

# Comprendre le comportement du feu à l'échelle du paysage : une approche physique tri-dimensionnelle

par Jean-Luc DUPUY

## Introduction

Comprendre le comportement du feu peut passer par des approches théoriques, expérimentales ou de modélisation. La littérature scientifique enseigne que la propagation du feu et ses impacts résultent de mécanismes complexes même pris isolément, mais dont les actions sont en plus couplées : aérodynamique, transferts thermiques, dégradation thermique de la végétation (pyrolyse) et combustion. Si la théorie est bien établie pour ces mécanismes et fournit une connaissance qualitative pour chacun d'eux, leur combinaison, le caractère fortement hétérogène du combustible forestier et la nécessité de quantifier les phénomènes imposent le recours à l'expérimentation et à la modélisation. Les feux de forêt sont cependant difficiles à expérimenter en conditions naturelles. Les conditions météorologiques et d'humidité de la végétation connaissent des variations journalières, qu'il n'est pas facile de prévoir, la réalisation des mesures est compliquée, et les brûlages sont soumis à des contraintes légales et foncières. De ce fait, la modélisation est depuis longtemps un outil privilégié pour étudier les mécanismes des feux de forêt ou en prédire la propagation et les impacts.

Les modèles de propagation du feu appartiennent à deux grandes catégories, empirique ou physique (SULLIVAN 2009a,b). Les modèles empiriques sont établis sur la base de données expérimentales, souvent de terrain, parfois de laboratoire, et relient statistiquement quelques caractéristiques du feu, le plus souvent la vitesse de propagation, aux conditions environnementales (vent, pente) et au type de combustible. Par nature, la validité des prédictions de ces modèles est limitée aux conditions qui ont permis de les établir, gamme de vent, de pente et

type de végétation, et ils ne permettent pas d'examiner les mécanismes du feu. Les modèles physiques au contraire incorporent les mécanismes du feu. Cependant, jusque dans les années 90, ces modèles ignoraient les phénomènes aérodynamiques et simplifiaient à l'excès les processus de combustion, généralement résumés à la donnée des caractéristiques d'une flamme. C'est seulement depuis la fin des années 90, qu'une approche physique plus complète prend en compte explicitement la combustion et les effets aérodynamiques, qui résultent de l'interaction entre le vent ambiant, les vents induits par le feu, la végétation et la topographie. Cette approche nécessite la résolution des équations de conservation de la physique sur un maillage de l'espace et dans le temps. Le développement des capacités de calcul des ordinateurs est largement responsable de cette évolution. Les modèles issus de cette approche nouvelle sont rares (trois ou quatre dans le monde) et nous nous focaliserons ici sur le modèle HIGRAD-FIRETEC développé conjointement par le Los Alamos National Laboratory (Etats-Unis) et l'INRA d'Avignon (France) (LINN *et al.* 2005, PIMONT *et al.* 2010). Ce modèle permet en effet de réaliser des simulations numériques de propagation du feu (i) tri-dimensionnelles, (ii) dans des conditions naturelles et (iii) à l'échelle de petits paysages (< 2 km), fonctionnalités que les autres modèles de même nature ne possèdent pas encore toutes. La résolution spatiale du modèle est de l'ordre de 2 m.

A travers quelques exemples, nous montrerons en quoi le modèle aide à comprendre la propagation des feux de forêt et nous illustrerons ses potentialités en terme de prédictions opérationnelles.

**Photo 1 :**  
Feux expérimentaux dans une prairie australienne. Les trois feux ont été allumés au même instant, mais sur trois lignes de longueur différente.  
*Photo P. Cheney et A. Sullivan (Cheney *et al.* 1993).*



