

# Evaluation de l'efficacité des coupures de combustible par deux approches : dires d'experts et modélisation

par Eric RIGOLOT et Dominique MORVAN

*Notre vieux "pare-feu" (firebreak)  
est mort !... Vive les "coupures  
de combustible" (fuel-breaks) !*

*Les partisans du premier, ont cru,  
trop longtemps, que sa seule présence  
pouvait, passivement, arrêter  
les incendies. C'est assurément faux...*

*Sans pompier,  
ils ne servent souvent à rien !*

*Cet article nous montre  
que les "coupures de combustible"  
ont pour seule ambition (et c'est déjà  
capital !), de donner aux pompiers  
qui doivent les utiliser, un sentiment  
de sécurité tel, que ceux-ci pourront s'y  
installer et lutter efficacement contre*

*les grands incendies, sans prendre  
de risques exagérés. Il s'agit donc là,  
d'évaluer l'efficience pratique  
de ces coupures, d'apprécier  
la confiance qu'on leur prête,  
puis de les cautionner  
par l'expérience scientifique...*

*C'est ce que l'on appelle,  
au sens le plus noble du terme :  
du pragmatisme !*

## Introduction

Le cloisonnement des espaces naturels sensibles au feu constitue l'un des fondements de la politique française de prévention des incendies de forêt (COCHELIN, 1992). Le maillage de ces territoires au moyen de coupures de combustible représente, pour la collectivité, un investissement important qui doit s'accompagner d'un effort d'entretien permanent. A cet égard, l'évaluation de l'efficacité de ces ouvrages est une obligation d'autant plus impérative qu'ils constituent, pour la plupart, des zones d'appui à la lutte et doivent par conséquent donner une bonne garantie de sécurité aux sapeurs pompiers qui les utilisent.

Différentes méthodes permettent d'évaluer l'efficacité des coupures de combustible.

La méthode la plus classique est l'approche empirique qui consiste à mobilier les connaissances du moment en matière de conception des ouvrages de D.F.C.I. (Défense des forêts contre l'incendie). L'approche à dires d'experts dérive de l'approche empirique en ce sens qu'elle vise à l'optimiser en confrontant les points de vue des meilleurs spécialistes et en inscrivant leur réflexion dans un cadre formel. L'approche à dires d'experts passe par l'évaluation effectuée par des pompiers et des forestiers ayant une expérience vécue de la lutte contre les incendies de forêt. Il s'agit d'imaginer « à froid » le comportement attendu d'un feu sur des aménagements existants selon différents scénarios d'incendie prédefinis.



**Photo 1 :**  
Coupure de combustible stratégique dans le Massif des Maures  
Photo P. Brasseur/SDIS 83

Lorsqu'une coupure de combustible est confrontée à un véritable incendie, l'opportunité doit être saisie pour analyser l'événement et en tirer tous les enseignements possibles. Cette approche est systématisée depuis quelques années par le Réseau Coupures de combustible (LAMBERT *et al.*, 1999). Des retours d'expérience sont actuellement organisés par les partenaires varois de ce réseau pour étudier le comportement au feu des coupures de combustible du massif des Maures touchées par les grands incendies de l'été 2003. Cette étude étant en cours, nous en donnerons les résultats dans un prochain article.

Des modèles de comportement du feu peuvent aussi être utilisés pour simuler le comportement de différents types de coupures de combustible selon différents scénarios d'incendie (FINNEY, 1998 ; DUPUY, 2000).

Enfin, des feux expérimentaux peuvent être envisagés pour étudier la probabilité qu'une coupure de combustible soit franchie selon l'intensité d'un incendie (DAVIDSON, 1988) ou pour déterminer la largeur optimale d'un ouvrage (WILSON, 1988). DAVIS (1965) souligne les difficultés pour réaliser ce type d'expérience, surtout lorsqu'on cherche à se rapprocher des conditions opérationnelles. Cette dernière approche n'est pas encore utilisée en France.

Dans cette étude menée dans le cadre du Groupement d'intérêt scientifique (G.I.S.) sur les incendies de forêt, les apports respectifs de l'approche par modélisation et de

l'approche à dires d'experts ont été mis en parallèle. L'objectif n'est pas ici de confronter ces deux approches car le développement récent de l'approche par modélisation ne le permet pas encore. L'approche à dires d'experts occupe d'ailleurs la plus grande part de cet exposé. Il s'agit en effet, dans un premier temps, de livrer les résultats immédiatement applicables obtenus par cette méthode pleinement opérationnelle, sans oublier pour autant d'en souligner les limites. En deuxième lieu, et plus rapidement, les premiers résultats prometteurs de l'approche par modélisation seront présentés pour dresser quelques perspectives sur les possibilités qu'elle offrira à terme.

## **L'APPROCHE A DIRES D'EXPERTS**

L'évaluation se fait au niveau local, c'est-à-dire à l'échelle de segments de coupure de combustible d'une centaine de mètres. Les expertises sont ensuite mises en relation avec les descriptions réalisées sur ces mêmes segments. Ces descriptions consistent à caractériser la végétation en terme de quantité, de composition et de structure.

L'étude a consisté à déterminer les composantes de l'efficacité des coupures de combustible en confrontant les expertises avec les descriptions des segments de coupure (RIGOLOT & SCHEFFMANN, 2002). L'objectif était de dégager des critères plus pertinents que ceux qui peuvent être disponibles à l'heure actuelle ou bien de confirmer les critères empiriques en vigueur. Les coupures de combustible étudiées se limitent à celles destinées à limiter l'extension des grands incendies en permettant une intervention efficace des pompiers.

### **Méthode**

#### **Echantillonnage des segments de coupure**

L'étude s'appuie sur des aménagements de prévention des incendies de forêt qui existent effectivement en région méditerranéenne.

18 sites ont été sélectionnés répartis dans trois régions naturelles définies notamment à partir de la géologie induisant différents

types de peuplements et, également, de comportements hydrologiques : la Provence calcaire (Gard, Vaucluse, Bouches-du-Rhône et Ouest du Var), la Provence cristalline (Est du Var) et la Corse (Corse-du-Sud). Ces sites couvrent aussi une large gamme de types de coupures de combustible (coupures stratégiques, interfaces habitat/forêt, bandes débroussaillées de sécurité). Au total 31 segments ont été sélectionnés parmi ces 18 sites. Les espèces arborées dominantes des peuplements échantillonnées ont été essentiellement le pin d'Alep, le pin maritime, le chêne vert et le chêne-liège.

### Mise en œuvre des expertises

La méthode à dires d'expert a consisté à soumettre un questionnaire préétabli à un groupe d'une demi-douzaine d'experts réunis sur un segment afin de recueillir leurs avis à différents niveaux. Les groupes pouvaient différer d'un segment à l'autre par l'origine même des experts (pompiers ou forestiers), mais aussi selon le nombre de personnes présentes. Les évaluations ont été réalisées préférentiellement en début ou en fin de saison estivale.

Les experts pouvaient se déplacer librement sur le segment y compris dans le peuplement non débroussaillé présent d'un côté et de l'autre de la coupure. Le questionnaire soumis aux experts portait sur les caractéristiques attendues du feu incident et du feu sur la coupure (caractéristiques du front de flamme, strate(s) de végétation propageant le feu...), les difficultés de lutte sur la coupure (accès, fumées...), le sentiment de sécurité des forces de lutte sur l'ouvrage (engagement ou repli), et le risque de franchissement du segment par le feu (feu courant au sol, feu de cime, saute de feu).

Les experts remplissaient le questionnaire en se plaçant dans le contexte de trois scénarios d'incendie de gravité décroissante :

- *scénario 1 (extrême)* : vent violent ( $>60$  km/h) et feu de face (tête de feu),
- *scénario 2 (modéré)* : vent modéré à violent (20 à 60 km/h) et feu de flanc (feu latéral),
- *scénario 3 (modéré)* : vent modéré ( $<20$  km/h) et feu de face (tête de feu).

Tous les scénarios n'ont pas été évalués sur chaque segment. Le plus fréquemment, les scénarios 1 et 3 ont été proposés aux experts.

Sur chaque segment, et pour chacun des scénarios proposés sur ce segment, chaque expert a rempli un questionnaire différent. Au total en croisant ces quatre niveaux d'échantillonnage (site, segment, scénario, expert), 385 questionnaires ont été remplis.

### Description des segments

La description des segments de coupure expertisés a porté sur une largeur de 50 mètres et sur une longueur égale à la profondeur de la coupure localement augmentée de 25 m dans le peuplement forestier adjacent situé "au vent" et dans celui situé "sous le vent" de la coupure (Cf. Fig. 1). Une description fine de la végétation a été réalisée strate par strate (couverture morte, herbe, ligneux bas (hauteur inférieure à 2 m par convention), et ligneux hauts), elles-mêmes subdivisées en classes de hauteur.

La couverture morte a été décrite en appliquant la notation du Réseau Coupures de combustible (ETIENNE & RIGOLOT, 2001).

