



**HAL**  
open science

## Comportement du feu : la modélisation de la propagation

Jean-Luc Dupuy, Dominique Morvan

► **To cite this version:**

Jean-Luc Dupuy, Dominique Morvan. Comportement du feu : la modélisation de la propagation. Rendez-vous Techniques de l'ONF, 2004, 4, pp.30-35. hal-02669644

**HAL Id: hal-02669644**

**<https://hal.inrae.fr/hal-02669644v1>**

Submitted on 11 Jul 2024

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

## Comportement du feu : la modélisation de la propagation

La modélisation des incendies de forêt est restée longtemps fondée sur l'empirisme. Les modèles simples issus de cette approche ont répondu à certaines questions des pompiers ou des forestiers et demeurent utiles. Depuis quelques années, une modélisation physique de plus en plus complète du phénomène s'est développée, en même temps que la puissance des ordinateurs a augmenté. Elle produit aujourd'hui des simulations numériques permettant de visualiser le comportement d'un feu de forêt et, par exemple, de tester différents traitements préventifs de la végétation pratiqués sur les coupures de combustible.

Un volet important de la politique de prévention des incendies de forêt est l'aménagement et l'entretien des espaces naturels et forestiers. En effet, les mesures préventives qui visent à limiter la puissance des incendies reposent sur la réduction de la biomasse végétale, en particulier celle des strates arbustives, sur les coupures de combustible (voir encadré). Les surfaces concernées par ces mesures sont croissantes à cause du développement important de l'interface forêt-habitat dans les pays du Sud de l'Europe.

### La modélisation : répondre à des questions scientifiques et opérationnelles

Les coupures de combustible ne sont pas destinées à arrêter le feu de manière passive, même si l'arrêt passif du feu sur ces coupures a déjà été observé, mais elles sont destinées à accueillir les forces de lutte dans des conditions de sécurité suffisantes. Les pompiers et les gestionnaires de la forêt méditerranéenne ont donc besoin d'outils pour évaluer l'efficacité de ces ouvrages. Ces outils doivent permettre de répondre à des questions telles que :

■ À partir de quel niveau d'embroussaillage faut-il intervenir sur les strates arbustives ?

■ Peut-on laisser des îlots de végétation arbustive ?

■ Faut-il enlever des arbres et combien ?

■ Quelle largeur la coupure doit-elle avoir ?

Si ces questions visent essentiellement la conception et l'entretien des coupures de combustible, une demande d'une autre nature concerne « l'auto-protection » des peuplements : intervenir plus légèrement sur de grandes surfaces (réduction de biomasse arbustive par des brûlages dirigés) avec l'objectif qu'un incendie ne détruise qu'une proportion acceptable des arbres.

Ces questions, posées tant par les pompiers que par les forestiers, peuvent être reformulées dans un contexte scientifique.

■ Quelles seront la vitesse du feu, la puissance du feu, ou encore la hauteur des flammes ?

■ Quelles strates de végétation vont effectivement brûler ?

Ces caractéristiques moyennes du feu, qui en décrivent le comportement, sont des indicateurs utiles pour évaluer la difficulté à lutter et donc l'efficacité d'un aménagement. Si on souhaite être plus précis, on cherchera à répondre à des questions du type :

■ Quelle quantité de chaleur sera

### Les coupures de combustible

Une coupure de combustible est un ouvrage sur lequel la végétation a été traitée pour réduire la puissance d'un feu abordant puis parcourant cet ouvrage. On distingue les grandes coupures stratégiques situées en plein massif, dont l'objectif est la limitation des surfaces parcourues par les grands incendies, des bandes débroussaillées de sécurité situées en bordure des voies de circulation ou encore des zones de protection situées à l'interface forêt-habitat, dont l'objectif est de réduire les effets du passage de grands feux sur les enjeux qu'elle protège (routes, lignes électriques, voies ferrées, maisons et leurs habitants, campings...). De la végétation demeure présente sur les coupures de combustible, y compris des arbres : une coupure de combustible n'est pas un pare-feu. Le but d'une coupure de combustible n'est pas d'arrêter le feu de manière passive, mais de permettre aux pompiers de lutter contre un feu de puissance réduite et présentant un danger plus faible que l'incendie se propageant hors de la coupure.

reçue par une personne, ou encore par une maison, à une distance donnée du foyer ?

