

MODELE PHYSIQUE DE COMPORTEMENT DES FEUX EN MILIEU NATUREL : CONDITIONS DE TRANSITION ET DE PROPAGATION DES FEUX DE CIMES

D.Morvan¹, J.L. Dupuy²

1.Université de la Méditerranée, UNIMECA 60 rue Joliot Curie
Technopôle de Château Gombert, Marseille 13453 cedex 13 FRANCE
morvan@unimeca.univ-mrs.fr

2.INRA Unité de Recherches Forestières Méditerranéennes
Avenue Vivaldi 84000 Avignon FRANCE

RESUME

Les travaux présentés dans cette communication constituent une généralisation d'un modèle physique de comportement des feux en milieu naturel appliquée à l'étude de la propagation d'un feu à travers une strate de végétation composée de chêne kermès et de pins d'Alep. Ce modèle initialement développé pour des feux de litière en milieu homogène a été étendu pour l'étude des situations réelles caractérisées entre autre par une forte hétérogénéité de la végétation. Cette approche est basée sur une description détaillée des phénomènes physiques qui se développent aussi bien dans la phase gazeuse (turbulence, combustion ...) et dans les différentes phases solides à partir desquelles est décrite la végétation. La dégradation par déshydratation et par pyrolyse de la végétation est modélisée ainsi que les différents mécanismes de transfert (frottement, rayonnement, convection) entre le combustible et le mélange gazeux environnant. L'étude porte sur les conditions de transition entre un feu de surface se propageant à travers une garrigue Méditerranéenne, vers un feu de cimes. Le passage d'un feu depuis la végétation située au voisinage du sol jusqu'aux cimes des arbres, s'accompagne d'une augmentation très importante de la puissance calorifique dégagée par le front de flammes. Ce phénomène limite considérablement les possibilités d'intervention des pompiers engagés pour la lutte. Les conditions de transition verticale du feu constituent également un élément important pour tout ce qui concerne la réalisation d'aménagements (coupures de combustible) visant à sécuriser les zones à risque telles que les interfaces forêt/habitat, les bordures de voies de communication ... Les résultats présentés montrent la transition et la propagation d'un feu de cimes à travers une garrigue Méditerranéenne composée d'une strate arbustive (chêne kermès), d'une strate herbacée (Brachypode rameux) et d'une strate arborée (pin d'Alep). L'étude met également en évidence l'existence de deux régimes de propagation (actif et passif) pour les feux de cimes, en interaction plus ou moins étroite avec le feu de surface se propageant au niveau du sol.

Mots clés : Feu, Modèle de propagation, Ecoulement réactif et turbulent.

NOMMENCATURE

Teneur en eau de la végétation: t_{h2o}

Fraction massique d'eau, de matière sèche, de carbon de bois de la végétation: Y_{h2o} , Y_i , Y_{char}

Densité ($kg\ m^{-3}$), fraction volumique de la végétation : ρ_s , α_s

Température de la végétation (K) : T_s

Taux de production/destruction d'eau (évaporation), matière sèche (pyrolyse) et de charbon de bois (pyrolyse et oxydation de surface) ($kg\ m^{-3}\ s^{-1}$): M_{h2o} , M_i , M_{char}^{Pro} , M_{char}^{Oxy}

Rapport Surface/Volume des éléments composants la végétation (feuilles, branches...) (m^{-1}): σ_s

Fraction volumique et température des gaz (K): α_g , T

Luminance ($W\ m^{-2}$): J

1. INTRODUCTION

Les mécanismes physiques qui participent à la propagation d'un feu en milieu naturel, sont extrêmement complexes. Ils dépendent de phénomènes qui se déroulent au sein même du combustible (dégradation) et dans la phase gazeuse environnante (combustion, écoulement). Sous l'action de la chaleur dégagée par la zone en combustion, les différents éléments qui composent la végétation (feuilles, branches ...) vont se déshydrater et se décomposer en produits gazeux et en charbon de bois. Au contact de l'air ambiant la partie combustible des produits de pyrolyse (CO , CH_4 ...) va s'enflammer (combustion homogène), la présence de la zone enflammée

