

Simulation numérique du couplage surface/canopée lors de la propagation d'un feu de cime en forêt boréale

D. Morvan, G. Accary, S. Meradji, D. Fougere, F. Pimont, J.L. Dupuy,

Université de la Méditerranée UNIMECA
Technopôle de Château Gombert 60 rue Joliot Curie
13453 Marseille cedex 13 France

Université Saint-Esprit de Kalisk, BP 446 Jounieh, Lebanon

Laboratoire MSNM-GP UMR CNRS 6181
IMT La Jetée Technopôle de Château Gombert
38 rue Joliot Curie 13451 Marseille cedex 13

INRA Unité de Recherches Forestières Méditerranéennes
Equipe de Prévention des Incendies de Forêt
Site Agroparc, Domaine de Saint Paul 84914 Avignon cedex 9 France

Résumé :

Cette étude concerne la modélisation numérique de l'ignition et de la propagation d'un feu de cime dans une forêt de type boréale. La formulation mathématique est basée sur une approche multi-phasique, construite à partir des équations de conservation (masse, quantité de mouvement, énergie) gouvernant l'évolution du système couplé formé par la végétation et l'atmosphère ambiant. Le modèle a préalablement été testé à petite échelle, sur des feux de litière homogène et à plus grande échelle, sur des feux de prairie et en garrigue Méditerranéenne. Les résultats ont été comparés avec des données expérimentales de la littérature, et les prédictions des modèles empiriques opérationnels développés en Australie (MkV) et aux Etats Unis (BEHAVE).

Le modèle a été étendu à un profil de végétation composé d'une couche arbustive et d'une canopée. Les résultats mettent en évidence le rôle joué par le combustible de surface sur la dynamique générale du feu de cime. Les résultats numériques ont été confrontés aux données collectées à l'occasion de campagnes expérimentales internationales réalisées au Canada.

Abstract :

The subject of this study is the numerical modelling of the ignition and the propagation of a crown fire through a boreal forest. The mathematical formulation of this problem is based on a multiphase approach, constructed from the balance equations (mass, momentum, energy) governing the evolution of the coupled system formed by the vegetation and the surrounding atmosphere. The present model was tested at small scale for line fires propagating through homogeneous fuel beds and at larger scale for fires in grassland and shrubland. The numerical results were compared with experimental data of the literature and with predictions obtained using operational empirical models developed in Australia (MkV) and in USA (BEHAVE). The model was then extended to a vegetation composed with two strata, representing the shrub layer and the canopy present in a forest. The numerical results show the role played by the surface fuel upon the dynamic of the crown fire. The numerical results are compared with experimental data obtained during experimental campaigns carried out in Canada.

Mots-clefs :

Combustion, Modèle multiphasique, Feux de forêt

1 Introduction

La modélisation du comportement des feux de forêt est très certainement un problème d'une extrême complexité, il met en jeu des phénomènes fortement non-linéaires tels que les transferts turbulents dans les basses couches de l'atmosphère et au voisinage immédiat du front d'incendie (interaction écoulement/végétation, combustion en phase gazeuse), les transferts radiatifs entre la flamme et la végétation, la décomposition par séchage, pyrolyse et combustion hétérogène de la végétation. C'est pour ces raisons que les approches plus ou moins empiriques ont longtemps été privilégiées pour aborder ce problème, telles que celles développées en Australie par Mc Arthur (1977) et aux Etats Unis par Rothermel (1972). C'est à partir de ces travaux, qu'ont été développés les outils opérationnels utilisés aujourd'hui par les services forestiers et les services de lutttes. Ces outils proposent une évaluation de quelques caractéristiques simples d'un d'incendie en propagation libre, telles que la vitesse de propagation, la densité linéaire de puissance dégagée par le front d'incendie (intensité du front) et la hauteur de flamme. Malheureusement le domaine de validité des modèles empiriques est limité à la gamme des paramètres à partir desquels a été élaborée la relation statistique. Pour les modèles semi-empiriques (tels que BEHAVE), les prédictions sont souvent de qualité médiocre (Hanson *et al* 2000), la raison principale de ce manque de fiabilité résulte du fait qu'une grande partie de ces évaluations sont réalisées par extrapolation de feux réalisés à très petite échelle en soufflerie, dans des litières homogène composées d'aiguilles de pin ou de laine de bois (Anderson *et al* 1965). Ce constat a été à l'origine du développement de modèles plus physiques basés sur la simulation (totale ou partielle) des principaux phénomènes (turbulence atmosphérique, combustion, transferts thermiques entre la flamme et la végétation, dégradation de la végétation ...) présents au cours de la propagation d'un feu en milieu naturel (Clark *et al* 1996, Linn *et al* 2002). C'est dans ce contexte que nous avons développé un modèle physique de comportement des feux de forêt, basé sur une approche multi-phasique, élaborée à partir des équation de conservation (masse, quantité de mouvement, énergie, turbulence ...) gouvernant le système couplé formé par la végétation et l'atmosphère environnant (Morvan *et al* 2004). Ce modèle a fait l'objet d'une large confrontation avec des résultats expérimentaux obtenus pour des feux à petite échelle, réalisés en laboratoire dans des litières (Catchpole *et al* 1998). Les résultats de simulation ont également été comparés aux données collectées sur des feux de terrain réalisés en prairie (combustible homogène) et dans des strates arbustives de type garrigue ou maquis (Morvan *et al* 2006). Cette étude constitue une généralisation au cas d'une végétation multi-strate composée de deux couches de combustible (arbustive près du sol, surmontée d'une canopée), représentant la situation rencontrée dans une forêt de type boréale. L'objectif est d'étudier les conditions d'ignition et de propagation des feux de cime et de confronter les résultats de simulation avec les données collectées au cours des campagnes expérimentales internationales réalisées dans l'Ontario et dans les Territoires du Nord Ouest (Stocks 1987, Stocks *et al* 2004).