Dans chacune des autres strates, le recouvrement de la végétation a été noté par classes et la répartition spatiale des masses de végétation ou des espèces ont été qualifiées par leur degré d'agrégation (FOLK, 1951).

Ainsi la strate herbacée a été évaluée globalement sans distinguer les espèces. Mais les strates arbustive et arborée ont été évaluées, pour chacune de leurs classes de hauteur respectives, en distinguant à chaque fois les trois espèces dominantes, ainsi que la couche de végétation dans son ensemble.

**Fig. 1 :**  
Description d'un segment sur la coupure de Marguaritaghju (Corse-du-Sud).



**Tab. I :**  
Liste des variables  
analysées

Variables		Modalités	
1. Passage en cime hors coupure	généralisé (1-)	localisé (1=)	Non (1+)
2. Passage en cime sur coupure	généralisé (2-)	localisé (2=)	Non (2+)
3. Franchissement coupure par le feu sans lutte	oui (3-)	-	Non (3+)
4. Circulation sur la piste	faible (4-)	moyenne (4=)	Bonne (4+)
5. Circulation à pied sur la coupure	faible (5-)	moyenne (5=)	Bonne (5+)
6. Circulation en véhicule sur la coupure	faible (6-)	moyenne (6=)	Bonne (6+)
7. Fumées	intenable (7-)	gênante (7=)	peu gênante (7+)
8. Sautes sur la coupure	probable (8-)	-	peu probable (8+)
9. Sautes par-dessus la coupure	probable (9-)	-	peu probable (9+)
10. Sentiment de sécurité	non (10-)	peut-être (10=)	oui (10+)
11. Engagement	non (11-)	peut-être (11=)	oui (11+)
12. Arrêt du feu avec lutte	non (12-)	peut-être (12=)	oui (12+)

## Analyse des données

Dans un premier temps, les segments ont été analysés au travers des expertises au moyen d'une analyse factorielle des correspondances multiples (DERVIN, 1988). Les questions (Cf. Tab. I) ont été transformées en douze variables et les deux ou trois réponses possibles à une question donnée constituent les modalités de cette variable codées d'un signe (-, =, +) traduisant le niveau d'efficacité pour la lutte, du segment correspondant :

77 questionnaires comportant des questions sans réponse n'ont pas été pris en compte dans l'analyse, qui a donc été réalisée sur 308 questionnaires.

A partir des descriptions des segments expertisés, des variables caractérisant leurs dimensions et la végétation combustible s'y trouvant ont été construites. Les variables retenues sont listées dans le tableau II.

Parmi l'ensemble des questions posées aux experts, celle qui résume le mieux l'efficacité qu'ils attribuent à un segment de coupure est : pensez-vous arrêter le feu sur ce segment de coupure ? Dans cet esprit, un modèle de prédiction de l'arrêt du feu par les

forces de lutte sur un segment de coupure de combustible a été construit. Il s'agit de trouver le modèle qui décrit les relations entre la variable expliquée, le fait de pouvoir arrêter ou non le feu, et un ensemble de variables dites explicatives décrivant le segment.

Les experts devant répondre par « oui » ou par « non » à la question concernant l'arrêt du feu, la variable à expliquer est de type binaire ou dichotomique. Les réponses « peut-être » ont été assimilées à un « non ». Les variables explicatives sélectionnées sont introduites dans un modèle logistique dont la forme est :

$$P(\text{arrêt}) = \frac{1}{1 + \exp(-(b_0 + b_1 X_1 + \dots + b_n X_n))}$$

où  $P(\text{arrêt})$  est la probabilité d'arrêter l'incendie sur la coupure,  $X_1$  à  $X_n$  sont les variables indépendantes, et  $b_0$  à  $b_n$  sont les coefficients estimés à partir des données mesurées sur le terrain.

Plusieurs ajustements ont été recherchés. Dans un premier temps un modèle général comprenant le plus grand nombre possible de variables a été recherché pour illustrer la contribution de chaque variable introduite dans la décision des experts. Dans un deuxième temps, des modèles particuliers ont été recherchés pour chaque scénario.

Les meilleures variables explicatives de l'arrêt du feu ont été recherchées.

Pour tester la stabilité du modèle, plusieurs jeux de données ont été utilisés. Ces jeux de données ont été tirés au hasard parmi l'ensemble des données dans les proportions de deux tiers de l'ensemble des données pour sa construction et de un tiers pour sa validation.

Sur l'échantillon initial de 385 questionnaires, treize d'entre eux ont été exclus de

**Tab. II :**  
Statistiques élémentaires  
sur les variables  
descriptives des segments

Variables	Min	Moy	Max	Variance
Profondeur de la coupure (m)	69	133	400	63.6
Distance de la piste à la lisière du peuplement (m)	0	92	350	67.9
Epaisseur moyenne de la couverture morte (cm)	0	0.9	2.0	0.7
Recouvrement moyen des ligneux bas (%)	0	33	74	22.8
Phytovolume arbustif moyen (m <sup>3</sup> /ha)	0	1364	4680	1239.6
Densité des arbres à l'hectare	0	301	2771	481.6
Hauteur totale de l'espèce d'arbre dominante (m)	0	8	15	3.9
Recouvrement moyen des arbres de la strate dominante (%)	0	25	77	1239.6
Distance moyenne entre les cimes des arbres (m)	1	17	85	22.8

l'analyse car ils ne présentaient pas de réponse à la question sur l'arrêt du feu. Les 38 questionnaires correspondant à des segments sans arbre ont aussi été exclus. Parmi les 334 questionnaires restant, 262 ont été utilisés pour ajuster le modèle et 72 pour le valider.

Dans un deuxième temps, des modèles ont été ajustés séparément pour chaque scénario, et en ne distinguant pas l'origine professionnelle des experts afin d'obtenir une réponse moyenne représentative du groupe des évaluateurs. Les variables introduites se limitent donc à celles décrivant le segment de coupure. Sur l'échantillon de 372 questionnaires avec réponse à la question sur l'arrêt du feu, 201 ont été remplis dans le cadre du premier scénario, 37 pour un scénario 2 et 134 pour un scénario 3. Afin de ne pas trop réduire l'effectif de chaque échantillon, l'ensemble des données a été utilisé dans chaque cas pour construire le modèle.

## Résultats

### Résultats de l'analyse des expertises

Les modalités de chaque variable ont été représentées sur les trois premiers axes de l'analyse factorielle permettant ainsi de restituer 35 % de l'information totale. Le premier axe oppose les modalités des variables « arrêt du feu », « engagement », et « sentiment de sécurité ». Le deuxième axe oppose les modalités des variables décrivant la facilité de circulation sur l'ouvrage.

A l'issue de cette analyse générale, il est intéressant de noter que la facilité de circulation influe sur le sentiment de sécurité et sur la décision d'engagement, mais pas sur l'espoir d'arrêter le feu. Il apparaît aussi que la probabilité de passage du feu en cime (localisé ou généralisé) et la gêne liée aux fumées influent à la fois sur le sentiment de sécurité, la décision d'engagement et l'espoir d'arrêter le feu. On montre enfin que les sautes probables par-dessus la coupure rendent l'arrêt du feu incertain, et que les fumées gênantes rendent, évidemment, difficile la circulation à pied sur la coupure.

L'analyse des avis des pompiers et des forestiers de chacune des trois régions (Corse, Provence cristalline et calcaire), en projetant sur le premier plan factoriel les barycentres de leurs réponses, montre que,

dans chaque région, *le jugement des pompiers est toujours légèrement plus pessimiste que celui des forestiers*.

Les barycentres des réponses aux questions pour l'ensemble des couples segment/scénario ont ensuite été représentés sur le plan principal.

Scénario 2 : (feu de flanc) tous les segments où celui-ci a été proposé sont positifs, c'est-à-dire que *les experts se sentent en sécurité, et pensent alors arrêter le feu*. Ce résultat est important car il montre d'abord *la grande confiance des évaluateurs confrontés à un feu de flanc même par vent fort*. Ce résultat sans nuance implique donc qu'il ne sera pas possible, dans ce cas, de discriminer les coupures sur leur efficacité par manque de coupures jugées inefficaces dans l'échantillon.

Scénario 3 : (vent modéré et feu de face) tous les segments où ce scénario a été proposé, sont en général du côté positif de l'axe 1.

Scénario 1 extrême : (vent fort et feu de face). Pour ce scénario, les experts expriment un sentiment négatif pour 6 sites sur 7 c'est-à-dire *qu'ils ne se sentent pas en sécurité, et ne pensent pas arrêter le feu*. Ces deux derniers résultats discriminent bien les deux types de scénario 1 et 3, avec feu de face (vent modéré ou fort).