## Validations du modèle

La validation du modèle utilisé pour examiner ou prédire le comportement du feu est nécessaire si on souhaite tirer des conclusions réalistes à partir des simulations numériques. Plusieurs travaux de validation ont déjà été conduits sur le modèle HIGRAD-FIRETEC. Les trois feux expérimentaux visibles sur la photo 1 ont été allumés au même instant, mais sur des lignes de longueur différentes. Il apparaît très nettement que plus la ligne d'allumage est longue, plus le feu se propage vite. Le modèle a été capable de restituer cette observation (LINN *et al.* 2005). Les prédictions de vitesse de propagation du modèle ont aussi été comparées aux vitesses observées dans des conditions de végétation et environnementales variées. Le tableau I montre que les prédictions sont très raisonnables, on notera cependant qu'il s'agit de feux de strates basses (pas d'arbres). Une comparaison approfondie à des feux de cimes expérimentaux conduits au Canada est en cours. Les simulations de vent s'écoulant au sein d'une forêt ont également été validées avec succès sur la base de données précises (PIMONT *et al.* 2009). Cette validation est importante puisque le vent est un facteur essentiel du comportement du feu et a un comportement complexe au sein d'un couvert arboré. Le modèle a aussi été utilisé pour simuler des contre-feux expérimentaux réalisés en Galice (Espagne) et les conclusions qualitatives tirées des expériences et du modèle ont été similaires.

Il convient de souligner que la validation est le plus souvent un exercice très difficile, puisqu'il faut connaître finement toutes les conditions expérimentales et être capable de les représenter dans le modèle. Cet exercice peut conduire à modifier le modèle pour en améliorer les prédictions, ce qui implique alors de conduire de nouvelles validations.

## Importance de la tri-dimensionnalité

Certains modèles physiques ne représentent le feu qu'en deux dimensions d'espace, par exemple dans un plan vertical (coupe verticale d'une ligne de feu), ce qui a l'avantage de réduire le temps réel de calcul d'une simulation. La nécessité de prendre en

Type de combustible	Hauteur (m)	Charge de combustible (kg/m <sup>2</sup> )	FMC (1) (%)	Hauteur du feu (m)	Vitesse du vent (m/s)	Vitesse de propagation (m/s)	
						FIRETEC	Experiment
Garrigues France (2)	0.3	0.5	80	10	2.7 à 2 m	0.08	0.07
	0.4	0.8	140	10	5.6 à 6 m	0.10	0.07
	0.4	0.8	70	10	5.7 à 6 m	0.12	0.09
Garrigues Spain (3)	0.5	2.2	65	25	2.1 à 2 m	0.039	0.043
Prairies Australia (4)	0.7	0.7	5	50	3.0 à 2 m	0.7	0.7-0.8
	0.7	0.7	5	50	6.0 à 2 m	2.8	1.8-2.7

compte les trois dimensions d'espace apparaît par exemple dans une étude appliquée à l'utilisation du contre-feu. L'efficacité du contre-feu est souvent supposée accrue par l'appel d'air créé dans une zone située quelques dizaines de mètres ou plus en avant de l'incendie à traiter (ARÉVALO 1968, BENOIT DE COIGNAC 1986). Les simulations tri-dimensionnelles avec HIGRAD-FIRETEC ont révélé que l'existence de cet appel d'air est limitée dans de nombreuses situations à une distance de quelques mètres seulement. En fait, seules des situations topographiques particulières (feu descendant une pente) permettraient la création de cet appel d'air en avant du feu sur des distances significatives d'un point de vue opérationnel. Ces résultats concordent avec les observations réalisées au cours des contre-feux expérimentaux.

Pour mettre en évidence le rôle de la tri-dimensionnalité dans les phénomènes aérodynamiques associés au feu, la propagation de feux de surface dans des conditions variées de vent et de végétation a été simulée à la fois en deux et trois dimensions avec HIGRAD-FIRETEC. Les profils horizontaux de vent local, en avant du feu et à hauteur de végétation, ont été extraits de ces simulations et comparés dans les deux situations (Cf. Fig. 1). Il apparaît que le vent « sous le feu » est systématiquement sous-estimé par les calculs bi-dimensionnels et qu'un appel d'air à une distance significative du feu peut apparaître dans ces simulations. Dans un calcul tri-dimensionnel, le vent ambiant peut « traverser » le front de feu en certains points et être dévié vers le haut par la force du panache en des points voisins, alors que dans un calcul bi-dimensionnel, il ne peut que « passer » au-dessus des flammes ou « coucher » les flammes et le panache. De ces profils de vent, on peut déduire qu'un calcul bi-dimensionnel prédirait des conditions plus favorables à la réalisation du contre-feu, que le calcul tri-dimensionnel.