■ Quel danger représenteront les fumées à cette même distance ?

Il ne s'agit plus seulement de fournir des indicateurs moyens, mais des abaques ou des cartes dont l'interprétation permettra par exemple d'estimer une distance de sécurité. Les modèles de propagation du feu ont pour finalité de répondre à au moins certaines de ces questions.

### Les modèles empiriques : une première réponse opérationnelle

Les modèles de propagation peuvent être classés en deux grandes catégories : les modèles empiriques et les modèles physiques. Les modèles empiriques sont la synthèse statistique d'observations de feux expérimentaux de laboratoire ou de terrain, ou encore d'incendies. Ils relient des variables décrivant le comportement du feu, essentiellement sa vitesse de propagation, aux variables décrivant les conditions de cette propagation : la pente du terrain, le vent ambiant et certaines caractéristiques de la végétation. Ces relations sont établies statistiquement sur les feux observés.

#### Des modèles utilisés dans le monde entier

Le modèle empirique le plus simple est sans doute « la règle des 3 % », connue des pompiers du Sud de la France, qui stipule que la vitesse du feu est égale à 3 % de la vitesse du vent. Cette règle résulte en fait de l'observation de la propagation d'incendies dans les garrigues à chêne kermès des Bouches-du-Rhône, par temps de mistral.

Les modèles empiriques sont aussi les outils utilisés en Australie et au Canada pour prédire l'avancée du feu sur des territoires de dimensions bien plus grandes que les nôtres. La végétation est classée en types, et pour un type de végétation, une loi simple donne la vitesse du feu en fonction de la vitesse du vent et éventuellement d'un petit nombre de paramètres permettant de mieux caractériser la structure de la végétation et sa teneur en eau. Au Canada, les services forestiers ont réalisé

une classification systématique de la végétation, et ont conduit des expérimentations en forêt pour compléter les observations d'incendies. Ils ont réuni les lois donnant la vitesse de propagation dans chaque type au sein d'un système de prédiction opérationnel. Aux États-Unis, les services forestiers (USDA Forest Service) ont, dans les années 70, élaboré un modèle sur la base de quelques principes physiques et surtout d'une série de feux expérimentaux conduits dans un laboratoire spécialisé (« tunnel du feu » de Missoula, Montana). Ce modèle empirique est employé dans le système de prédiction opérationnel Behave.

#### Une grande simplicité d'utilisation

Les principaux atouts des modèles empiriques sont leur simplicité d'utilisation et leurs temps de calculs insignifiants qui en font des modèles opérationnels dès lors que la végétation a été décrite et classée en types. Leurs prédictions sont en revanche limitées, puisqu'ils fournissent seulement une valeur de la vitesse de propagation pour des types de végétation pré-définis. Leur domaine de validité est assez restreint, puisqu'il dépend du jeu de données expérimentales utilisé pour les élaborer. En particulier, ces modèles supposent toujours une végétation « suffisamment » continue et homogène, alors que les traitements préventifs de la végétation visent à créer des discontinuités dans une végétation déjà le plus souvent hétérogène.

#### Des réponses insuffisantes dans le cadre de l'aménagement préventif

Les modèles empiriques, par nature, répondent donc mal aux questions posées par l'aménagement préventif pratiqué en France. Dans les pays où les modèles empiriques ont été développés, Australie, Canada et États-Unis, les mesures de prévention passant par des aménagements tels que les coupures de combustible sont peu développées. La prévention s'appuie davantage sur l'utilisation du brûlage dirigé comme outil d'entretien à grande échelle des espaces naturels. Après les incendies catastrophes récents de Sydney et Canberra, en Australie, après les feux de

Californie, avec la multiplication des incendies en zone péri-urbaine dans les états de plus en plus peuplés du Sud-Est des États-Unis, les questions soulevées par l'aménagement préventif des interfaces forêt-habitat semblent cependant émerger dans ces pays.