Parmi les différents cas particuliers de couples segment/scénario, il est notamment intéressant d'étudier le groupe des segments efficaces dans les conditions les plus sévères. Le tableau III récapitule les principales caractéristiques de 9 des 29 segments de coupure efficaces en scénario 1. Ces segments étaient généralement caractérisés par un faible volume d'embroussaillement et un faible couvert arboré en comparaison des valeurs moyennes sur l'ensemble du jeu de données (Cf. Tab. I).

**Tab. III :**  
Caractéristiques principales des sites efficaces en scénario 1

Segment	Profondeur locale de la coupure (m)	Phytovolume (m <sup>3</sup> /ha)	Recouvrement des arbres (%)
Avélans Fréjus	90	488	8
L'Ospedale - Pozzu Chiaru	117	320	29
Marguaritaghju au vent	125	0	3
Marguaritaghju contre-crête	125	64	3
Le Camp borne	131	1008	15
L'Ospedale - Diamante	170	310	23
Catalugno 171	173	1195	35
Catalugno 193	200	214	21
Gratadis	400	1892	4

## Mise en place du modèle « Arrêt du feu »

### Modèle général

L'analyse des corrélations entre variables montre que le recouvrement des arbres est corrélé positivement avec leur hauteur et négativement avec la distance entre les cimes : plus les arbres sont hauts, plus leur recouvrement est important et donc plus la distance entre les cimes est réduite. Par contre, la densité des arbres n'est pas corrélée à leur recouvrement, ce qui est un résultat important d'un point de vue méthodologique pour la caractérisation de cette strate. Il faut rappeler qu'ici nous sommes sur des coupures entretenues où, contrairement aux peuplements environnants, l'effet du couvert sur la réduction des broussailles joue peu.

Cette analyse préalable a permis une pré-sélection des variables descriptives du milieu pressenties pour construire le modèle général : le recouvrement, le phytovolume des arbustes, et la profondeur locale de la coupure. A ces trois variables descriptives du milieu ont été ajoutées dans l'analyse le scénario d'incendie et l'origine professionnelle des évaluateurs. Les résultats de l'ajustement obtenus avec ce lot de variables sont consignés dans le tableau IV.

Les coefficients des deux premières variables (scénario et origine) sont positifs. Cela signifie que lorsque l'on passe du scénario 1 au scénario 3, les experts sont plus confiants pour arrêter le feu, de même les forestiers (codés 2) sont plus confiants que les pompiers (codés 1) pour arrêter le feu. Le coefficient de la troisième variable est négatif ce qui signifie que plus le recouvrement des arbres est important, moins les experts

pensent arrêter le feu. Le coefficient de la quatrième variable est aussi négatif : moins le phytovolume des arbustes est important, plus les experts sont confiants pour arrêter le feu. Et enfin, le dernier coefficient est positif : plus la profondeur locale de la coupure est importante, plus les experts sont confiants pour arrêter le feu.

Le modèle, tel qu'il a été construit, exprime une probabilité, qu'il convient de comparer à un seuil de décision pour savoir s'il y a ou non arrêt du feu sur le segment testé. Une méthode simple de validation du modèle consiste à considérer un seuil de décision de 0.5 : si la probabilité calculée par le modèle est supérieure à 0.5, il y a arrêt du feu, sinon le feu passe. La matrice des réponses prédictes par le modèle à partir de l'échantillon de construction est ainsi obtenue. Il y a alors 25% de mauvaises réponses. Le modèle a ensuite été testé sur l'échantillon de validation. Le taux d'erreur est dans ce cas de 15%. Une méthode plus complète de validation du modèle consiste à évaluer sa performance non plus pour ce seuil unique de 0.5, mais pour l'ensemble des seuils de décision à la disposition du gestionnaire. On utilise pour cela l'outil analytique de la courbe ROC issu de la théorie de la détection de signal (SAVELAND & NEUENSCHWANDER, 1990) qui ne sera pas détaillé ici (voir RIGOLOT, 2002). Cette méthode permet notamment le calcul de l'indice de concordance C mesurant la qualité globale du modèle. Cet indice vaut 0.87 pour le modèle général « arrêt du feu », soit une performance tout-à-fait satisfaisante.

Pour comprendre l'importance de la notion de seuil de décision, considérons un segment donné pour lequel la probabilité calculée par le modèle est de 0.6. Le gestionnaire peut alors adopter deux attitudes opposées :

- Une attitude dite « risquée » : le gestionnaire choisit un seuil de décision faible comme 0.3. Dans ce cas, la probabilité calculée de 0.6 étant supérieure au seuil de 0.3, la réponse du modèle général est que le feu est arrêté. Ce choix conduit à augmenter le taux d'erreurs où le modèle prédit que le feu est arrêté alors que les experts prédisent que le feu franchit la coupure. Cette attitude conduit le gestionnaire à sous dimensionner les ouvrages. Il s'agit donc d'une approche conduisant à diminuer les coûts de réalisation des ouvrages.

**Tab. IV :**  
Modèle général de probabilité d'arrêt du feu

Variables explicatives	Coefficients estimés	Erreur standard	Valeur de z	Pr (> z ) de signification	Niveau de signification
Constante	-4.2410528	0.8458993	-5.014	5.34e-07	***
Scénario (1, 2 ou 3)	1.2319799	0.1972758	6.245	4.24e-10	***
Origine des experts	1.3121447	0.3106502	4.224	2.40e-05	***
Recouvrement des arbres	-0.0270841	0.0085029	-3.185	0.00145	**
Phytovolume des arbustes	-0.0002543	0.0001151	-2.209	.02716	*
Profondeur de la coupure	0.0146896	0.0052847	2.780	0.00544	**

Code de signif. \*\*\* 1%    \*\* 1%    \* 5%

- Une attitude dite « prudente » : le gestionnaire choisit un seuil de décision élevé comme 0.7. Dans ce cas, la probabilité calculée de 0.6 étant inférieure au seuil retenu, la réponse du modèle est que le feu franchit l'ouvrage. Ce choix conduit à augmenter le type d'erreur où le modèle prédit que le feu passe alors que les experts prédisent que le feu est arrêté. Cette attitude conduit le gestionnaire à sur-dimensionner les ouvrages. Il s'agit donc d'une approche visant à favoriser leur efficacité.

Le gestionnaire a donc un premier choix à faire en ce qui concerne le seuil de décision pour utiliser le modèle, mais il doit aussi choisir le scénario et l'origine professionnelle de l'expert. Une évaluation de la sensibilité du modèle général à ces deux variables a été réalisée. On s'est placé dans le cas d'un gestionnaire qui adopte une attitude prudente voulant favoriser l'efficacité de l'ouvrage avec un seuil de décision fixé à 0.7. Le segment de coupure de combustible retenu pour cette évaluation possède un faible couvert d'arbres (25%), un faible embroussaillement (1000 m<sup>3</sup>/ha) et une profondeur assez importante (150 m). Dans ces conditions, le modèle prédit que le feu passe si le gestionnaire choisit de tester son segment en scénario 1 et en privilégiant l'avis des pompiers (Cf. Tab. V). Dans les mêmes conditions, mais avec le point de vue d'un forestier, le feu est arrêté quel que soit le scénario d'incendie envisagé.

Pour satisfaire à l'avis des pompiers en scénario extrême, le gestionnaire peut soit augmenter nettement la profondeur locale de la coupure en passant de 150 à 250 m, soit jouer sur la combinaison de l'ensemble des variables (Cf. Tab. VI). Ce phénomène de compensation entre variables illustre bien la difficulté à définir des règles standards de conception des ouvrages en fixant un seuil unique pour chaque paramètre.

### Modèles par scénarios

Pour obtenir des résultats à portée opérationnelle, il convient de construire des modèles particuliers en fixant le scénario et en prenant en compte l'avis moyen du panel d'experts sans distinction d'origine professionnelle.

#### Scénario 1 (feu de face et vent fort)

Le meilleur ajustement pour le scénario 1 est obtenu avec un modèle combinant le

Scénario	Origine	Rec arbres (%)	Phytovolume arbustif (m <sup>3</sup> /ha)	Profondeur (m)	P (arrêt)	Réponse
1-Extrême	Pompier	25	1000	150	0.40	Passé
1-Extrême	Forestier	25	1000	150	0.71	Arrêt
3-Modéré	Pompier	25	1000	150	0.88	Arrêt
3-Modéré	Forestier	25	1000	150	0.97	Arrêt

**Tab. V :**  
Conséquences  
du choix du scénario  
et de l'origine  
professionnelle  
de l'expert

Scénario	Origine	Rec arbres (%)	Phytovolume arbustif (m <sup>3</sup> /ha)	Profondeur (m)	P (arrêt)	Réponse
1-Extrême	Pompier	25	1000	250	0.74	Arrêt
1-Extrême	Pompier	10	300	210	0.74	Arrêt

**Tab. VI :**  
Caractéristiques  
d'un ouvrage efficace  
en scénario extrême

	Coefficients estimés	Erreur standard	Valeur de z	Pr (> z )	Niveau de signification
Constante	0.6099	0.08564	7.121	1.96e-11	***
Recouvrement des arbres	-0.005595	1.801e-03	-3.106	0.00217	**
Phytovolume des arbustes	-0.0001140	2.784e-05	-4.093	6.20e-05	***
Profondeur de la coupure	0.001284	4.932e-04	2.602	0.00996	**

\*\*\* 1%      \*\* 1%      \* 5%

**Tab. VII :**  
Modèle de probabilité  
d'arrêt du feu  
pour le scénario 1

recouvrement des arbres, le phytovolume arbustif et la profondeur locale de la coupure (Cf. Tab. VII).