Enfin, si d'éventuels appels d'air peuvent s'établir localement et momentanément en avant du feu, ils sont instables d'un instant à l'autre ou d'un point à l'autre. Ceci rend d'autant plus aléatoire l'efficacité de l'appel d'air lors d'un contre-feu. La figure 2 illustre ce constat : le vent en aval du feu se structure en lignes parallèles de vitesses de vent alternativement faible et élevée, et on peut distinguer près du front de feu des appels d'air locaux coexistant avec au contraire des écoulements d'air dans le sens du vent

Tab. 1 :

Vitesses de propagation du feu, d'après Firetec et différentes expérimentations, pour des garrigues et prairies.

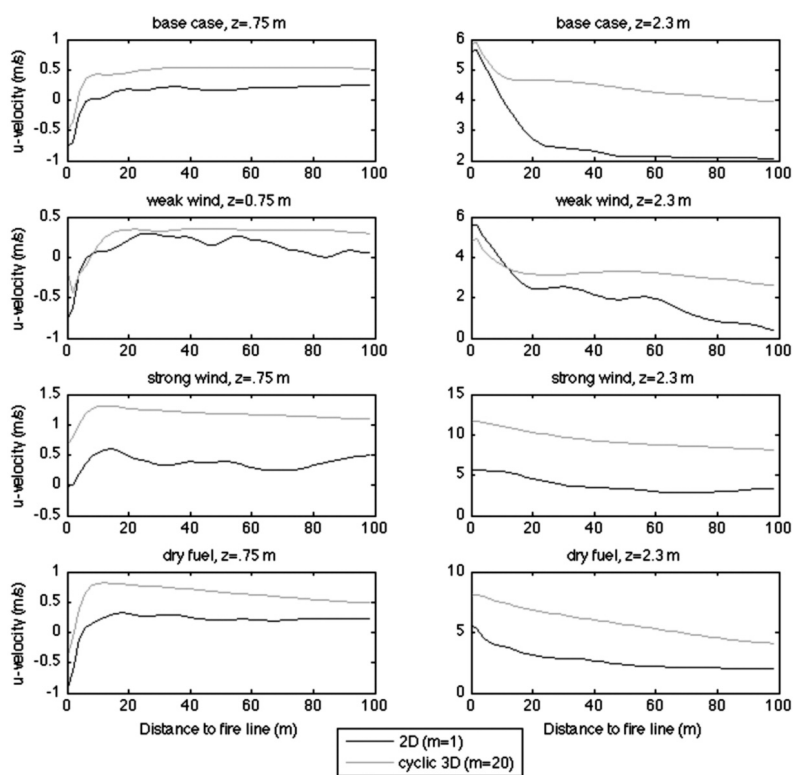
(1) FMC *Fuel moisture content* = Taux d'humidité du combustible

(2) données INRA, expérimentations de Beauchamp et Trou du Rat

(3) CIFL, sites de Edres et Carballas, Galice

(4) Cheney *et al.* 1993

Fig. 1 : Vitesse du vent « sous le feu » en fonction de la distance au front de feu, à 0.75 m du sol (gauche) et 2.3 m du sol (droite). En noir : simulations bi-dimensionnelles, en gris simulations tri-dimensionnelles. Dans le cas de base (en haut), la végétation est une garrigue de chêne kermès uniforme et le vent ambiant est modéré (20 km/h à 10 m de hauteur). Le vent faible (*weak wind*) correspond à un vent de 10 km/h et le vent fort (*strong wind*) à un vent de 40 km/h, dans la même végétation. Une végétation desséchée (*dry fuel*, en bas) a aussi été testée (elle pourrait représenter une friche en été).



ambient. Le résultat montré figure 2 a été obtenu avec une direction du vent ambiant supposée constante, ce qui explique l'organisation en lignes parallèles de l'écoulement. Un vent de direction variable conduirait à des structures plus complexes.

Ces conclusions ne remettent pas en cause le principe d'utiliser le contre-feu pour priver l'incendie de combustible. Elles indiquent qu'une ligne d'allumage du contre-feu proche du front de l'incendie ne garantit pas un effet bénéfique lié à un appel d'air, alors qu'elle conduit certainement à une prise de risque supérieure par rapport à un allumage à plus grande distance.