jouant le rôle de flamme pilote. En arrière du front de flamme le résidu charbonneux va également brûler en surface (combustion hétérogène), si cette combustion est complète il ne restera plus qu'un résidu minéral composé d'oxyde de silice. L'apport d'énergie au niveau de la végétation sera assuré de deux manières par rayonnement de la flamme et des braises, par échange convectif avec les gaz de combustion. L'importance relative de ces deux modes de transfert dépend de l'orientation de la colonne de gaz chaud qui se forme au dessus du foyer et de la flamme par rapport à la végétation située en aval du front de flamme [Pitts (1991)]. Sur terrain plat et en absence de vent les observations réalisées sur des feux de litière montrent qu'au cours de sa propagation le front de flamme est légèrement inclinée vers l'arrière. Cette dissymétrisation résulte de l'aspiration d'air frais en aval du front de combustion qui alimente la flamme en oxygène. Dans ce cas la seule source possible de chaleur qui va permettre au combustible de s'échauffer et au feu de se propager provient essentiellement du rayonnement des particules de suie localisées dans la flamme et des braises incandescentes situées au cœur du foyer. L'aspiration d'air frais au pied du front de flamme va contribuer à un refroidissement relatif de la végétation. Sous l'effet du vent ou sur un terrain en pente, la colonne de gaz chaud va être déviée et venir préchauffer le combustible en aval du front de combustion. Même si cette action a un effet positif sur le développement de la flamme, ce qui entraîne une augmentation des transferts radiatifs en direction de la végétation, la pénétration des gaz chauds au sein même de la strate combustible contribuent à une augmentation sensible des transferts convectifs. Ce mode de transfert d'énergie par convection peut alors devenir aussi important que celui par rayonnement, voire devenir dans certains cas dominant [Pitts (1991), Pagni & al (1973)]. Différentes études expérimentales réalisées sur des feux de litière ont montré que ~60% de l'énergie reçue par le combustible provient d'échanges convectifs avec les gaz chauds, le reste ~40% résulte des transferts radiatifs [Anderson (1969), Mc Carter & al (1965), Fang (1969)]. Les études réalisées en soufflerie dans des litières d'aiguilles de pin ou dans de la laine de bois (Excelsior) mettent en évidence l'existence de poches de gaz enflammé qui sont poussées par l'arrivée des gaz frais (vent) au pied du front de flamme et viennent préchauffer le combustible en aval [Rothermel & al (1966)].

D'autres études réalisées sur une plus grande diversité d'échelle, montrent qu'à partir d'une certaine charge de combustible (kg/m^2) le mode de propagation passe d'un régime convectif à un régime radiatif [Carrier & al (1991), Wolff & al (1991)]. Les mécanismes de propagation d'un feu dépendent donc des dimensions (hauteur, longueur) des flammes qui varient en fonction de la taille de la strate combustible [Pitts (1991)].

La plupart des modèles physiques de propagation des feux en milieu naturel sont basés sur l'hypothèse d'un mode de transfert d'énergie entre la flamme et le combustible dominé par les effets radiatifs [Albini (1985), De Mestre & al (1989)]. Par la suite une nouvelle approche prenant en compte l'interaction entre les flammes et l'écoulement généré par un vent incident et l'aspiration des gaz frais par le feu lui-même, a été proposée [Grishin (1997), Morvan & al (2000)]. Ce modèle est basé sur une formulation multiphasique des équations de conservation (masse, quantité de mouvement, énergie) du système physique couplé formé par la végétation et le milieu gazeux environnant. Aucune hypothèse particulière n'est émise concernant le mode de transfert d'énergie entre la flamme et la végétation, ces transferts sont directement calculés par résolution des équations de transport gouvernant l'écoulement turbulent et réactif en phase gazeuse, en interaction avec la végétation jouant ici un rôle équivalent à celui d'un lit fixe. Les résultats obtenus par cette approche pour la propagation d'un feu à travers une litière homogène d'aiguilles de pin ont pu être comparés avec succès à des données expérimentales obtenues dans les mêmes conditions en laboratoire [Morvan & al (2001)].