Plusieurs combinaisons de valeurs ont été testées pour ces variables avec un seuil de décision de 0.6 qui privilégie l'efficacité D.F.C.I. de l'ouvrage (Cf. Tab. VIII). La combinaison n°1 a été choisie comme référence car elle correspond aux caractéristiques classiques d'une coupure stratégique. Le modèle

Combinaison	Rec. arbres (%)	Phytovolume arbustif (m <sup>3</sup> /ha)	Profondeur (m)	P(arrest)	Réponse
1	65	2250	125	0.54	Passe
2	15	2250	125	0.61	Arrêt
3	65	2250	325	0.60	Arrêt
4	65	100	125	0.60	Arrêt
5	30	2000	150	0.60	Arrêt

**Tab. VIII :**

Prédictions du modèle en scenario 1 selon différentes modalités de conception des coupures

	Coefficients estimés	Erreur standard	Valeur de z	Pr (> z )	Niveau de signification
Constante	0.447776	0.131982	3.393	0.000916	***
Recouvrement des arbres	-0.005100	0.001787	-2.853	0.005033	**
Profondeur de la coupure	0.004696	0.001357	3.460	0.00073	***

\*\*\* 1%    \*\* 1%    \* 5%

**Tab. IX :**

Modèle de probabilité d'arrêt du feu pour le scénario 3

Prédit que le feu passe avec une telle combinaison de valeurs. Les trois combinaisons suivantes aboutissent à une prédiction d'arrêt du feu en ne changeant à chaque fois qu'une seule des valeurs. La cinquième combinaison aboutit aussi à l'arrêt du feu mais en modifiant les valeurs des trois variables de la manière la plus réaliste.

#### *Scénario 2 (feu de flanc)*

Aucun ajustement satisfaisant n'a pu être obtenu avec l'échantillon de questionnaires

mettant en œuvre le scénario 2. Ce résultat est à la fois dû au faible effectif de cet échantillon, mais aussi au fait qu'il contenait en proportion beaucoup moins de cas où les coupures étaient jugées inefficaces que de cas où elles étaient jugées efficaces. Quoiqu'il en soit, le principal résultat sur ce point est la faible exigence des évaluateurs pour les ouvrages destinés à parer les feux de flanc. La coupure type correspondant à la première combinaison du tableau VIII est un ouvrage jugé confortable dans cette situation.

#### *Scénario 3 (feu de face et vent faible)*

Le meilleur ajustement pour le scénario 3 est obtenu avec un modèle combinant le recouvrement des arbres et la profondeur locale de la coupure (Cf. Tab. IX). Le phytovolume arbustif est une variable faiblement explicative pour cet échantillon car ses valeurs ne dépassent pas 1900 m<sup>3</sup>/ha, ce qui demeure faible.

Toujours pour le seuil de décision de 0.6, le tableau X donne quatre exemples de combinaisons qui permettent d'envisager l'arrêt du feu en scénario 3. Le modèle prédit que le feu est arrêté sur le segment de référence de 125 mètres de profondeur locale et de recouvrement arboré de 65% (combinaison n°1). A partir de ces valeurs, il est possible de descendre la profondeur de la coupure jusqu'à 65 m en maintenant le couvert arboré pour que la coupure reste efficace (combinaison n°2). Il est aussi possible d'augmenter le couvert arboré jusqu'à 100% en maintenant la profondeur de 125 m sans que l'efficacité de l'ouvrage ne soit menacée (combinaison n°3). Une bande de sécurité de profondeur 50 m reste efficace en scénario 3 tant que le recouvrement arboré n'excède pas 50% (combinaison n°4). Enfin une coupure avec un couvert arboré complet doit avoir au moins 100 m de profondeur pour permettre une lutte efficace contre ce type d'incendie (combinaison n°5). Dans le cas particulier de peuplements dont le couvert est sombre quand ils sont fermés, comme la yeuseraie, cette combinaison présente l'avantage de limiter les besoins d'entretiens car les broussailles sont réduites par manque de lumière.

Bien entendu ces résultats doivent être confirmés par un échantillonnage permettant de prendre en compte le niveau d'embroussaillage pour la construction d'un modèle plus complet.

Combinaison	Rec. arbres (%)	Profondeur(m)	P(Arrêt)	Réponse
1	65	125	0.67	Arrêt
2	65	65	0.60	Arrêt
3	100	125	0.63	Arrêt
4 (BDS)	50	50	0.61	Arrêt
5	100	95	0.59	Passe

BDS = Bande débroussaillée de sécurité

## Discussion

### Un besoin de concertation pompier/forestier

Le jugement toujours plus sévère des pompiers en comparaison de celui des forestiers s'explique d'abord par le rôle respectif de chacun des intervenants, les pompiers étant en première ligne pour lutter sur ces ouvrages. Cette différence est sans doute aussi à mettre au passif d'un déficit de concertation entre les acteurs de la gestion et de la lutte à toutes les étapes de conception, de réalisation et de validation de ces ouvrages. Cette différence de jugement devrait s'estomper en généralisant l'habitude de travailler en commun.

Il est à noter que les sites corses ont été particulièrement bien jugés et sans disparité par les experts. Cela est certainement dû au fait que lors de la conception des coupures de combustible, il y a une véritable implication des services de lutte (DURET & COSTA, 2000). Une fois l'ouvrage réalisé, les utilisateurs sont naturellement satisfaits du résultat.

### Comment gérer les arbres sur les coupures de combustible ?

Le modèle « arrêt du feu » montre que le recouvrement des arbres, lorsqu'il augmente, nuit à l'efficacité de la coupure. En règle générale, les évaluateurs préconisent d'éclaircir les arbres afin d'améliorer l'efficacité des ouvrages visités.

Cette étude révèle que la densité des tiges n'est pas une bonne mesure de la structure de la strate arborée au regard du comportement du feu. L'analyse montre que le recouvrement des arbres, voire la distance moyenne entre les houppiers, permettent de mieux qualifier cette strate. En effet, le danger de progression de l'incendie par la strate arborée, n'est pas lié à la densité des troncs, mais à la continuité horizontale qu'assurent des houppiers qui se touchent.

Les experts ont jugé positivement (sans risque) en scénario 1 les segments dont le recouvrement de la strate arborée était de l'ordre de 20 à 30%. Pour les segments dont le taux de recouvrement est proche de ce seuil mais qui n'ont pas été jugés positivement, d'autres critères comme le phytovolume n'étaient pas favorables à l'arrêt du



feu. Ce seuil de recouvrement arboré relativement bas par rapport à ce qu'il est courant de rencontrer sur les coupures de combustible existantes, serait à préciser par des études aérologiques pour définir le recouvrement d'arbres offrant une rugosité suffisante aux vents. Quoiqu'il en soit, le seuil recherché se situe en deçà de 50% de recouvrement (à dires d'experts).

En scénario 3, le recouvrement des arbres peut aller jusqu'à 75% sur des coupures de grande profondeur destinées à limiter les surfaces, mais ne doivent pas non plus dépasser les 50% sur les coupures de plus faible profondeur. C'est le cas notamment pour qu'un segment de coupure destiné à limiter les effets sur les forces de lutte en transit (bande débroussaillée de sécurité) puisse servir localement d'axe de lutte contre ce type d'incendie.

### Profondeur des coupures

La profondeur locale de la coupure est un critère fondamental à prendre en compte. Un seuil d'une centaine de mètres est communément admis puisqu'il semble nécessaire pour que le travail des forces de lutte se fasse en sécurité. On peut parler ici d'un seuil minimum. En effet, le modèle montre que plus la profondeur de la coupure est importante, plus celui-ci est efficace. La largeur locale des coupures efficaces en scénario extrême variait de 115 m à 400 m, à l'exception d'une coupure de 90 m de profondeur seulement,

**Photo 2 :**  
Coupure de combustible avec éclaircie appropriée des arbres  
Photo E. Rigolot/INRA

mais dont le phytovolume arbustif et le couvert arboré étaient particulièrement faibles (Cf. Tab. III). Ce résultat confirme celui de WILSON (1988) qui utilise pour sa part une approche expérimentale.

L'analyse des prédictions du modèle d'arrêt du feu montre que pour un seuil de décision de 0.6, la profondeur minimum pour une coupure efficace dans la limitation des grands incendies est de 125 m. A ce seuil plancher, les autres caractéristiques de l'ouvrage doivent être en outre de grande qualité.