## Comportement et impacts du feu dans les peuplements arborés

La simulation de feux dans une végétation représentant un peuplement de pin d'Alep éclairci dans sa partie centrale a permis de quantifier les effets de l'éclaircie en fonction de son intensité et de sa structure (PIMONT *et al* 2010). Les niveaux d'intensité d'éclaircie ont été définis par des recouvrements d'arbres de 50%, 25% ou 0% après éclaircie (le peuplement non traité présentant un recouvrement de 75%). La structure de l'éclaircie (agrégation des arbres) a été testée dans le cas d'un recouvrement de 25%, à l'aide de patches d'arbres de 4, 10 ou 20 m de diamè-

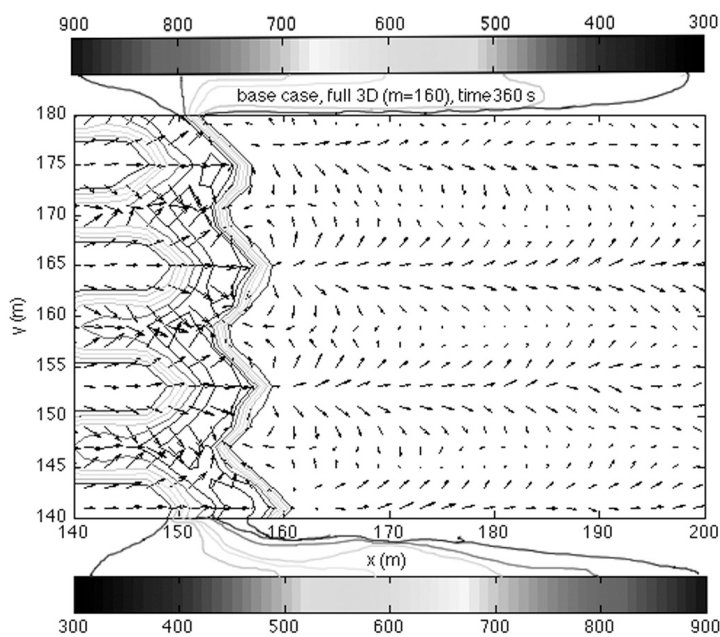
tre, ainsi que dans le cas théorique d'un couvert d'arbre homogénéisé sur toute la zone éclaircie. La strate arbustive basse est restée inchangée dans la zone éclaircie, cette zone pourrait donc correspondre à une coupure de combustible non entretenue.

La figure 3a montre une réduction nette de l'intensité du feu (puissance en kW/m) à partir de 25% de recouvrement d'arbres. Un recouvrement de 50% ne permet pas une réduction significative d'un point de vue opérationnel. Sans arbre (0%), l'intensité est comparable au cas de 25% de recouvrement : sans arbre, la biomasse totale est plus faible (cela fait diminuer l'intensité du feu), mais le vent au niveau de la strate arbustive est plus fort (cela augmente la vitesse du feu et donc son intensité). Le modèle prend en compte ces effets. La figure 3b montre que l'agrégation n'a pas d'effet sur l'intensité du feu. En fait, des simulations complémentaires ont montré un effet de l'agrégation des arbres sur l'intensité du feu pour des arbres présentant des houppiers de forte densité de feuillage, dépassant les valeurs connues pour les pins méditerranéens.