La généralisation de cette approche pour l'étude de la propagation d'un feu à travers une garrigue Méditerranéenne a permis de mettre en évidence l'existence de deux régimes de propagation en fonction de l'importance relative du vent, dominés successivement par les transferts radiatifs puis convectifs [Morvan & al (2002)]. Après un résumé succinct des principaux éléments constituant le modèle physique de propagation de feu, différents résultats illustrant les mécanismes de transition et de propagation d'un feu de cime à travers une strate continue de chêne kermès sous un couvert de pins d'Alep, seront présentés.

2. MODELE MULTIPHASIQUE DE COMPORTEMENT DU FEU

2.1. Modèle de dégradation de la végétation

Tous les éléments qui composent la végétation ne participent avec la même importance à la propagation du feu, différentes études ont permis de montrer que seuls les éléments les plus fins (feuilles, rameaux) dont le rapport Surface/Volume σ_s (inversement proportionnel à l'épaisseur des éléments combustibles) était supérieur ou égal à $\sim 660 \text{ m}^{-1}$ étaient caractérisés par un temps de résidence de flamme suffisamment court pour participer de manière active à la propagation d'un feu [Burrows (2001)]. Ce paramètre n'est pas le seul élément qui contrôle le comportement d'un feu, la charge et la répartition de combustible (densité ρ_s et fraction volumique α_s) et la teneur en eau (rapport Masse d'eau / Masse sèche \mathfrak{H}_{2O}) contribuent également de manière très active au comportement et à la dynamique du feu. A partir de ces éléments, la végétation est représentée comme un ensemble de familles de particules solides, en fonction des différentes espèces et éléments (feuilles, aiguilles,

rameaux) qui la compose. L'évolution de l'état dans lequel se trouve chaque famille de particules (k) est décrit à partir des fractions massiques d'eau ($Y_{H_2O}^{s,k}$), de matière sèche ($Y_i^{s,k}$), de charbon de bois ($Y_{char}^{s,k}$) et de cendre qui représentent les principaux constituants présents dans la matière végétale. L'évolution de l'état dans lequel se trouve chaque élément composant la végétation, soumis au flux de chaleur intense dégagé par le feu est décrit à partir du système différentiel suivant établi à partir des équations de conservation de la masse et de l'énergie, en supposant que les particules restent au repos et que la phase de déshydratation et de pyrolyse s'effectue à volume constant [Grishin (1997), Morvan & al (2001)] :

$$\frac{d\bar{r}_s^k Y_{H_2O}^{s,k}}{dt} = \dot{M}_{H_2O}^k$$

$$\frac{d\bar{r}_s^k Y_i^{s,k}}{dt} = \dot{M}_i^k$$

$$\frac{d\bar{r}_s^k Y_{char}^{s,k}}{dt} = \dot{M}_{char}^k = \dot{M}_{char}^{Pro,k} - \dot{M}_{char}^{Oxy,k}$$

$$\bar{r}_s^k C_p^s \frac{dT_{s,k}}{dt} = h_c^k a_s^k s_s^k (T - T_{s,k}) + \frac{a_s^k s_s^k}{4} (J - J_{s,k}) + \sum \dot{M}_a^k \Delta h_a^{s,k}$$

Les termes au second membre des deux premières équations représentent les pertes de masse subit par la végétation par déshydratation et pyrolyse, dans la troisième équation sont regroupés les contributions dues à la transformation par pyrolyse du bois sec en charbon de bois et sa combustion en surface. Le second membre de l'équation d'énergie regroupent pour les deux premières contributions, les échanges convectifs avec le mélange gazeux environnant ainsi que les transferts radiatifs. Ces derniers sont calculés à partir de la résolution de l'équation suivante, qui intègre les contributions dues au rayonnement du gaz et des suies, ainsi que celui provenant des particules incandescentes présents au niveau du foyer (braises).

$$\frac{da_g I}{ds} = a_g s_g \left(\frac{sT^4}{p} - I \right) + \sum_k \frac{a_s^k s_s^k}{4} \left(\frac{sT_{s,k}^4}{p} - I \right)$$

$$J = \int_0^{4p} Id\Omega$$

2.2. Ecoulement et transferts dans la phase gazeuse

L'écoulement dans la phase gazeuse est turbulent, son comportement moyen est filtré à partir d'un modèle statistique instationnaire, basé sur le concept de viscosité turbulente (modèle k-ε RNG) [Yakhot & al (1986)]. En supposant que le taux réaction de combustion en phase gazeuse est essentiellement limité par la vitesse avec laquelle le mélange turbulent réactif combustible+Oxydant est réalisé, la composition du gaz est calculée à partir du modèle de type « Eddy Dissipation Concept » (EDC) [Maggnussen & al (1976)]. Tous les détails du modèle en phase gazeuse sont reportés dans les articles suivants : [Morvan & al (2001), Morvan (2002)].