2 Modélisation physique

D'un point de vue très schématique le modèle physique est composé de deux blocs, l'un décrivant l'évolution de l'état de la végétation et l'autre regroupant les équations de conservation gouvernant l'atmosphère au voisinage immédiat du front d'incendie. Pour tenir compte du caractère fortement hétérogène des éléments combustibles (feuillage, rameaux, branches, tronc...) qui composent la végétation, celle ci est divisée en familles de particules classées par espèce végétale, taille, propriété (densité, teneur en eau...). En comparant expérimentalement, les temps de séjour d'un front d'incendie à travers différentes tailles de combustible, il a été démontré que seules les particules fines, dont la taille caractéristique (épaisseur) était inférieure ou égale approximativement à 6 mm, participaient effectivement à la

propagation d'un front d'incendie. L'état dans lequel se trouve la végétation est décrit à partir des bilans de masse des quatre éléments qui composent la matière combustible, c'est à dire la matière sèche (cellulose, hémicellulose), l'eau, le charbon de bois et la cendre. A ces équations s'ajoutent un bilan global en masse et en volume et un bilan d'énergie. Deux mécanismes de transfert d'énergie vont contribuer au développement et à la propagation du front d'incendie : le rayonnement émis par la flamme et les échanges convectifs avec les gaz chauds. L'importance relative de ces deux mécanismes dépend du rapport entre les deux forces qui gouvernent la trajectoire du panache au dessus du foyer : la force d'inertie due au vent qui pousse les gaz chauds vers la végétation et la force de flottaison qui contribue à l'ascension verticale des gaz chauds (Morvan *et al* 2004). Les équations en phase gazeuse sont résolues par une méthode de type VLES (« Very Large Eddy Simulation »), le modèle de sous-maille est basé sur une approche de type viscosité turbulente (RNG-K- ϵ), le calcul du mélange gazeux issu de la combustion des produits de pyrolyse est assuré par un modèle de type EDC (« Eddy Dissipation Concept ») (Magnussen 1981). Pour plus de détails, nous invitons le lecteur à consulter les articles mis en référence dans la bibliographie.

3 Résultats et discussion

Le modèle décrit précédemment a été appliqué à l'étude des feux de cime. Notre objectif était en particulier de comprendre le rôle joué par le combustible accumulé à la surface sur la dynamique globale du feu. Le combustible utilisé dans cette étude (Figure 1) est composé d'un assemblage de deux strates arborées (pin et épicéa) caractéristique des forêts rencontrées dans les régions boréales au Canada pour lesquelles nous disposons de données expérimentales (Stocks 1987, Stocks *et al* 2004). Les résultats reportés sur les Figure 2 et 3 montrent des vues instantanées du champ de température et des vecteurs vitesse en phase gazeuse ainsi qu'une image de la charge de combustible pendant le passage du feu pour des vitesses de vent (fixées à 10 m au dessus du sol sur terrain ouvert) égales à 5 et 10 m/s. Pour les conditions de vent les plus modérées (5 m/s) (Figure 2), on note que le feu ne parvient pas à passer complètement en cime, seule une partie de la canopée brûle de manière intermittente pendant la propagation de l'incendie (feu de cime passif). Pour un vent de 10 m/s (Figure 3), on note cette fois ci un embrasement généralisé de toute la strate combustible depuis le sol jusqu'au sommet de la canopée (feu de cime actif). A partir de l'évolution au cours du temps du point de température maximale dans la végétation, nous avons pu évaluer la trajectoire du front de combustion à partir de laquelle nous avons pu extraire une vitesse de propagation.