### La modélisation physique : une prise en compte complète des mécanismes de base du feu

La modélisation physique de la propagation des feux de forêt repose sur la compréhension des mécanismes physiques et chimiques qui régissent le phénomène et leur quantification. Ce type de modélisation s'est longtemps heurté à la multiplicité des mécanismes en jeu, à la complexité de certains d'entre eux et en définitive au fait que cette approche nécessite de réaliser des calculs très lourds. C'est pourquoi les nombreux modèles physiques qui ont été construits jusque dans les années 90, simplifiaient radicalement la description physique du feu. Le plus souvent sans grand intérêt pour des applications, ils étaient utiles aux chercheurs pour essayer de mieux comprendre certains aspects du phénomène. Un autre frein au développement de la modélisation physique des feux de forêt est dû à l'originalité du milieu physique qu'est la végétation (voir encadré). Dans d'autres domaines de la combustion (combustion des moteurs, feux de nappes, incendies de bâtiment), le combustible est plus simple et mieux connu.

L'accroissement de la puissance des ordinateurs permet, aujourd'hui, une modélisation physique complète du phénomène. Le qualificatif « complet » fait référence au fait que tous les mécanismes de base du feu sont pris en compte (voir encadré), mais il ne préjuge pas de la qualité finale du modèle. Ces mécanismes de base n'agissent pas au hasard et indépendamment les uns des autres. Ils agissent de manière couplée, avec la contrainte de respecter les principes de conservation de la physique (conservation de la masse, de l'énergie et des quantités de mouvement). La formulation mathématique de ces principes aboutit à des équations qui n'ont

### La végétation vue comme combustible

D'un point de vue physique, la végétation est un ensemble de particules solides macroscopiques (feuilles, aiguilles, segments de rameaux), réparties dans l'air ambiant. Ces particules peuvent être classées au sein de familles présentant des propriétés physiques et chimiques similaires (forme et dimensions de la particule, densité du matériau, teneur en eau...), donc un comportement au feu similaire. La taille caractéristique de la particule permet en particulier d'estimer la surface qu'elle expose à l'air ambiant par unité de son volume. Plus une particule est d'épaisseur ou de diamètre faible, plus cette surface exposée par unité de volume de matière est élevée. Ce paramètre, appelé rapport surface-volume de la particule, est essentiel puisque la vitesse des échanges de matière et d'énergie entre les particules de végétation et leur environnement lui sont proportionnels. En pratique, on attache donc beaucoup d'importance aux particules les plus fines (moins de 5 mm de diamètre). Une fois les familles de particules constituées, il faut décrire la répartition de la biomasse qu'elles représentent à l'échelle du couvert végétal. Cette procédure permet in fine de générer une végétation « numérique » (un fichier contient cette donnée spatialisée et constitue une des entrées du modèle physique de propagation du feu). Des recherches sont en cours pour intégrer à cette procédure les apports des modèles de croissance des arbres et des modèles architecturaux des plantes.

pas de solution « immédiate ». Elles ne peuvent être résolues que par des calculs sur ordinateur (simulation numérique). La méthode de résolution consiste en gros à découper l'espace en petits volumes et le temps en petits pas de temps, et partant de conditions initiales (conditions avant le feu et conditions d'allumage), à calculer progressivement comment évolue le phénomène dans l'espace et dans le temps. En résumé, la modélisation complètement physique des feux de forêt consiste à :

- identifier l'ensemble des processus en jeu et choisir pour chacun une loi de description,

- relier ces lois entre elles sur la base des principes de conservation de la physique, ce qui conduit à un système d'équations,

- trouver les solutions numériques de ce système et les faire calculer par un ordinateur.

Les simulations numériques sont calculées aujourd'hui dans un plan vertical défini par la direction de propagation du feu et la verticale (modèle 2D) ; elles correspondent donc à une « coupe » de front de feu. Dans ce plan vertical, on peut représenter toutes les variables qui décrivent le milieu physique et leur évolution dans le temps.

### Quelques résultats de simulations numériques

#### Feux de garrigue

Le premier exemple d'utilisation du modèle est la simulation numérique de feux se propageant à travers une garrigue méditerranéenne composée de chêne kermès et de brachypode rameux, qui permet de mieux comprendre comment le feu progresse, tout en faisant varier différents paramètres. La figure 1 montre les images instantanées du champ de température (phase gazeuse) et du champ de vitesse de l'écoulement des gaz de combustion et de l'air ambiant pour

### Les mécanismes de base de la propagation du feu

Pour décrire les mécanismes de base, on suit l'évolution d'un petit volume de végétation lorsqu'un feu s'approche, puis « traverse » ce volume et enfin s'en éloigne.