3. RESULTATS ET DISCUSSION

La propagation d'un feu à travers un couvert végétal composé d'une strate arbustive [de 0 à 1m au dessus du sol] (Chêne kermès + Brachypode rameux) et d'une strate arborée [de 2 à 8 m au dessus du sol] (Pin d'Alep) est simulée dans un domaine de 150m de long dans la direction de propagation sur 40m de haut. Sur terrain plat et pour une végétation homogène (horizontalement), le front de flamme conserve une forme quasi rectiligne, les transferts (quantité de mouvement, énergie) sont essentiellement localisés dans un plan défini par la direction de propagation et la direction verticale, les calculs peuvent alors être réalisés en 2D. La végétation est décrite à partir de cinq familles de particules solides (les feuilles et les rameaux fins de chêne kermès, le brachypode (herbe), les aiguilles et les rameaux fins de pins d'Alep), dont les propriétés principales sont données dans les tableaux suivants :

	<i>Quercus</i> (rameaux)	<i>Quercus</i> (feuilles)	<i>Brachypodium</i>
Surface/Volume (m ⁻¹)	4000	4000	10000
Teneur en eau (%)	20	70	5
Densité (kg/m ³)	700	700	400
Fraction Volumique (%)	0.1	0.15	0.1

	<i>Pinus Halepensis</i> (rameaux)	<i>Pinus Halepensis</i> (aiguilles)
Surface/Volume (m ⁻¹)	4000	4000
Teneur en eau (%)	20	70
Densité (kg/m ³)	700	700
Fraction Volumique (%)	0.1	0.15