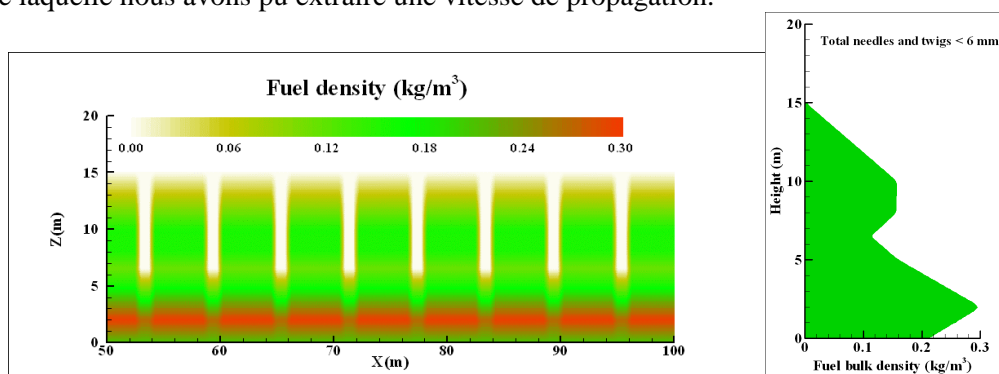


FIG. 1 – Distribution périodique de densité de combustible représentant une forêt boréale, répartition verticale de combustible au sein de la canopée.

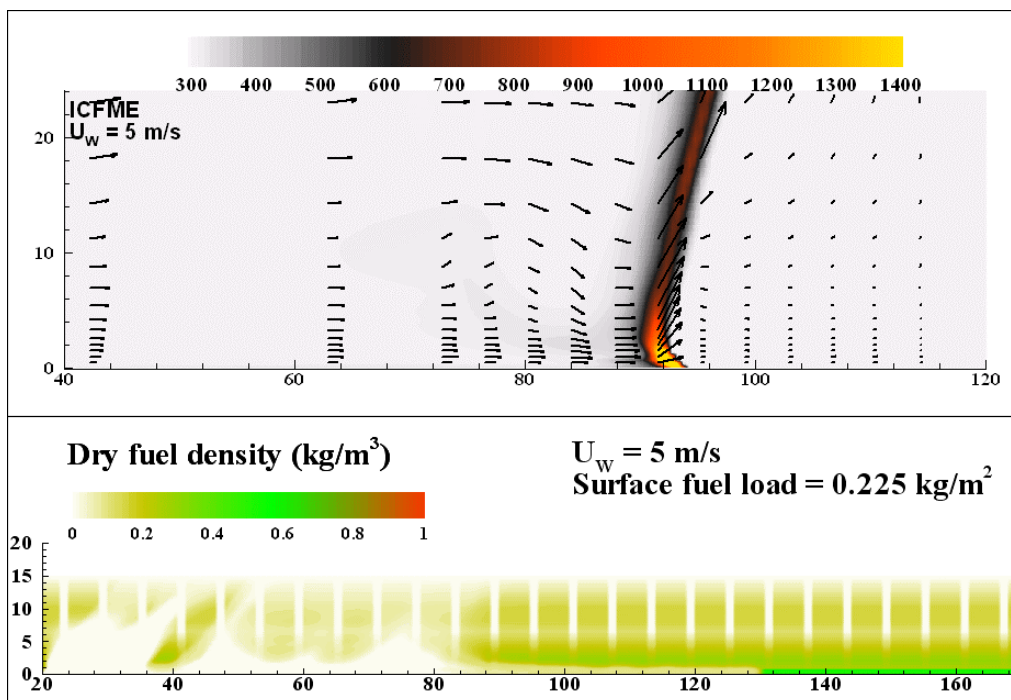


FIG. 2 – Champ de température, vecteurs vitesse (en haut) et distribution de densité de combustible (en bas) pour un vent moyen de 5 m/s.