### Phytovolume arbustif

Il est difficile de déduire de l'approche à dires d'experts un seuil d'embroussaillement au-delà duquel une repasse s'impose puisque l'efficacité de l'ouvrage dépend de la combinaison des trois critères recouvrement des ligneux hauts, phytovolume, et profondeur locale de la coupure. Dans le cas d'un ouvrage de très grande qualité sur les deux autres critères (profondeur de 150 m et recouvrement arboré de 30%), le phytovolume arbustif ne doit pas excéder 2000 m<sup>3</sup>/ha pour qu'il reste efficace avec un seuil de décision de 0.6. Il se trouve justement que ce seuil d'environ 2000 m<sup>3</sup>/ha est empiriquement admis et utilisé par les gestionnaires en région méditerranéenne (ETIENNE *et al.*, 1991). Ce seuil empirique correspond au niveau d'entretien que les forestiers peuvent

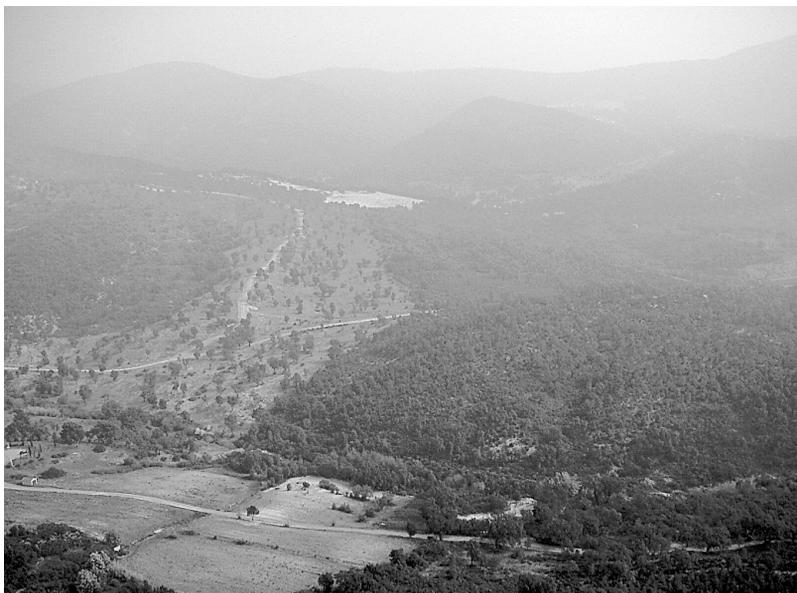
assurer en routine sur l'ensemble du réseau d'ouvrage dont ils ont la charge. Les moyens humains et financiers dont ils disposent leur permettent de repasser en entretien sur le même secteur tous les trois à quatre ans environ. Le phytovolume accumulé sur cette période est en moyenne de 2000 m<sup>3</sup>/ha (ETIENNE *et al.*, 1994). Dans le contexte budgétaire tendu de ces dernières années, il paraît difficile d'abaisser ce seuil, même si le contre coup des grands incendies de la saison 2003 laisse espérer une politique plus volontariste en la matière. A défaut ou en complément, il est toujours possible d'utiliser des techniques d'entretien qui assure un débroussaillement de qualité.

Ainsi, sur les ouvrages visités, les évaluateurs ont souvent proposé d'utiliser le brûlage dirigé pour réduire effectivement la végétation herbacée et la couverture morte. AGEE *et al.* (2000) suggèrent également de recourir au brûlage dirigé pour entretenir les coupures de combustible, en couplage avec des brûlages extensifs en appui des coupures pour étendre la zone de baisse de régime du feu.

## SIMULATION NUMERIQUE DU COMPORTEMENT DU FEU

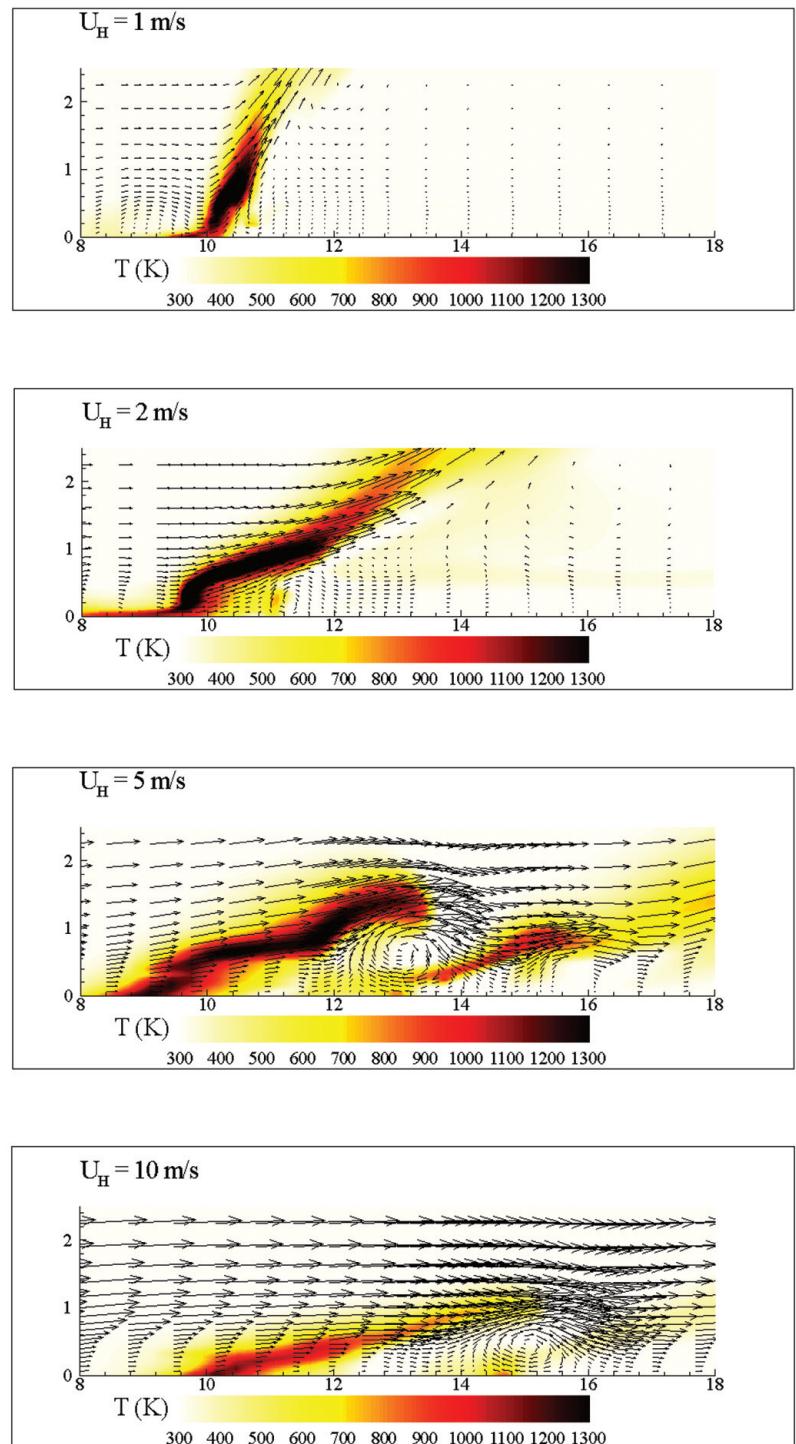
Au cours de la propagation d'un feu, la végétation est soumise à un flux de chaleur intense en provenance de la flamme (par rayonnement) et par échanges convectifs avec les gaz chauds issus du foyer. Sous l'action de ce flux de chaleur, la végétation va subir différentes étapes de dégradation : déshydratation, décomposition chimique (pyrolyse) en produits gazeux (essentiellement CO et CO<sub>2</sub>) et solide (charbon de bois). Une fois libérés, les produits de pyrolyse à l'état gazeux mélangés à l'oxygène de l'air ambiant vont en partie brûler. C'est cette réaction de combustion en phase gazeuse qui constitue les flammes visibles au-dessus d'un foyer d'incendie. La dynamique du front de flamme dépend beaucoup des interactions entre la zone en combustion et le milieu gazeux environnant et en particulier des conditions d'écoulement atmosphérique (PITTS, 1991). Le vent ne représente qu'une partie des phénomènes atmosphériques en jeu, en effet dans certaines conditions le front de flamme génère à son voisinage