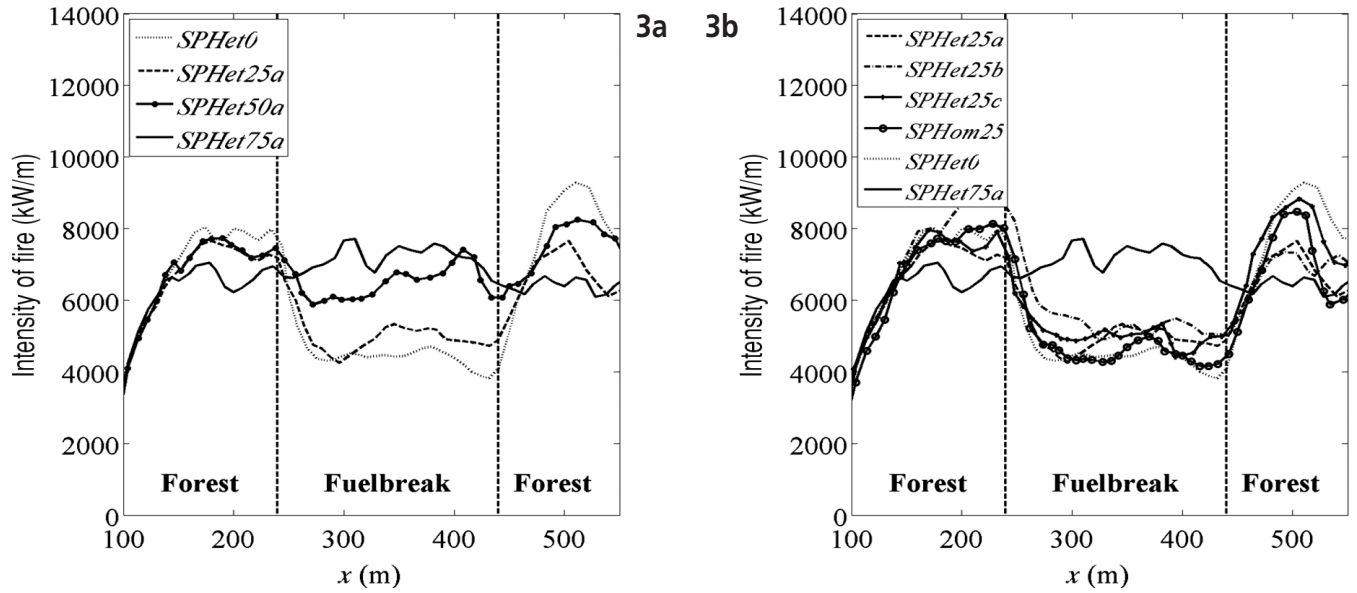
Une retombée inattendue de l'étude est l'identification de « couloirs » de couronnes d'arbres moins impactés par le feu (Cf. Fig. 4). Ces couloirs sont liés à la présence de tourbillons d'axe longitudinal parallèle au vent ambiant, qui causent un fort impact sur les arbres dans leur partie ascendante (montée des gaz chauds) et moins d'impact dans la partie descendante (descente d'air plus frais).

Lors de la simulation d'un feu de surface se propageant sous une canopée d'arbres, le modèle HIGRAD-FIRETEC prédit la température de l'air dans la canopée et permet notamment d'estimer la hauteur de roussissement foliaire des arbres sur la base d'un seuil de température létale. Ce seuil est généralement pris égal à une exposition des aiguilles de pin à une température de 60°C pendant une minute. Le roussissement foliaire est souvent un bon indicateur de la probabilité de mortalité des pins après feu (FERNANDES *et al* 2007). Les simulations d'une source de chaleur d'intensité fixée sous un peuplement de pin d'Alep ont montré que seules de très faibles intensités de feu (< 500kW/m) pourraient garantir une mortalité limitée des arbres. Ceci tient notamment à la faible hauteur de première branche feuillée du pin d'Alep. Ce résultat indique des fenêtres de brûlage dirigé assez res-

**Fig. 2 :**  
Vents locaux « sous le feu » vu de dessus. Le vent ambiant souffle de gauche à droite dans la direction x. Les isocontours de couleur représentent les isothermes du gaz (températures en Kelvins). Les vecteurs représentent la composante horizontale de la vitesse du vent local.







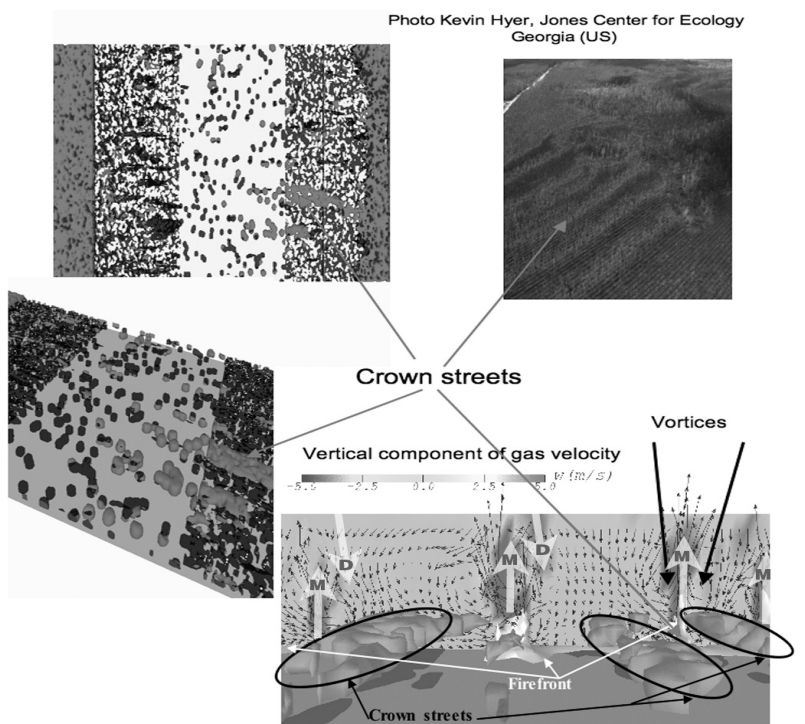
**Fig. 3 :** Intensité du feu (puissance en kW/m de longueur de front de feu) en fonction de la distance parcourue. Le feu progresse de gauche à droite depuis une forêt non éclaircie (*Forest*) vers la zone éclaircie, mais non débroussaillée (*FuelBreak*).  
 (a) la légende indique les pourcentages de recouvrement des arbres dans la zone éclaircie (75% pas d'éclaircie, 0%, pas d'arbre).  
 (b) la légende indique le niveau d'agrégation (a : 4 m, b : 10 m, c : 20 m, Hom : homogénéisé) et le cas sans éclairci (75a) est à nouveau montré.