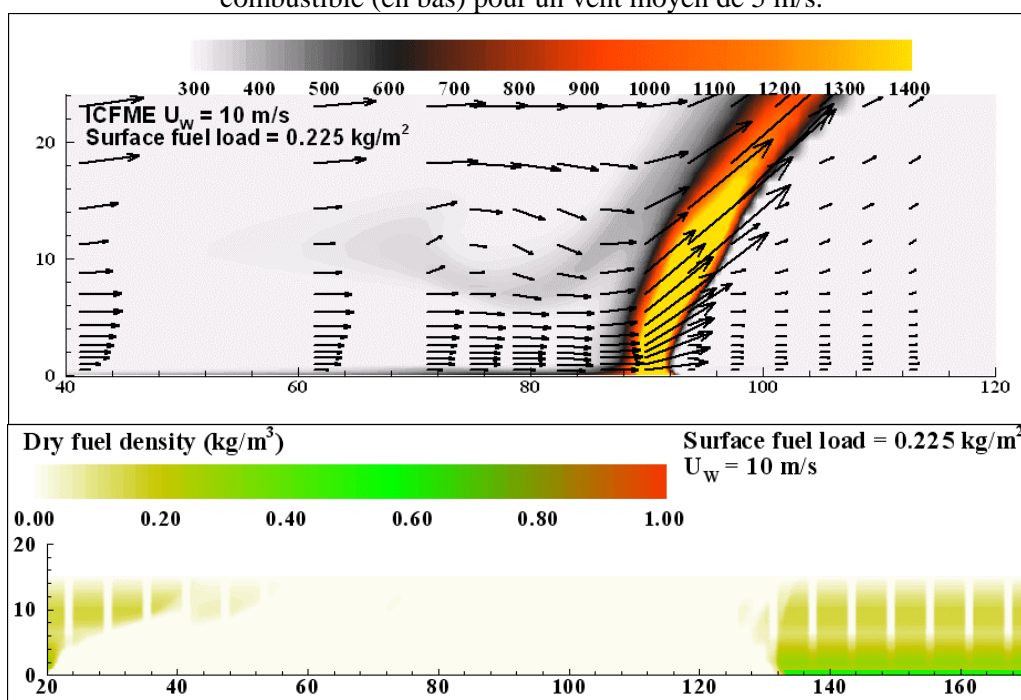


FIG. 3 – Champ de température, vecteurs vitesse (en haut) et distribution de densité de combustible (en bas) pour un vent moyen de 10 m/s.

La Figure 4 montre l'évolution de la vitesse de propagation du front d'incendie en fonction de la vitesse du vent. Nous avons confronté les résultats de simulations obtenus avec deux valeurs de la charge de combustible réparti au niveau du sol (strate arbustive) (0.225 kg/m² et 2.250 kg/m²

), avec des données collectées sur des feux expérimentaux réalisés au Canada (Stocks 1987, Stocks *et al* 2004). Ces résultats montrent l'influence très importante de la charge de combustible de surface sur la dynamique globale des feux de cime. En augmentant la charge de combustible au sol, on augmente globalement le temps de résidence du front d'incendie. La propagation du feu au niveau de la canopée ne peut pas se dérouler de manière découplée de celle du feu de surface. La propagation du feu en cime dépend complètement de l'inflammation de la base de la canopée induite par le feu de surface se propageant à travers la strate arbustive. Ces résultats sont confirmés par les observations de terrain qui indiquent que la propagation autonome d'un feu en cime ne peut se dérouler que dans des conditions exceptionnelles de vent, de continuité et de compacité du combustible en canopée. C'est à la suite de ce type d'observations, qu'ont pu être aménagées des coupures de combustibles arborées. Pour réduire l'impact d'un incendie sur un massif forestier, il n'est plus nécessaire de segmenter des parcelles par des bandes dénudées de toute végétation, il suffit d'aménager des zones débroussaillée au niveau du sol, dans lesquelles on aura réduit mais pas supprimée la strate arborée. Par vent modéré ($5 \text{ m/s} < U_w < 10 \text{ m/s}$), on relève une dépendance linéaire entre la vitesse de propagation et la vitesse du vent. Alors que pour des conditions de vent plus sévères ($U_w > 10 \text{ m/s}$) on remarque sur les résultats de simulation, un effet de saturation de l'influence du vent sur la vitesse de propagation. Le vent provoque d'abord l'extension verticale du feu depuis la surface jusqu'aux cimes, l'énergie dégagée par le front d'incendie augmente considérablement, ce qui contribue à accélérer sa propagation. Une fois le régime de feu de cime actif atteint, la colonne convective est suffisamment puissante pour aspirer l'air frais en amont, l'écoulement au voisinage du front est en grande partie régulé par ce mécanisme, la propagation de l'incendie devient moins sensible à une augmentation de la vitesse du vent.

