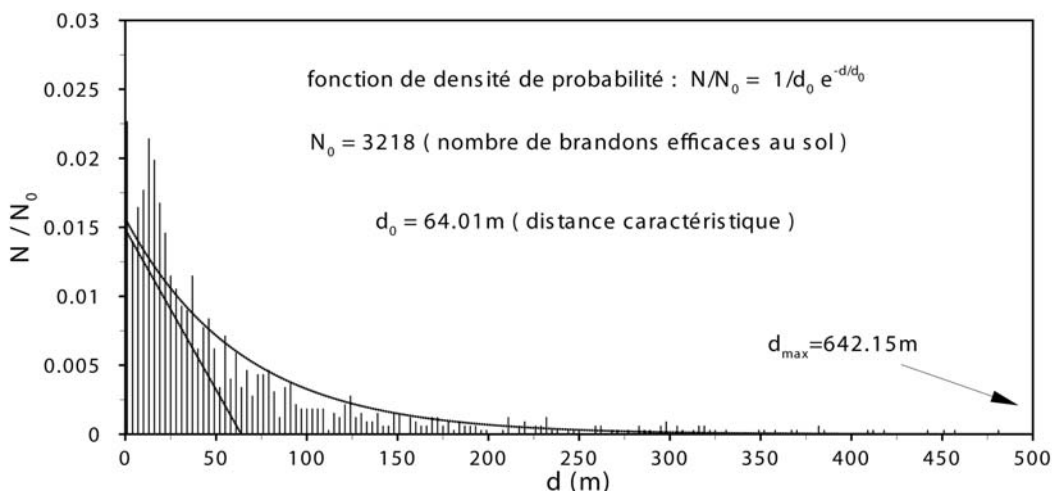


Figure 5 : Distribution du nombre de brandons enflammés en fonction de la distance au front de feu pour une intensité du feu de 30MW/m et une vitesse de vent de 40 km/h. La courbe exponentielle représente la fonction de densité de probabilité et la droite, la tangente à la courbe à l'origine.