- Loin en avant du foyer, le combustible reçoit de l'énergie au moins par rayonnement, il s'échauffe.
- Parvenu à une température de 100°C, l'eau (libre) s'est complètement évaporée.
- Au voisinage du front de feu, le combustible reçoit de l'énergie par rayonnement et aussi par des phénomènes convectifs complexes : des gaz chauds issus du foyer. Sa température croît alors brutalement et lorsqu'elle dépasse environ 300°C, une dégradation très rapide du matériau solide a lieu : c'est la pyrolyse, qui libère des gaz combustibles.
- Ces gaz combustibles, en contact avec l'oxygène, sont alors enflammés et libèrent de l'énergie en quantité considérable qui permet d'entretenir l'ensemble du processus de propagation.
- La pyrolyse se poursuit au sein du foyer, une partie du matériau solide reste à l'état solide : ce sont les résidus charbonneux.
- En arrière du front, là où l'oxygène est suffisamment présent, la combustion de ces résidus charbonneux a lieu (braises).
- Enfin, le matériau restant évolue vers l'état de cendres.

L'énergie libérée par la combustion des produits de pyrolyse provoque un échauffement considérable du mélange gazeux dans le foyer (plus de 1000°C juste au-dessus du foyer). Ces gaz se dilatent donc considérablement et leur densité étant très inférieure à la densité de l'air ambiant, ils sont mis en mouvement. Au cours d'un feu, les mouvements de gaz et d'air ambiant se produisent donc forcément, même en l'absence d'un vent ambiant imposé. Lorsqu'un tel vent existe (ce qui est le cas le jour de grands incendies), il modifie les écoulements naturellement engendrés par la combustion. Il participe évidemment à l'apport d'air frais au foyer, donc d'oxygène. Mais surtout il change l'orientation des écoulements de gaz. En particulier, si le vent est dans la direction de propagation du feu, les gaz chauds pourront s'écouler vers l'avant du front de feu. Ceci amplifie le transport de chaleur en direction de la végétation encore imbrûlée, accélérant son échauffement.

des feux correspondant à différentes vitesses de vent (de 1 m/s à 10 m/s), et met en évidence l'action du front de flamme sur l'écoulement d'air ambiant.

Par vent faible la flamme est quasiment verticale et aspire l'air ambiant de part et d'autre du foyer. Lorsque le vent s'intensifie, la trajectoire des flammes est fortement déviée, les gaz chauds entrent en contact avec la végétation située en amont du front de flammes, ce qui constitue alors le facteur essentiel de la propagation du feu. Ces comportements sont conformes au comportement qualitativement attendu selon la force du vent (voir encadré).

Sur un plan plus opérationnel, cette étude numérique a été l'occasion de constater que par vent fort, le rapport de la vitesse du feu à la vitesse du vent est proche de 3 %, ce qui est conforme à la « règle des 3 % » citée plus haut. En revanche, par vent faible ou modéré, la vitesse de propagation peut représenter une fraction importante de la vitesse de vent (jusqu'à 15 %).

Des simulations complémentaires ont été réalisées dans des strates de chêne kermès de hauteurs différentes (25, 75 et 100 cm), correspondant à des charges de combustible (en t/ha) différentes. La puissance du foyer augmente alors avec la hauteur de végétation. Pour synthétiser les résultats, la figure 2 montre le rapport de la vitesse du feu à celle du vent en fonction du nombre de Froude (il est constitué par le rapport de la force du vent à la force du foyer). Si la force du vent est plus grande que celle du foyer (nombre de Froude supérieur à 1), la règle des 3 % peut donner un ordre de grandeur satisfaisant de la vitesse du feu. En revanche, quand le nombre de Froude est petit, la règle des 3 % conduit à sous-estimer considérablement la vitesse du feu.

La hauteur de flamme est une caractéristique du feu souvent utilisée pour établir la difficulté à lutter contre le feu. Nous avons estimé la hauteur moyenne des flammes à partir du champ de température du gaz, pour chaque feu simulé (voir fig. 3).

