

## PRESENTATION DETAILLEE DU PROJET

### 1. Contexte finalisé

Les coupures de combustible sont des aménagements préventifs essentiels à la politique de DFCl suivie en région méditerranéenne française.

L'ensemble des recherches et études conduites sur ces coupures ont essentiellement porté, jusqu'à présent, sur leur caractérisation en terme d'implantation et d'accès, d'équipements de lutte, de composition et de structure de la végétation présente, sur les techniques ou combinaison de techniques mises en œuvre pour assurer leur entretien, et sur leur évaluation économique.

Ces travaux sont pour l'essentiel réalisés dans le cadre du Réseau Coupures de Combustible, qui est composé des principaux partenaires des secteurs de la recherche, du développement et de la gestion des aménagements préventifs de la région méditerranéenne. Dans ce cadre, une base de données relatives à une soixantaine d'aménagements DFCl est régulièrement mise à jour.

Les quelques travaux recensés sur l'évaluation de l'efficacité des coupures de combustible ont été initiés par ce réseau et concernent l'analyse de la résistance de coupures atteintes par un incendie (Lambert, 1994).

L'objectif premier d'une coupure de combustible, en termes de DFCl, est qu'un feu incident ne puisse la franchir. L'efficacité locale, c'est à dire l'efficacité à l'échelle d'un segment de coupure (une centaine de mètres) que l'incendie est supposé atteindre suivant un scénario donné, doit être appréciée en ce sens. On peut convenir que dans une majorité de situations, une coupure non défendue par les forces de lutte est franchie par l'incendie.

Le problème posé par l'évaluation de l'efficacité locale d'une coupure est donc avant tout celui d'évaluer la possibilité de combattre l'incendie qui s'y propagerait.

Des éléments d'appréciation de l'efficacité locale d'une coupure de combustible permettraient d'apporter une aide à la décision à la fois aux gestionnaires chargés de la conception de coupures ou de la programmation de travaux d'entretien, et aux services de lutte contre les incendies utilisateurs de l'ouvrage. A ce jour, seuls des seuils d'embroussaillage très empiriques sont disponibles à cet effet. Cette démarche devrait conduire à une optimisation des dépenses engagées pour la conception et l'entretien des ouvrages de prévention.

La finalité de ce projet est donc de proposer des critères d'évaluation plus pertinents, qui prennent mieux en compte le rôle des caractéristiques de la végétation du segment de coupure et de son voisinage, ainsi que de l'implantation et des équipements de ce segment, sur son niveau d'efficacité selon les conditions météorologiques locales.

### 2. Contexte scientifique et approches retenues

Deux composantes conditionnent pour l'essentiel la possibilité d'arrêter un incendie se produisant suivant un scénario donné (conditions météorologiques, configuration du feu) sur un segment de coupure :

- les caractéristiques attendues du feu incident et du feu sur la coupure,
- la perception du niveau de sécurité des moyens engagés et du niveau de difficulté de la lutte.

Deux approches complémentaires sont proposées pour tenir compte de ces deux composantes. La première approche passe par la modélisation physique du comportement du feu (dite approche par modélisation). La seconde passe par l'expertise effectuée par des pompiers, et plus largement par des personnes ayant une expérience de la lutte contre les incendies de forêt (dite approche à dire d'expert).

#### 2.1. L'approche par modélisation

En termes généraux, le problème posé est de caractériser, pour un scénario donné, le feu pleinement développé dans la zone non débroussaillée (feu incident), le feu sur le segment de coupure et le feu à l'interface entre le peuplement et la coupure.

Récemment, une approche de modélisation physique du comportement du feu qui fournit un cadre théorique robuste pour la description du phénomène, a été développée par l'Institut Universitaires des Systèmes Thermiques Industriels (IUSTI) dans le cadre du programme de recherche européen EFAISTOS1. Dans cette approche dite « mécaniste », le feu de forêt est considéré comme un écoulement multiphasique, réactif et radiatif.

1 Contrat européen financé par la DG XII. EFAISTOS = Experiments and simulations for improvement of behavior models of forest fires (Septembre 1996 – Août 1998).

Les équations monophasiques de bilan (masse, quantité de mouvement, espèces chimiques et énergie) qui permettent de décrire ce type d'écoulement, équations de Navier-Stokes généralisées, ont été étendues, grâce à une procédure de pondération spatiale, au cas de l'écoulement d'un gaz (phase gazeuse) au sein d'une matrice constituée d'autant de types de particules solides qu'on le souhaite (phases solides) (Larini *et al.* 1998). Cela conduit à un système d'équations aux dérivées partielles dépendant du temps et, dans le cas général, des trois variables d'espace.