**Photo 3 :**  
Coupure de combustible  
dans le Massif  
des Maures  
Photo P. Brasseur/SDIS 83



immédiat son propre écoulement et vient aspirer en amont les gaz frais nécessaires à son alimentation en oxygène. En résumé, les mécanismes physiques qui contribuent à la propagation d'un feu sont extrêmement complexes. Malgré la nature parfaitement déterministe des équations de conservation qui gouvernent le comportement de ce système, l'interaction combustion/écoulement atmosphérique rend très difficile la prédiction par le calcul de son évolution dans le temps (en utilisant une approche voisine de celle utilisée pour les prévisions météorologiques). Nous en sommes pour l'instant réduit à « modéliser » ce système, en idéalisant une partie de son comportement. L'approche la plus avancée dans ce domaine est celle qui a été développée dans le cadre du programme européen EFAISTOS (4<sup>e</sup> Programme cadre de recherche et développement de la Commission européenne : 1996-1998). Elle consiste à homogénéiser les conditions de propagation dans la direction horizontale perpendiculaire à la direction de propagation (MORVAN *et al.*, 2001). Dans ces conditions les transferts qui pilotent le comportement du feu sont localisés uniquement dans un plan défini par la direction de propagation et la direction verticale. Cette hypothèse restrictive ne permet pas de prendre en compte tous les effets observés pendant la propagation d'un feu, en particulier les effets tridimensionnels. Cependant en réduisant simplement d'une direction le niveau de représentation du système feu/atmosphère, tout en maintenant un niveau élevé de représentation des phénomènes physiques mis en jeu, le temps de calcul nécessaire pour la résolution de ce problème est considérablement réduit et devient compatible avec la puissance des moyens informatiques actuellement disponibles sur le marché. C'est cette approche qui a été adoptée pour l'étude résumée dans cet article et qui concerne la simulation numérique du comportement du feu se propageant à travers une garrigue méditerranéenne composée de chêne kermès, mélangé à du brachypode rameux (sans aucun arbre).

Les résultats de simulation exposés sur la figure 2, montrent une image instantanée du champ de température (phase gazeuse) et des vecteurs vitesse de l'écoulement au voisinage d'un feu en cours de propagation (de la gauche vers la droite) pour différentes conditions de vent comprises entre 1 m/s et 10 m/s



**Fig. 2 :**  
Champs de température et vecteurs vitesse (écoulement) calculés au cours de la propagation d'un feu à travers une garrigue de chêne kermès pour différentes conditions de vent comprises entre 1m/s et 10m/s.

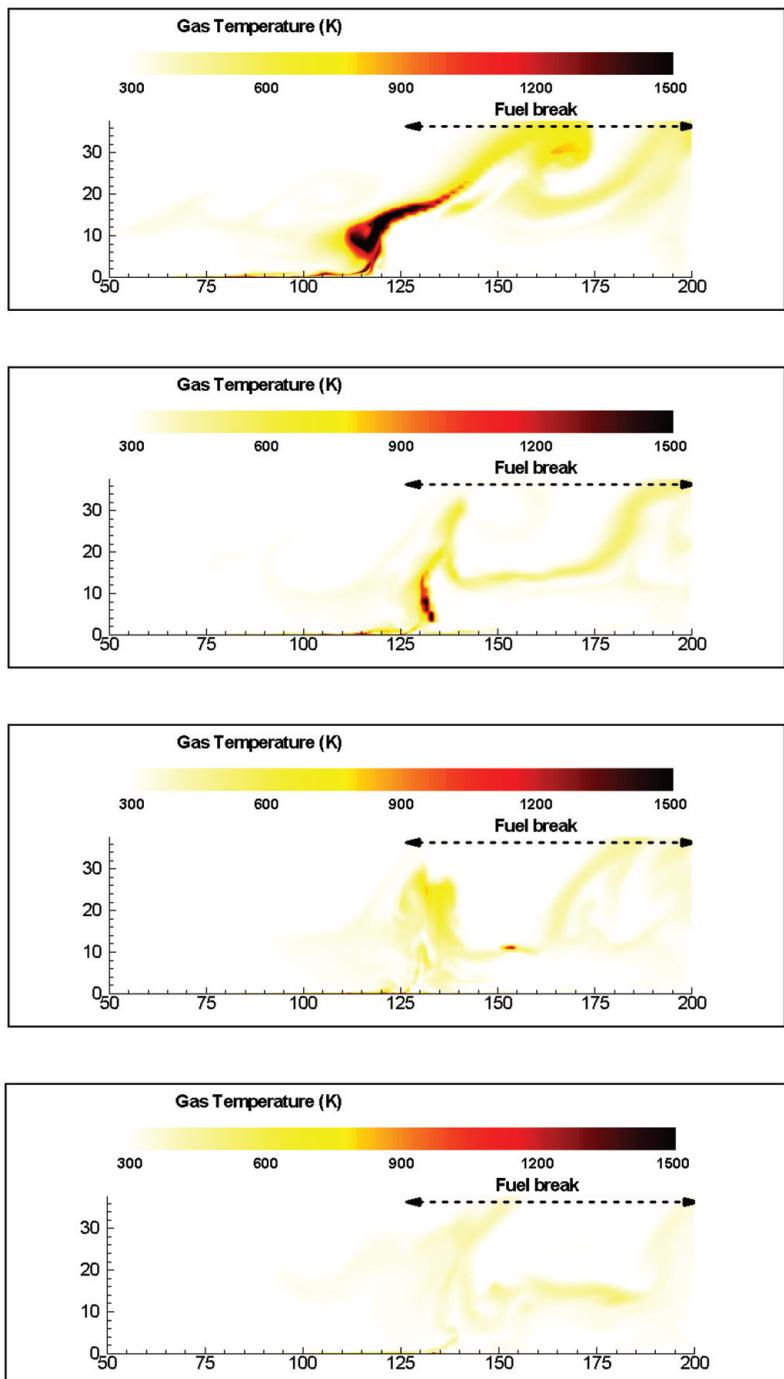


Fig. 3 :

Evolution du champ de température (phase gazeuse) au cours de la propagation d'un feu à travers un paysage composé de pins d'Alep et de chêne kermès, abordant une coupure de combustible.

(3,6 à 36 km/h). 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. Pour ces calculs la hauteur maximum de la végétation (chêne kermès) est fixée à 50 cm. Ces résultats mettent en évidence l'action du front de flamme sur l'écoulement. Par vent faible, la flamme est quasi verticale et aspire l'air ambiant de part et d'autre du foyer. Un bilan énergétique réalisé au sein de la végétation montre que dans ces conditions, la propagation du feu est pilotée à 70% par le rayonnement des flammes. Lorsque les conditions de vent se renforcent, la trajectoire des flammes est fortement déviée, les gaz chauds rentrent en contact avec la végétation située en amont du front de flammes. D'un point de vue énergétique la propagation du feu finit par être en grande partie (jusqu'à 70%) pilotée par les échanges convectifs entre les gaz chauds et la végétation (MORVAN *et al.*, 2002).

Par vent faible la vitesse de propagation (ROS) peut représenter une fraction importante de la vitesse de vent (UH), pour ce profil de végétation nous avons calculé des vitesses de propagation qui pouvaient représenter jusqu'à 18% de la vitesse du vent. Par vent fort le rapport ROS/UH tend asymptotiquement vers une limite égale approximativement à 3%. Ces résultats sont en partie conformes au modèle opérationnel utilisé dans le sud de la France (modèle de Valabre) qui fixe à 3% de la vitesse du vent, la vitesse de propagation d'un feu. On note également que dans de nombreuses situations cette « règle » n'est pas vérifiée. Les feux qui se sont déroulés dans le Var cet été et sur lesquels ont été relevées des vitesses de propagation relative très élevées confirment cette impression.

Plus récemment cette approche a été étendue à l'étude du comportement du feu au voisinage d'une interface forêt/habitat. Ces travaux réalisés dans le cadre d'un programme de recherches financé par la Commission Européenne (FIRESTAR, 5<sup>e</sup> P.C.R.D.T. 2002-2005), ont pour objectif de quantifier l'action des techniques de réduction de la biomasse (débroussaillage, élagage) sur l'intensité d'un feu arrivant sur une coupure de combustible.

Les résultats présentés sur la figure 3 montrent le champ de température obtenu à différents instants de la propagation du feu. La végétation initiale (située avant la cote

125) est composée de chêne kermès (hauteur 1 m, taux de recouvrement 70%), de brachypode rameux (hauteur 25 cm, taux de recouvrement 50%) et de pins d'Alep (élagués à 2 m, hauteur 12 m, taux de recouvrement 80%). Dans la coupure de combustible (zone située au-delà de la cote 125) les arbres sont élagués à une hauteur de 3 m et la végétation au sol est réduite jusqu'à une épaisseur de 5 cm. En amont de la coupure (Figure 3 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 les hauteurs des flammes dépasse les 20 m. En arrivant en limite de coupure, l'intensité du feu de surface qui est fortement réduite (effet du débroussaillage), n'est plus suffisante pour entretenir la propagation du feu en cime. A un peu plus de 10 m de la limite de la coupure, le feu retombe au sol et s'arrête très rapidement (la biomasse répartie de manière discontinue au niveau du sol ne permet plus une propagation entretenue).