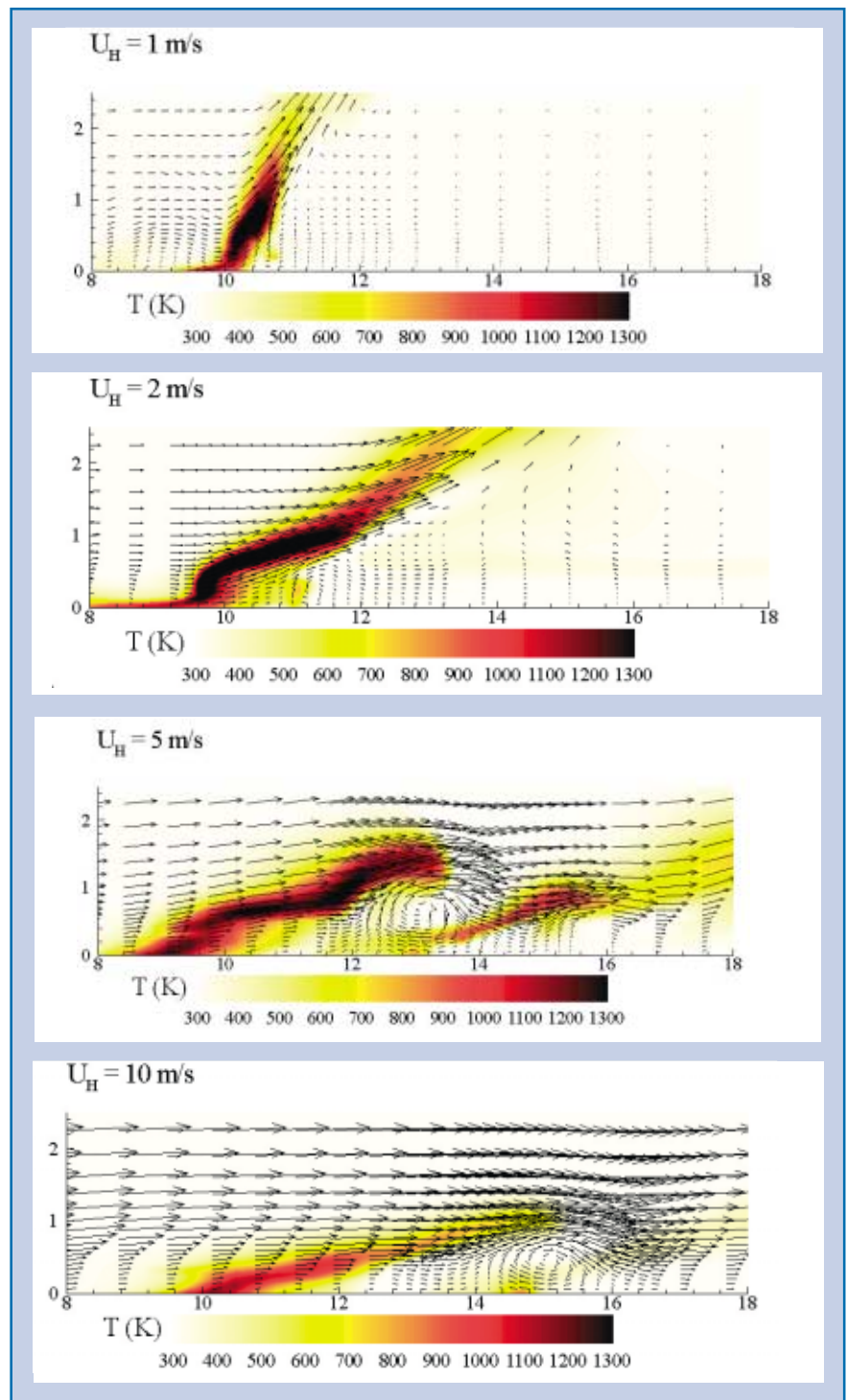


Fig. 1 Champs de température et de vitesse de l'écoulement des gaz de combustion et de l'air ambiant calculés au cours de la propagation d'un feu à travers une garrigue de chêne kermès pour différentes vitesses de vent ( $U_H$ ). Les axes ( $x, z$ ) du plan vertical sont gradués en mètres. La température est exprimée en Kelvin ( $T$  en  $K = T$  en  $^{\circ}\text{Celsius} + 273,15$ ). La température ambiante est ici de 300 K. Le feu progresse de gauche à droite. La vitesse du vent est imposée à une hauteur de 2 m sur la partie de terrain découverte située en limite gauche de la strate de végétation. La hauteur de la végétation (chêne kermès) est ici fixée à 50 cm.