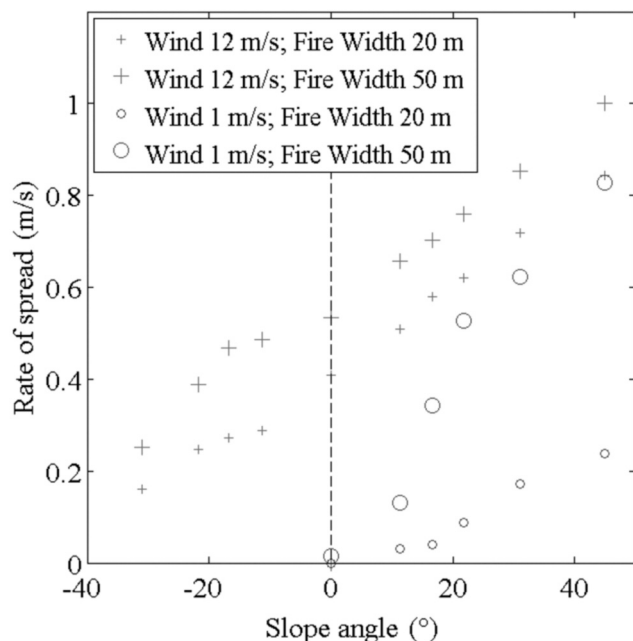
treintes. Ces simulations ont révélé un effet non significatif du vent ambiant (vent à découvert ou vent très au-dessus de la canopée) sur le roussissement foliaire, pour une intensité de feu fixée. Mais le roussissement foliaire s'accroît avec le vent, car l'intensité du feu de surface augmente avec le vent. Enfin, une densité de feuillage plus élevée induit des hauteurs de roussissement plus élevées (le feuillage étant réparti uniformément dans la direction horizontale i.e pas de trouées entre les arbres). Plus la végétation est dense, plus les mouvements d'air sont freinés, ce qui réduit le mélange d'air frais avec les gaz chauds de combustion. La température augmente alors à une même hauteur au-dessus du sol quand le feuillage est plus dense (effets observés pour des indices de surface foliaire variant de 2 à 6).

## Feu et topographie

Pour simuler la propagation d'un feu sur une carte, les simulateurs opérationnels existants doivent combiner les effets du vent local et de la pente locale dans les directions de propagation possibles. Cette combinaison est réalisée à l'aide de modèles empiriques relativement simples, considérant un effet soit additif soit multiplicatif des deux facteurs. Les simulations réalisées avec HIGRAD-FIRETEC remettent en cause cette approche. La figure 5 montre les vitesses de feu simulées en fonction de la pente du terrain pour un vent fort et un vent faible, et pour un feu étroit et un feu large (ligne d'allumage de 20 ou 50 m). Clairement, dans le cas général, les effets ne sont ni additifs ni

**Fig. 4 :** Dommages aux arbres et couloirs préservés par le feu (*crown streets*). Les images de gauche représentent les niveaux de densité de feuillage restant dans la canopée après feu (gris foncé : faible ; gris clair : élevé), calculés par HIGRAD-FIRETEC. La photo en haut à gauche a été prise aux Etats-unis illustrant que les couloirs peuvent avoir une géométrie simple. L'image en bas à droite représente la valeur algébrique de la composante verticale du vent local : les courants ascendants (M), les courants descendants (D). Les flèches représentent la composante du vent dans le plan vertical, ce qui permet de visualiser les tourbillons (*vortices*). Ces vents locaux sont aussi calculés par le modèle.