## Conclusions

L'approche à dires d'experts a permis d'extraire un certain nombre d'indications concernant le dimensionnement et le traitement de la végétation sur les coupures de combustible destinées à limiter les surfaces parcourues par les grands incendies. Les principales conclusions en sont (i) un recouvrement des arbres inférieur à 50%, (ii) une profondeur locale d'au moins 125 m, (iii) un seuil de phytovolume difficile à préciser isolément, mais dans tous les cas ne devant pas dépasser le seuil habituel des 2000 m<sup>3</sup>/ha, sauf si les autres critères sont de haute qualité.

Dans des conditions de vent modéré, mais pour un incendie arrivant de face sur l'ouvrage, les exigences quant à la profondeur locale et au recouvrement des arbres sont sensiblement moindres. Les seuils de phytovolumes admissibles restent à préciser par un échantillonnage adapté.

Enfin les feux de flanc sont de nature à pouvoir être traités efficacement par des ouvrages relativement sommaires, dont les normes minimales n'ont néanmoins pu être précisées par cette étude.

Au regard des pratiques actuelles de traî-

tement de la végétation sur les coupures de combustible, la principale innovation de ce travail est donc de recommander une attention particulière à porter à l'avenir sur le traitement des arbres. Cette strate a été trop négligée par le passé, l'essentiel des efforts ayant porté sur la maîtrise de l'embroussaillement arbustif. Les recommandations techniques de conception des ouvrages de prévention des incendies de forêt formulées récemment par le Réseau Coupures de combustible (RIGOLOT, 2002) prennent largement en compte le traitement de l'étage arboré.

Il est important de rappeler qu'un seul critère ne suffit certainement pas à rendre une coupure efficace mais que plusieurs paramètres peuvent toutefois se compenser les uns les autres. De plus, il peut être nécessaire de moduler ces valeurs à l'intérieur même d'un segment et encore plus sur toute longueur d'une coupure qui traverse un massif. Ce principe de combinaison et de compensation entre facteurs répond bien aux nombreuses contraintes techniques, économiques ou sociologiques à prendre en compte pour accompagner ces projets d'aménagement dans des forêts méditerranéennes au caractère multifonctionnel.

L'approche à dires d'experts met en œuvre la meilleure connaissance du moment sur un domaine donné. Les grands incendies de l'été 2003, qui se sont déroulés postérieurement à cette étude, apportent un nouveau regard sur le phénomène feux de forêt, qui devra être pris en compte dans les évaluations futures de l'efficacité des coupures de combustible.

Pour finir, il est souhaitable que cette étude se poursuive vers une évaluation globale de l'efficacité des coupures de combustible qui ne seront efficaces que si elles ne sont franchies par l'incendie en aucun point de leur longueur. On peut donc envisager d'évaluer cette efficacité par rapport à la facilité d'accès à la coupure en terme de temps et de niveau de sécurité, ou encore d'après le nombre et le type de moyens de secours mobilisables dans des délais raisonnables le jour de l'incendie.

Pour ce qui concerne l'approche basée sur la modélisation numérique du comportement des feux, nous pouvons déduire des premières expériences conduites en la matière que l'application des mêmes concepts de simulation utilisés pour les prévisions

Eric RIGOLOT  
Institut national  
de la recherche  
agronomique,  
Unité de recherches  
forestières  
méditerranéennes,  
Avenue A. Vivaldi  
84000 Avignon  
Tél : 04 90 13 59 35  
Fax : 04 90 13 59 59  
Courriel :  
rigolot@avignon.  
inra.fr

Dominique MORVAN  
Université  
de la Méditerranée,  
UNIMECA Technopôle  
de Château Gombert  
60 rue Jolliot Curie  
13453 Marseille  
cedex 13  
Tél : 04 91 11 38 51  
Fax : 04 91 11 38 38  
Courriel : morvan@unimeca.  
univ-mrs.fr

météorologiques, à la modélisation des feux de forêt permet d'avoir une vision détaillée des mécanismes physiques qui pilote la propagation d'un feu. L'arrivée de ce nouvel outil doit permettre d'apporter des éléments de réponse à un certain nombre de questions telles que l'influence de l'état et de la structure de la végétation sur la dynamique d'un incendie (vitesse de propagation, intensité, hauteur des flammes), l'influence des conditions de vent et de pente du terrain sur la propagation, les conditions de transition verticale d'un feu de surface vers un feu de cime...

Cet outil peut également être utilisé pour le dimensionnement d'aménagements qui peuvent être réalisés pour sécuriser certaines zones (coupe de combustible, débroussaillage le long des voies de communication, aménagement des interfaces forêt/habitat, exploitations forestières).

Avec le développement très rapide de la puissance des microprocesseurs (calculateurs à architecture parallèle, fermes de PC), ces études pourraient dans un avenir proche être étendues à des simulations tridimensionnelles pour traiter de manière plus réaliste les hétérogénéités horizontales de combustible.

**E.R., D.M.**

## Remerciements

Cette étude a été financée par la Direction de l'espace rural et de la forêt dans le cadre du Groupement d'intérêt scientifique "incendies de forêt". La mise en œuvre d'une approche à dires d'experts n'aurait pu être menée avec succès sans l'active participation d'un panel d'évaluateurs. Nous tenons à remercier vivement les personnes qui se sont prêtées avec beaucoup de disponibilité et de conscience professionnelle à l'exercice d'expertise qui leur a été proposé. De plus nous tenons à remercier Catherine Scheffmann et Virginie Supervie pour leur contribution à toutes les étapes de ce travail, ainsi que Philippe Petit et David Fabre pour leur appui au travail de terrain.

## Références

- Agee, J.K., Bahro, B., Finney, M.A., Omi, P.N., Sapsis, D.B., Skinner, C.N., van Wagendonk, J.W., Weatherspoon, C.P. 2000. The use of shaded fuel-breaks in landscape fire management, *Forest Ecology and Management*, (127): 55-66.
- Cemagref 1989. Guide technique du forestier méditerranéen. Aix-en-Provence.
- Cheney N.P., Gould J.S., Catchpole W.R. 1993. The influence of fuel, weather and fire shape variables on fire-spread in grassland, *Int. J. Wildland Fire* Vol.3(1) pp.31-44
- Cochelin, Y. 1992. *D.F.C.I. en zone méditerranéenne : intérêts et faisabilité d'un compartimentage des massifs forestiers par des coupures stratégiques*. Paris : Conseil général du Génie Rural des eaux et Forêts, 84 pages + annexes.
- Davidson, S. 1988. Predicting the effectiveness of firebreaks. *Rural research*, 139 : 11-16.
- 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* XXI(4). 497-510
- Duret, J.Y. ; Costa, M. 2000. Implication des utilisateurs dans la conception des ouvrages en Corse-du-Sud. In Rigolot, E. & Costa, M. (coord.) *Conception des Coupures de combustible RCC n°4* – Ed. de la Cardère Morières, 2000, 154p. : 61-62.
- Etienne, M. & Rigolot, E. 2001. Méthodes de suivi des coupures de combustible. *RCC n°1* – Ed. de la Cardère Morières, 64p.
- Etienne, M. ; Legrand, C. ; Armand, D. 1991. Stratégie d'occupation de l'espace par les petits ligneux après débroussaillage en région méditerranéenne française. *Ann. des Sci. For.* 48 : 667-677.
- Etienne, M., Mas, I., Rigolot, E. 1994. *Combining techniques of fuel reduction for fuel-break maintenance in the French Mediterranean region*. In Proc. 2nd Int. Conf. Forest Fire Research, Coimbra, Nov. 1994, II(C20): 713-721
- Finney, M.A., 1998. FARSITE: fire area simulator. Model Development and Evaluation. *USDA Forest Service Research paper RMRS-RP-4*.
- Folk, L. 1951. A comparaison chart for visual percentage estimation. *Journal of sedimentary petrology*. 21(1): 32-33.
- Lambert, B. ; Casteignau, D. ; Costa, M. ; Etienne, M. ; Guiton, JL. ; Rigolot, E. 1999. Analyse après incendie de six coupures de combustible. *RCC n°2* – Ed. de la Cardère Morières, 81p.
- Morvan D., Dupuy J.L. 2001. Modeling of fire spread through a forest fuel bed using a multi-phase formulation. *Combustion & Flame* Vol.127 pp.1981-1994.
- Morvan D., Dupuy J.L. 2002. *Numerical simulation of the propagation of a surface fire through a Mediterranean shrub*. In Proc. 7th Int. Symp.