Dans une garrigue à chêne kermès, la hauteur de flamme décroît linéairement avec la vitesse du vent et est comprise entre une fois et demi et trois fois la hauteur de végétation. On pourrait construire d'autres indicateurs géométriques, en particulier l'angle et la longueur de flamme.

**Feu abordant une coupure de combustible**

Plus récemment, nous avons réalisé des simulations de feux dans des peuplements de pin d'Alep avec du chêne kermès en sous-bois, afin de tester l'efficacité de différents traitements de végétation effectués sur une coupure de combustible. Ces tests seront systématisés dans le cadre du programme FIRESTAR (1) dont l'objet est d'élaborer un outil d'aide à la décision pour l'évaluation du risque et la gestion du combustible sur l'interface forêt-habitat.

La figure 4 (page suivante) montre le champ de température obtenu à différents instants de la propagation du feu abordant la coupure. En amont de la coupure (a en haut), le champ de température est caractéristique d'un feu de cimes actif. L'ensemble de la végétation depuis le sol jusqu'à la canopée brûle et la hauteur des flammes dépasse 20 m. En arrivant en limite de coupure (b au milieu), l'intensité du feu de surface est fortement réduite (effet du débroussaillage) et n'est plus suffisante pour entretenir la propagation du feu en cime. À un peu plus de 20 m de la limite de la coupure (c en bas), le feu « retombe » au sol et se propage avec une puissance faible. On peut conclure que ce traitement de végétation est efficace puisque les pompiers devront lutter contre un feu courant au sol. Un autre test a montré que si les arbres ne sont pas élagués, la propagation en cimes se poursuit sur la coupure.

**En conclusion**

La modélisation physique complète de la propagation des feux de forêt est un outil nouveau. Elle permet de construire des modèles explicatifs, dont le domaine de validité est vaste, qui auto-

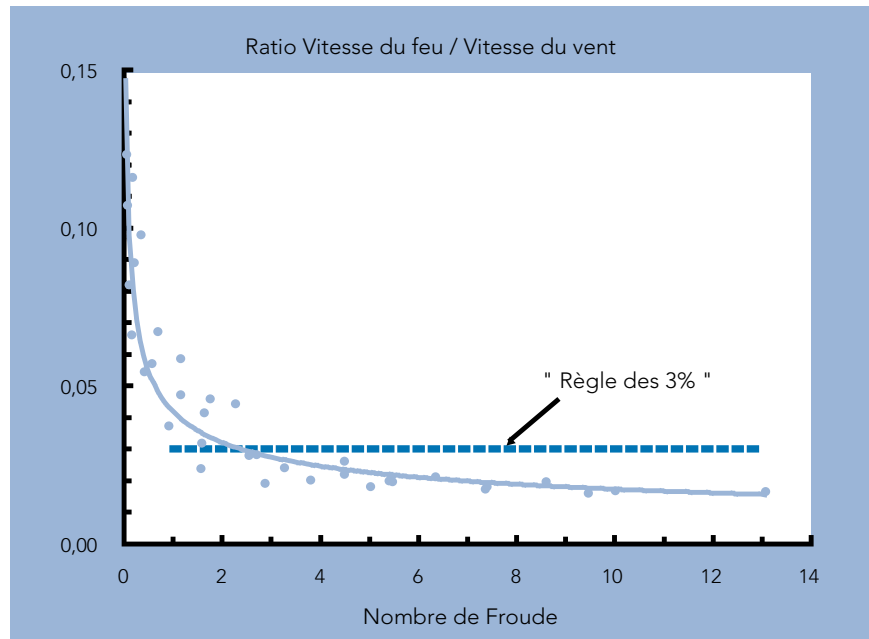


Fig. 2 Vitesse du feu rapportée à la vitesse du vent en fonction du nombre de Froude. Le nombre de Froude exprime le rapport de la force du vent à la force du feu (colonne de convection des gaz chauds).