**Fig. 5 :**  
Vitesse du feu (*Rate of spread*) en fonction de l'angle d'inclinaison de la pente (*Slope angle*) pour deux niveaux de vent (*Wind*) et deux longueurs de ligne d'allumage (*Fire Width*).

multiplicatifs. D'autre part, ces effets dépendent fortement de la taille du feu, ce qui n'est pas pris en compte par les modèles existants.

En prolongement de cette étude, la simulation de feux démarrant dans un canyon, a permis de mettre en évidence l'embrasement très rapide des versants du canyon après une propagation relativement lente dans le fond du canyon. La ligne de feu en bas de pente peut alors atteindre une grande longueur qui favorise une propagation très rapide sur la pente. Ce comportement est à rapprocher d'accidents graves sur le terrain où un feu de faible intensité en fond de canyon peut laisser penser qu'une intervention est sans danger particulier.

L'ensemble de ces résultats s'explique par les interactions complexes entre vent, topographie et feu, qui contribuent à modifier l'aérodynamique de l'écoulement suivant les situations.

## Conclusion

Un modèle couplé feu-atmosphère tel que HIGRAD-FIRETEC est pour le scientifique un outil très puissant d'investigation des interactions complexes qui se déroulent lors d'un feu de forêt. Les moyens de calcul et l'expertise nécessaires pour utiliser ce type d'outil sont encore très importants et ne permettent pas d'envisager sa diffusion auprès

des gestionnaires ou des décideurs. Pour autant, la portée opérationnelle des simulations numériques est bien réelle et les chercheurs doivent donc se préoccuper de transférer les nouvelles connaissances apportées par ces simulations aux opérationnels. A terme, l'utilisation de modèles de ce type par des bureaux d'étude spécialisés pourrait permettre d'accélérer et d'améliorer ce transfert.

**J.-L.D.**

## Références bibliographiques

- Arévalo C. (1968) El contrafuego. Su utilización para cortar y extinguir los incendios forestales. *Montes*, 142, 307-323.
- Benoit de Coignac G. (1986) Le contre feu : est-ce la seule technique efficace d'extinction des grands incendies ? *Forêt méditerranéenne* 8(2), 167-172.
- Cheney N.P., Gould J.S. and Catchpole W.R. (1993) The influence of fuel, weather and fire shape variables on fire-spread in grasslands. *International Journal of Wildland Fire* 3,31-44.
- Fernandes, P., Vega, J.A., Jimenez, J., and Rigolot, E. (2007). Pine resistance and survival to fire: state of the art. FIRE PARADOX, an innovative approach of integrated wildland fire management regulating the wildfire problem by the wise use of fire: solving the Fire Paradox. Contrat FP6-018505, Commission of the European Communities, Brussels (BEL), Deliverable D3.2-1, 39 p.
- Linn R.R., and Cunningham P. (2005). Numerical simulations of grass fires using a coupled atmosphere-fire model: basic fire behavior and dependence on wind speed. *Journal of Geophysical Research* 110: D13107
- Pimont, F., Dupuy, J.-L., Linn, R.R. and Dupont S. (2009) Validation of FIRETEC wind-flows over a canopy and a fuel-break. *International Journal of Wildland Fire* 18, 775-790.
- Pimont, F., Dupuy, J.-L., Linn R.R., Dupont S. (2010) Impacts of canopy structure on wind-flows and fire propagation simulated with FIRETEC. *Annals of Forest Science*, à paraître.
- Sharples JJ (2008) Review of formal methodologies for wind-slope correction of wildfire rate of spread. *International Journal of Wildland Fire* 17, 179-193.
- Sullivan, A.L. 2009a. Wildland surface fire spread modelling, 1990-2007. 1: Physical and quasi-physical models. *International Journal of Wildland Fire* 18, 349-368

Jean-Luc DUPUY  
Institut National de la  
Recherche  
Agronomique (INRA)  
UR 629 Ecologie  
des Forêts  
Méditerranéennes  
Site Agroparc,  
84914 Avignon  
Cedex 9  
Email : dupuy@  
avignon.inra.fr