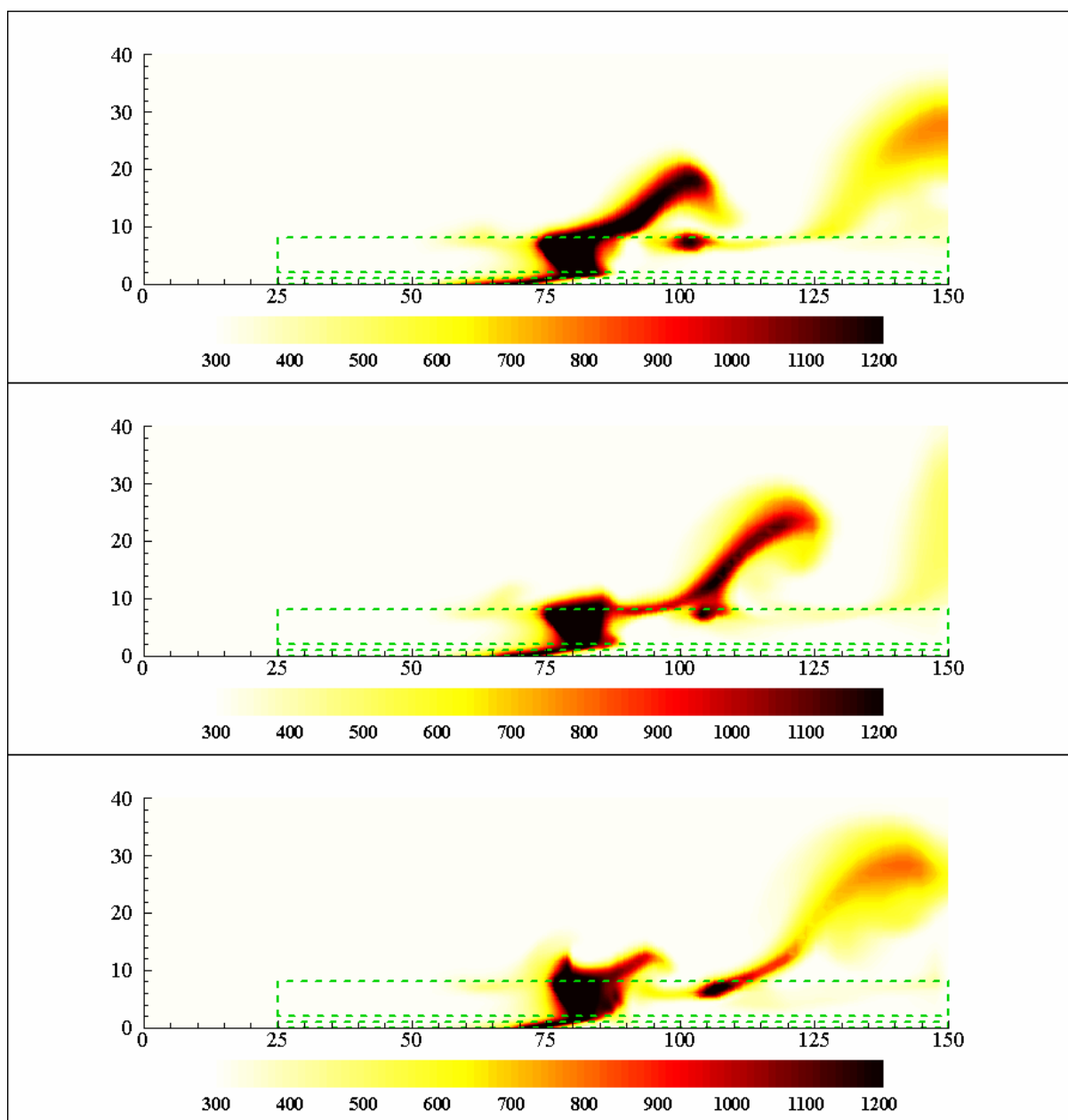


Figure 1: Champ de température calculé à différents instants au cours de la propagation d'un feu à travers du chêne kermès et des pins d'Alep, pour un vent $U_H=1$ m/s (l'intervalle de temps entre chaque image du haut vers le bas est de 5s).

Les résultats reportés sur la Figure 1 représentent une vue instantanée du champ de température dans la phase gazeuse calculés pour un vent moyen de 1 m/s évalué à 2m au dessus du sol. Ces résultats mettent en évidence deux mécanismes de propagation du feu dans ce type de végétation. On note tout d'abord une continuité de la zone enflammée entre la surface et les cimes, le feu de surface contribue de manière très active à la propagation du feu de cime en préchauffant le combustible à sa base. On relève également la formation de foyers secondaires qui se développent au niveau de la canopée, par recirculation des gaz chauds dans la végétation. L'écoulement au dessus de la strate arborée est en effet caractérisé par le développement d'une instabilité de type Kelvin-Helmholtz engendrée par le cisaillement de l'écoulement incident du vent par les arbres. Cette instabilité est renforcée par la montée des gaz chauds au dessus de la zone enflammée.