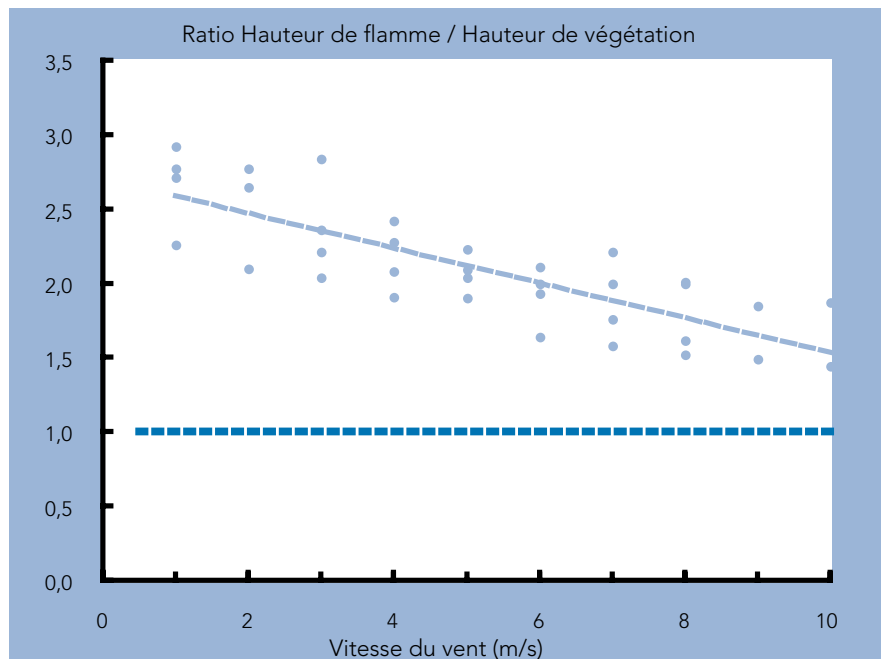


Fig. 3 Hauteur de flamme rapportée à la hauteur de végétation en fonction de la vitesse du vent.

risent des simulations beaucoup plus souples, variées et nombreuses que les modèles empiriques : ce sont ces « jeux » de simulation qui permettront d'aider à la compréhension du déroulement d'un feu en conditions réelles. L'outil permet aujourd'hui des calculs bi-dimensionnels adaptés à la stratifi-

cation verticale de la végétation. Nous sommes encore loin d'avoir exploité toutes ses possibilités, dont nous avons montré quelques exemples seulement.

Nous ne devons pas oublier que la validité du modèle employé doit être établie avant une utilisation vraiment opé-