- On Fire Safety Science, Boston-Worcester, June 2002.
- Pitts W.M. 1991 – *Wind effects on fires*. Prog. Energy Combust. Sci. Vol.17 pp. 83-134.
- Rigolot E. 2002 - *Fuel-break assessment with an expert appraisal approach*. 4. International Conference on forest fire research / 2002 Wildland fire safety summit, Luso (PRT), 2002/11/18-23. Millpress, Rotterdam (NLD).
- Viegas, D.X. (ed.), Forest fire research and wildland fire safety. Abstracts book, 14 p.
- Rigolot E., Scheffmann C. 2002 - *Evaluation de l'efficacité des coupures de combustible à dires d'experts*. Wildfire Prevention Strategies of Southern Europe Forests: Forum of Wildfire Risk Management Professionals, Bordeaux (FRA), 2002/01/31 to 2002/02/02. Collection Actes. Ed. Préventives, Bordeaux :133-152.
- Rigolot E. (ed.) 2002 - Du plan départemental à la coupure de combustible. Guide méthodologique et pratique. La Cardère, Morières (FRA). Réseau Coupures de Combustible (FRA), no. 6, 48 p.
- Saveland, J.M. ; Neuenschwander, L.F. 1990. A signal detection framework to evaluate models of tree mortality following fire damage. *Forest Science* 36(1): 66-76.
- Valette, JC. ; Rigolot, E. ; Etienne, M. 1993. Intégration des techniques de débroussaillage dans l'aménagement de défense de la forêt contre les incendies. *Forêt Méditerranéenne*, XIV(2): 141-154.
- Wilson, A.G. 1988. Width of firebreak that is necessary to stop grass fires: some field experiments. *Canadian Journal of Forest Research*, (18): 682-687.
- 

## Réflexions libres du "Comité de Lecture"

### 1.- Évaluation de l'efficacité des coupures de combustible "à dires d'experts"

J'insisterais tout particulièrement, sur le travail remarquable réalisé par les "experts", pompiers et forestiers, qui ont participé à cette étude. La méthodologie utilisée ici, semble spécialement bien adaptée aux aspects humains (voire psychiques) de la relation de fascination qui existe, depuis des millénaires, entre l'Homme et le Feu (Cf. Gaston BACHELARD).

Ainsi, tous les experts ont fait montre d'une hantise toute particulière vis-à-vis du "feu de cime", sur ces coupures, même bien débroussaillées. Pourtant ce phénomène semble considéré, par les spécialistes, comme rarissime (voire mythique !). Ceci montre bien l'urgence d'une recherche approfondie, précisant formellement les risques réels du "feu de cime" sur ces coupures, suivie d'une formation indubitable auprès de toutes les personnes concernées. Dans ce domaine l'approximation et les préjugés, ne sont plus de mise !

Par ailleurs, on remarque une nette différence entre le relatif sentiment de confiance que les forestiers, responsables actuels, portent à ces coupures, et celui, plus mitigé, des pompiers qui en sont les principaux utilisateurs. Ceci est compréhensible, mais reste, malgré tout, inadmissible ! Aussi paraît-il très important de souligner, avec les auteurs de cet article, l'urgence, ici encore, d'une concertation étroite entre forestiers et pompiers dans ce domaine, comme cela se pratique, déjà, en Corse.

Enfin, il est un peu surprenant que, dans cette étude, l'importance du phytovolume (herbacées, broussailles et branches basses) sur ces coupures, soit si peu prise en compte par les experts, de même d'ailleurs que l'effet du couvert sur sa limitation !... Il est vrai que, d'une part, nous sommes ici sur des coupures débroussaillées tous les trois ou quatre ans et que, d'autre part, les peuplements d'origine, à couvert suffisamment sombre pour contrôler les broussailles, sont très rares (en dehors du cas, signalé, des yeuseraines). Mais il sera sans doute, utile d'y revenir, car le rapport coût/efficacité entre entretiens fréquents et risque de feu de cime (sans broussailles), pourrait bien changer dans les années à venir... si les recherches, souhaitées ci-dessus, aboutissent !

### 2.- Simulation numérique du comportement du feu

On remarque que les recherches dans ce domaine, ont très sérieusement avancé depuis l'article de J.L. DUPUY (Cf. F.M. T.XXI n°4, 2000), et, malgré les limites de la méthode mises, justement, en évidence par les auteurs, on voit apparaître dans l'exposé et surtout sur les figures 2 et 3, des phénomènes (colonne de convection ; tourbillons de fumées ("lourdes") et même "contre-vent" en avant de l'incendie ; feu de cime ; etc...), qui, jusqu'à présent, étaient très peu étudiés et réservés aux spéculations empiriques, comme celle, remarquable, de C.-A. CARRETERO en 1968 (Cf. F.M. T.X n°2, 1988). Cette nouvelle approche devrait permettre une meilleure connaissance du comportement des grands incendies (voire de phénomènes encore plus rares comme les "tempêtes de feu"), ainsi que du fonctionnement de techniques d'extinction encore très mal connues, comme le "feu tactique" et surtout, le "contre-feu" !

Bravo à Éric, Dominique et les autres ! Voilà de la "belle ouvrage" ... et du pain (du pin ?) sur la planche pour le G.I.S.!

Guy BENOIT de COIGNAC, Directeur de la publication

## Résumé

Cette étude vise à identifier les principes de conception des coupures de combustible qui favorisent leur efficacité et à déterminer les seuils opérationnels pour les principaux paramètres retenus. Deux approches ont été utilisées.

D'une part, l'approche par modélisation qui permet de simuler le comportement de différents types de coupures de combustible selon différents scénarios d'incendie. Les premiers résultats obtenus par cette méthode sont exposés démontrant tous les espoirs fondés dans cette démarche.

D'autre part, l'approche à dires d'experts repose sur l'évaluation « à froid » d'infrastructures existantes par des pompiers et des forestiers rompus à la lutte contre les incendies. Ces experts ont rempli un formulaire donnant leur opinion sur l'efficacité des segments d'une centaine de mètres de longueur d'aménagements soumis à différents scénarios d'incendie. Trente et un segments ont été évalués et toutes les données de topographie, de végétation et de dendrométrie ont été mesurées.

L'analyse statistique multivariée révèle que les critères les plus discriminants pour l'évaluation de l'efficacité d'une coupe de combustible sont : la largeur, le volume de broussaille et le recouvrement des arbres. Des modèles logistiques ont pu être ajustés pour prédire la probabilité d'arrêt du feu en fonction des caractéristiques des coupures. Une conclusion importante de cette étude est que contrairement à l'idée répandue, la composante arbre est extrêmement importante alors qu'actuellement l'entretien des coupures se focalise sur la maîtrise de l'embroussaillage. Les implications pratiques de ces résultats sont discutés.

## Summary

### Assessment of the effectiveness of fire breaks in two ways : expert opinion and modeling

This study aims to identify the principles underlying firebreak design which maximise their effectiveness and, also, the operational thresholds for such principles.

Two approaches were used : the modeling approach which has permitted the simulation of the way different types of break work in various wildfire scenarios. The first results obtained are presented here and justify the expectations for this method.

The expert appraisal approach was based on an evaluation of existing infrastructure done "dispassionately" by skilled firemen and forestry professionals widely experienced in firefighting. Such experts filled in a form giving their opinions on the efficacy of 100-metre long sections of installed breaks of differing configurations subjected to various wildfire scenarios. Thirty one sections were assessed at field sites : all vegetation was described and topographical and dendrological data measured.

Multivariate descriptive statistical analysis has shown that the most pertinent criteria for the assessment of the effectiveness of a break are : its width, the quantity of brushwood and the extent of tree canopy cover. Logistical models were adjusted to the data to predict the probability of the stopping of a fire as a function of the characteristics of the firebreak.

An important conclusion of this study has been that a tree component factor is extremely vital, a finding that contrasts with the belief held up to now that design and upkeep of firebreaks should focus on controlling shrub and brush growth. The practical implications of the results are also considered.

## Riassunto

### Valutazione dell'efficacia dei tagli di combustibile da due approcci : a dette degli esperti e modellizzazione

Questo studio mira a identificare i principi di concezione dei tagli di combustibile che favoriscono la loro efficacia e a determinare le soglie operative per i principali parametri trattenuti.

Due approcci sono stati utilizzati : l'approccio dalla modellizzazione che permette di simulare il comportamento di vari tipi di tagli di combustibile secondo diversi scenari di incendio. I primi risultati ottenuti da questo metodo sono esposti dimostrando tutte le speranze fondate in questa pratica.

L'approccio a dette degli esperti grava sulla valutazione "a freddo" d'infrastrutture esistente da vigili del fuoco e forestali di grande esperienza nella lotta contro gli incendi. Questi esperti hanno compilato un formulario dando la loro opinione sull'efficacia dei segmenti di un centinaio di metri di lunghezza di sistemazioni sottomesse a vari scenari di incendio. Trentuno segmenti sono stati valutati e tutti i dati topografici di vegetazione e dendrometrici sono stati misurati.

L'analisi statistica multivariata rivela che i criteri più discriminanti per la valutazione dell'efficacia di un taglio di combustibile sono : la larghezza, il volume di cespugli e il ricoprimento degli alberi. Modelli logistici sono potuto essere adattati per predire la probabilità di arresto del fuoco in funzione delle caratteristiche dei tagli. Una conclusione importante di questo studio è che contrariamente all'idea diffusa, la componente albero è estremamente importante mentre attualmente il manutenimento dei tagli si focalizza sul dominio del incespugliamento. Le implicazioni pratiche di questi risultati sono discussi.