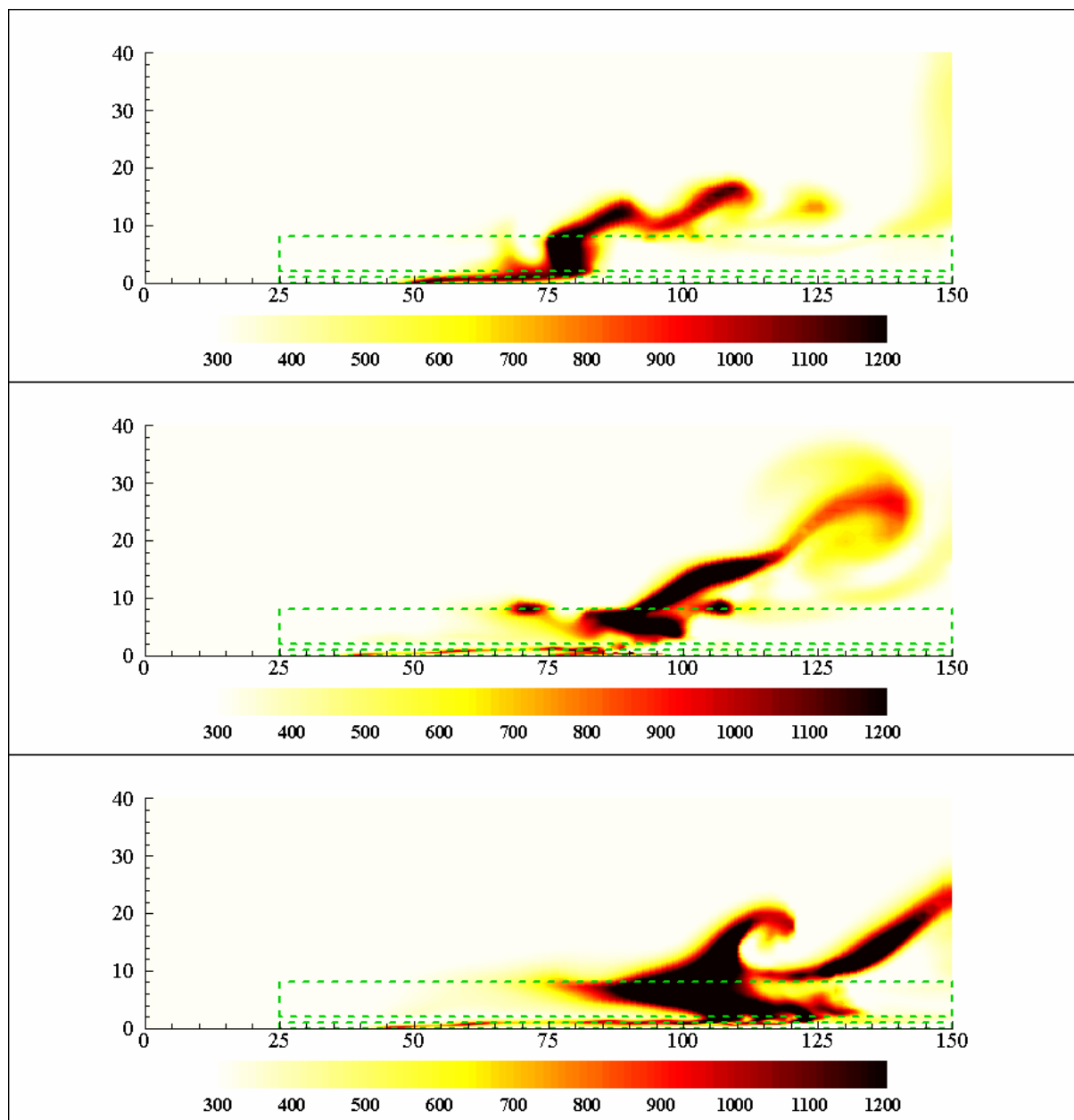


Figure 2: Champ de température calculé au cours de la propagation d'un feu de cime pour différentes conditions de vent ($U_H=3, 5, \text{ et } 10 \text{ m/s}$).

La Figure 2 représente l'influence du vent sur la dynamique d'un feu de cime, en augmentant l'intensité du vent le régime de propagation passe d'un régime de feu de cime passif, à un feu de cime actif voire indépendant, caractérisés par une interaction de moins en moins forte avec le feu de surface qui se propage de manière simultanée au niveau du sol. Pour caractériser de manière plus quantitative ces feux, nous pouvons évaluer la

hauteur moyenne de flamme à partir de l'énergie perdue sous forme de rayonnement (flamme visible), en se fixant un seuil arbitraire de l'ordre de 60 kW/m^3 . Cette approche nous semble plus justifiée qu'un simple critère en température dans la mesure où elle correspond de manière plus exacte au phénomène qui permet à une flamme d'être visible, c'est à dire les transferts radiatifs dus pour l'essentielle à la présence de particules de suie dans la flamme. Différentes études ont montrées que l'écoulement qui se développe au voisinage immédiat d'un front d'incendie dépend du rapport entre les effets d'inertie du vent incident et les effets thermoconvectifs dans la colonne de convection au dessus de la zone enflammée. Ce rapport peut être exprimé sous la forme d'un paramètre adimensionnel, le nombre de Froude $F_r = U_H^2 / (g H_f)$, dans lequel U_H désigne la vitesse du vent à une hauteur de 2m, g l'accélération de gravitation et H_f la hauteur moyenne des flammes (évaluée à partir de la mi-hauteur de la couche de combustible répartie au sol). La Figure 3 montre l'évolution du rapport ROS/U_H (ROS : vitesse de propagation) en fonction du nombre de Froude, les résultats obtenus dans une étude précédente sur des feux de surface sont également reportés [Morvan & al. (2002)]. Pour des valeurs modérées du nombre de Froude (vent faible et/ou flammes de grandes dimensions), la vitesse de propagation représente une fraction importante (autour de 20 % de la vitesse du vent), pour des valeurs plus élevées du nombre de Froude (vent fort et/ou flammes courtes) la vitesse de propagation tend vers une limite correspondant à 3% de la vitesse du vent, valeur déjà introduite dans un modèle empirique utilisé dans les départements du Sud-Est de la France (modèle de Valabre). L'évolution du rapport Hauteur de flamme / Hauteur de combustible en fonction du même nombre de Froude montre que pour les feux de cime, la hauteur de flamme représente 1.5 à 2.2 fois la hauteur totale sol-canopée (qui est ici de 8m).