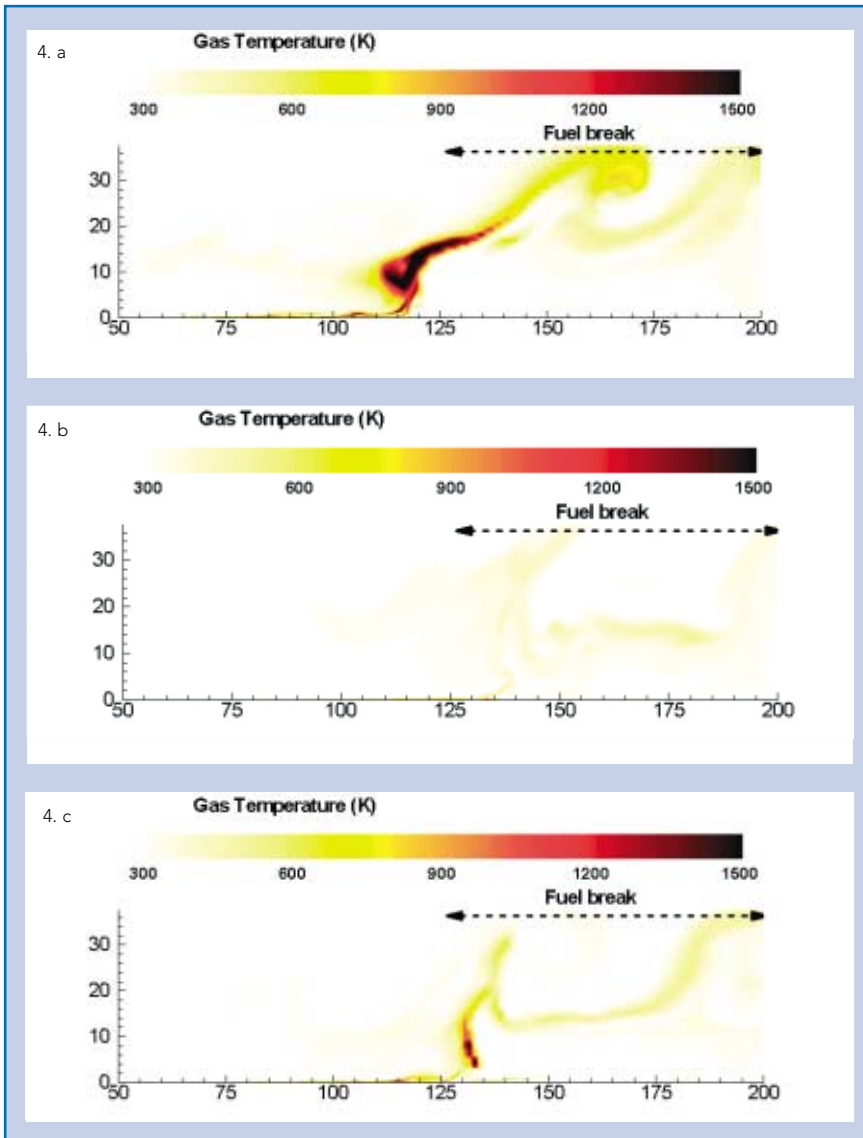


Fig. 4 Évolution du champ de température des gaz au cours de la propagation d'un feu à travers un peuplement de pins d'Alep à chêne kermès, abordant une coupure de combustible (Fuel break). Les axes (x,z) du plan vertical sont gradués en mètres. La température est exprimée en Kelvin :  $T \text{ en } K = T \text{ en } ^\circ\text{Celsius} + 273,15$ . La température ambiante est ici de 300 K. La végétation initiale (située avant la cote 125) est composée de chêne kermès (hauteur 1 m), de brachypode rameux (hauteur 25 cm), et de pins d'Alep (élagués à 2 m, hauteur 12 m). Dans la coupure de combustible (zone située au-delà de la cote 125) les arbres sont élagués à une hauteur de 4 m et la végétation au sol est réduite jusqu'à une épaisseur de 25 cm.

rationnelle de l'outil. L'intérêt de l'approche physique est de ne pas dépendre exclusivement ou presque d'un jeu de données expérimentales, données difficiles à acquérir dans le domaine des feux de forêt. Néanmoins, des comparaisons des prédictions du modèle avec des expérimentations de laboratoire et aussi en forêt sont indispensables pour le vali-

der et éventuellement l'améliorer. Ce travail de validation et d'amélioration est en cours. Avec l'accroissement de la puissance des ordinateurs, les études que nous menons actuellement en deux dimensions d'espace pourraient dans un avenir proche être étendues à des simulations tri-dimensionnelles pour représenter de manière plus réaliste l'hété-

rogénéité de la végétation et l'écoulement des gaz. Cela permettrait de simuler le feu dans toutes les structures de végétation.

**Jean-Luc DUPUY**  
INRA, unité de recherches forestières méditerranéennes  
équipe de prévention des incendies de forêt  
dupuy@avignon.inra.fr

**Dominique MORVAN**  
université de La Méditerranée, UNIMECA  
morvan@unimeca.univ-mrs.fr

(1) FIRESTAR : un système d'aide à la décision pour la gestion du combustible et la réduction du risque à l'interface forêt-habitat. Programme du 5e PCRD de l'Union Européenne, 2002-2004.  
Site Web : <http://www.eufirestar.org>

### Bibliographie

DUPUY J.L., 1997. Mieux comprendre et prédire la propagation des feux de forêt : expérimentation, test et proposition de modèles. Thèse de doctorat de l'Université Claude Bernard (Lyon I), 272 p.

DUPUY J.L., 2000. Les apports possibles de la physique du feu à la conception et à l'entretien des coupures de combustible. Forêt Méditerranéenne, tome 21, n° 4, pp. 497-510.

MORVAN D., DUPUY J.L. 2001. Modeling of fire spread through a forest fuel bed using a multiphase formulation. Combustion and Flame Vol.127, n° 1-2, pp.1981-1994.

MORVAN D., DUPUY J.L. 2004. Modeling the propagation of a wildfire through a Mediterranean shrub using a multiphase formulation. Combustion & Flame, in press.

RIGOLOT E. (Ed.), COSTA M. (Ed), 2000. Conception des coupures de combustible. Coll. « Réseau Coupures de Combustible » n° 4. Morières : La Cardère. 154 p.