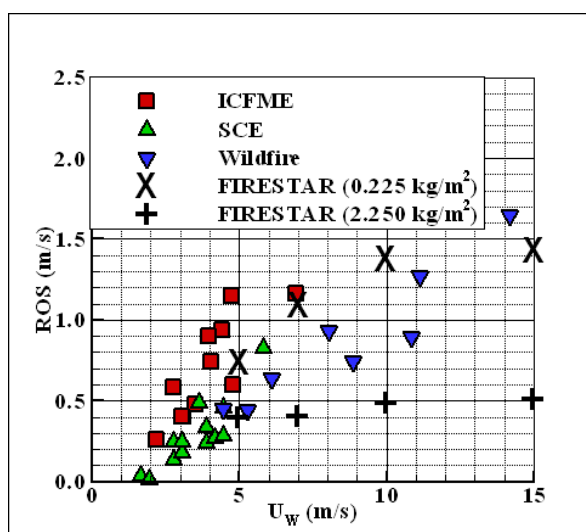


FIG. 4 – Vitesse de propagation d'un feu de cime en fonction de la vitesse du vent (résultats de simulation et données expérimentales).

4 Conclusions

Cette étude a permis d'illustrer l'intérêt que représentent les méthodes multi-phases pour l'étude et la compréhension du comportement des feux en milieu naturel. Dans le cas particulier des feux de cime, ces premiers résultats ont mis en évidence l'influence du vent et de la charge

de combustible au sol sur le comportement global du front d'incendie. Il faut toutefois admettre que l'approche 2D utilisée dans ces calculs constitue une limitation importante et qu'une grande partie des phénomènes physiques en jeu sont de nature tri-dimensionnelle. Cette extension au 3D est en cours de développement dans le cadre du programme européen FireParadox (6^e PCRD).

Références

- Mc Arthur, A.G. 1977, Grassland fire danger meter MkV CSIRO Division of Forest Annual Report 1976-1977 p.58
- Rothermel, R.C. 1972 A mathematical model for predicting fire spread in wildland fuels, USDA Forest Service Research Paper INT-115
- Hanson, H.P., Bradley, M.M., Bossert, J.E., Linn, R.R., Younker, L.W. 2000 The potential and promise of physics-based wildfire simulation. *Environment Science Policy* **3**, 161-172.
- Anderson, H.E., Rothermel, R.C. 1965, Influence of moisture and wind upon the characteristics of free-burning fires. *10th Symposium (International) on Combustion*. **10**, 1000-1019
- Clark, T.L., Jenkins, M.A., Coen, J., Packham, D. 1996, A coupled atmosphere-fire model: role of the convective Froude number and dynamic fingering at the fireline. *Int. J. Wildland Fire* **6**, 177-190
- Linn, R.R., Reisner, J., Colman, J.J., Winterkamp, J. 2002, Studying wildfire behavior using FIRETEC. *Int. J. Wildland Fire* **11(4)**, 233-246.
- Morvan, D., Dupuy, J.L. 2004 Modelling the propagation of a wildfire through a Mediterranean shrub using a multiphase formulation. *Combustion & Flame*. **138**, 199-200
- Catchpole, W.R., Catchpole, E.A., Butler, B.W., Rothermel, R.C., Morris, G.A., Latham, D.J. 1998, Rate of spread of free-burning fires in woody fuels in a wind tunnel. *Combust. Science Tech.* **131**, 1-37.
- Morvan, D., Dupuy, J.L., Rigolot, E., Valette, J.C. 2006, FIRESTAR: A physically based model to study wildfire behaviour. In Proceedings 5th International Conference on Forest Fire Research (ed. D.X. Viegas).
- Stocks, B.J. 1987 Fire behavior in immature jack pine. *Can. J. For. Res.* **17**, 80-86.
- Stocks, B.J., Alexander, M.E., Wotton, B.M., Stefner, C.N., Flannigan, M.D., Taylor, S.W., Lavoie, N., Mason, J.A., Hartley, G.R., Maffey, M.E., Dalrymple, G.N., Blake, T.W., Cruz, M.G., Lanoville, R.A. 2004 Crown fire behaviour in a northern jack pine-black spruce forest. *Can. J. For. Res.* **34**, 1548-1560.
- Magnussen, B.F. 1981 On the structure of turbulence and a generalized eddy dissipation concept for chemical reaction in turbulent flow. In Proceedings 19th AIAA.