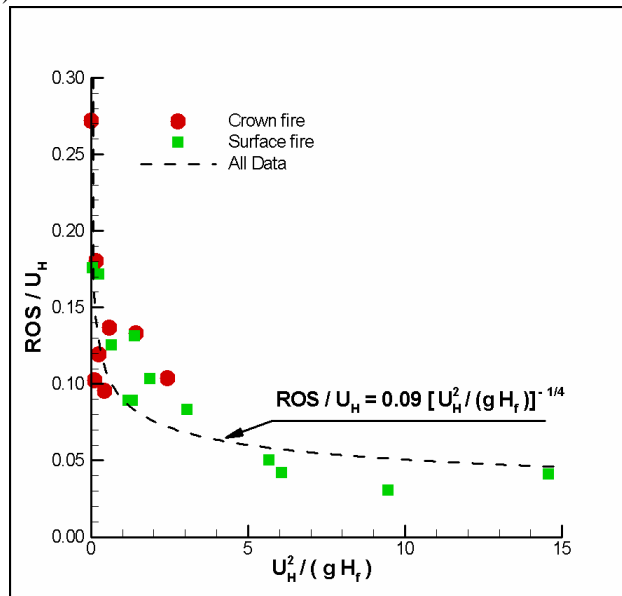


Figure 3 : Evolution du rapport Vitesse de propagation / Vitesse du vent (ROS/U_H) en fonction du nombre de Froude $F_r = U_H^2 / (g H_f)$ (Feux de surface [17] et feux de cime).

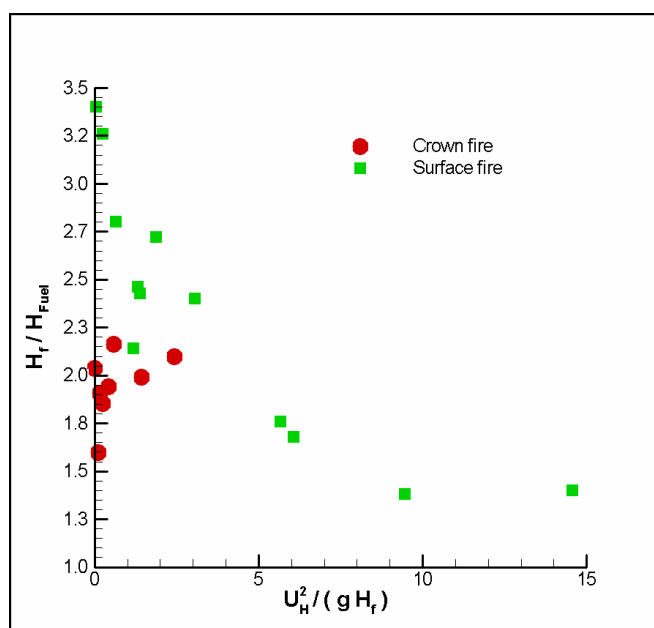


Figure 4 : Evolution du rapport Hauteur de flamme / Hauteur de combustible (H_f / H_{Fuel}) en fonction du nombre de Froude $F_r = U_H^2 / (g H_f)$ (Feux de surface [17] et feux de cime).

CONCLUSIONS

L'étude de la propagation d'un feu à travers un couvert végétal composé d'une strate arbustive (chêne kermès + brachypode rameux) et d'une strate arborée (pins d'Alep) a pu être réalisée à partir de la résolution des équations couplées de conservation du système formé par la végétation et le milieu gazeux environnant (formulation multiphasique). Les résultats des simulations ont permis de mettre en évidence l'existence de deux régimes de propagation actif et passif des feux de cimes, qui correspondent à un couplage plus ou moins important avec le feu de surface qui se propage en parallèle au niveau du sol. Deux mécanismes de propagation du feu ont pu être mis en évidence, par préchauffage de la végétation située à la base des arbres (action du feu de surface) et par recirculation des gaz chauds au sommet des arbres (action directe du feu de cime). Si les conditions de vent sont suffisantes, ce deuxième mode de transfert de chaleur peut conduire à un découplage entre le feu de surface et le feu de cime (feu de cime indépendant). Compte tenu de la nature très complexe des phénomènes présents, il est évident que l'ensemble des résultats mis en évidence au cours de ces simulations doivent être confrontés (au moins partiellement) à des données expérimentales collectées sur des feux de terrain, ces travaux sont en cours.

REFERENCES

- [1] Pitts W.M., "Wind effects on fires", Prog. Energy Combust. Sci., 17 (1991), pp.83-134
- [2] Pagni P.J., Peterson T.G., "Flame spread through porous fuels" In Proceedings 14th Symposium (International) on Combustion, 14 (1973), pp.1099-1107
- [3] Anderson H.E., "Heat Transfer and Fire spread", Res. Paper INT-69 U.S. Forest Service (1969)
- [4] Mc Carter R.J., Broido A., "Pyrodynamics", 2 (1965), p.65
- [5] Fang J.B., "An investigation of the effect of wind on the rate of fire spread", Ph.D Thesis University of New Brunswick (1969)
- [6] Rothermel R.C., Anderson H.E., "Fire spread characteristics determined in the laboratory", Res. Paper INT-30 U.S. Forest Service (1966)

- [7] Albini F.A., "A model for fire spread in wildland fuels by radiation", *Combust. Sci. & Technol.*, 42 (1985), pp.229-258
- [8] De Mestre N.J., Catchpole E.A., Anderson D.H., Rothermel R.C., "Uniform propagation of a planar fire front without wind", *Combust. Sci. & Technol.*, 65 (1989), pp.231-244
- [9] Grishin A.M., "A mathematical modelling of forest fires and new methods of fighting them", Publishing House of the Tomsk University, Tomsk, Russia, Ed. F. Albini (1997)
- [10] Morvan D., Dupuy J.L., Porterie B., Larini M., "Multiphase formulation applied to the modelling of the fire spread through a forest fuel bed", In Proceedings 28th Symposium (International) on Combustion, 28 (2000), pp.2803-2809
- [11] Morvan D., Dupuy J.L., "Modeling of fire spread through a forest fuel bed using a multiphase formulation", *Combust. & Flame*, 127 (2001), pp.1981-1994
- [12] Morvan D., Dupuy J.L., "Numerical simulation of the propagation of a surface fire through a Mediterranean shrub", In Proceedings 7th International Symposium on Fire Safety Science (2001) (In Press)
- [13] Burrows N.D., "Flame residence times and rates of weight loss of eucalypt forest particles", *Int. J. of Wildland Fire* 10 (2001), pp.137-143
- [14] Morvan D., Larini M., "Modeling of one dimensional fire spread in pine needles with opposing air flow", *Combust. Sci. & Technol.*, 164 (2001), pp.37-64
- [15] Maggnussen B.F., Hjertager H., "On mathematical modelling of turbulent combustion with special emphasis on soot formation and combustion", In Proceedings 16th Symposium (International) on Combustion, The Combustion Institute, Pittsburgh, 16 (1976), pp.719-729
- [16] Morvan D., "Wildfire propagation modeling using a high order finite volume method", In Proceedings 3rd Symposium on Finite Volumes for Complex Applications (2002), pp. 623-630, Ed. R. Herbin & D. Kröner.
- [17] Morvan D., Tauleigne V., Dupuy J.L., "Wind effects on wildfire propagation through a Mediterranean shrub", In Proceedings 4th International Conference on Forest Fire Research (2002), (CD Rom) Coimbra.