Dans le principe, la représentation du phénomène que fournissent ces équations permet de traiter les situations que les modèles jusqu'ici produits (par exemple Rothermel (1972), Pagni et Peterson (1973), Albin (1985, 1986)) ne pouvaient pas décrire. Du point de vue des hypothèses physiques, la dimension temps et toutes les dimensions d'espace peuvent être prises en compte, les bilans qui traduisent les principes physiques de conservation sont vérifiés (seule la conservation de l'énergie était vérifiée dans les modèles précédents et dans un espace limité à l'avant du front de feu), les mécanismes de base du phénomène sont pris en compte (pyrolyse, combustion homogène et hétérogène, rayonnement gazeux, effets aérodynamiques, transferts thermiques entre phases). La répartition spatiale non homogène des différents types de particules combustibles (phases solides), donc les discontinuités, peut être décrite complètement.

Cependant, cette approche mécaniste associée à une description multiphasique du milieu combustible, en est à ses premiers développements dans le domaine de la modélisation des feux de forêt et n'est pas exempte de limites. Ces limites ont deux grands types d'origines :

- la connaissance insuffisante de certains mécanismes de base, qui est formalisée par ce qu'on convient d'appeler des sous-modèles,
- la non-concordance possible entre l'échelle nécessaire à la description de ces mécanismes et l'échelle souhaitée pour la prédiction quantitative du phénomène.

Les problèmes d'échelle sont à relier en pratique aux contraintes du calcul numérique, utilisé pour résoudre les systèmes d'équations. Pour une échelle donnée de description des mécanismes de base (i.e. maille), les temps de calcul augmentent avec la taille de l'espace et la durée d'évolution qu'on souhaite simuler.

Aujourd'hui, les simulations se font, en deux dimensions d'espace (plan vertical), à l'échelle classique des expériences de laboratoire (du mètre à quelques mètres dans la direction de propagation d'un feu de strate basse et quelques dizaines de secondes jusqu'à l'obtention d'un régime permanent).

Les coupures de combustible imposent des échelles de prédiction du phénomène qui sont plus importantes que celles nécessaires à la simulation d'expériences de laboratoire, sans atteindre des échelles de l'ordre de celles du massif forestier où, dans l'état actuel des connaissances, l'utilisation de cette approche de modélisation physique « complète » serait tout à fait irréaliste.

La problématique soulevée par l'évaluation de l'efficacité des coupures de combustible offre ainsi un cadre très attractif à la fois pour montrer les potentialités de l'approche mécaniste, qui doit se concevoir dans le long terme, pour l'éprouver, et pour améliorer le contenu des modèles qu'elle produit.

## 2.2. L'approche à dires d'expert

Cette approche repose sur le recueil d'avis d'experts mis en situation sur des segments de coupures de combustible préalablement décrits avec précision (végétation, topographie, équipements). Il s'agit, pour un segment et un scénario donnés, de demander aux experts :

- d'évaluer les caractéristiques attendues du feu incident et du feu sur la coupure (caractéristiques observables en situation de terrain),
- de fournir des informations en relation avec la lutte contre l'incendie pour identifier les points faibles de la coupure à cet égard,
- d'émettre un avis sur le risque de franchissement de ce segment de coupure par le feu et les raisons de ce risque.

Une fois recueillie cette connaissance, il convient de mettre en relation le niveau d'efficacité de la coupure avec les caractéristiques du segment de coupure et les scénarios envisagés. L'efficacité dépend de critères à identifier et à combiner pour définir des niveaux. A cet effet, on peut envisager deux méthodes distinctes et complémentaires :

- une méthode statistique qui permette d'établir selon le scénario une correspondance entre niveaux d'efficacité et caractéristiques du segment,
- une méthode de formalisation et d'exploitation des connaissances qui permette d'identifier le raisonnement suivi par les experts pour apprécier en définitive le risque de franchissement de la coupure.

La perspective à long terme de cette approche est de généraliser cette correspondance et/ou ce raisonnement, à un ensemble de segments de coupures qui n'auront pas été expertisés. Dans le cadre du présent projet, il s'agit d'évaluer la faisabilité de cette approche et d'identifier les critères d'évaluation nécessaires à une généralisation ultérieure.

En terme scientifique, l'intérêt de l'approche à dire d'expert réside dans la mise au point de méthodes adaptées à l'analyse et la structuration d'informations tirées du retour d'expérience de la lutte contre les incendies de forêt.

### 2.3. La complémentarité des approches et la recherche de règles pour l'aide à la décision

L'approche par modélisation ne permet pas de fournir directement une évaluation de l'efficacité. En revanche, elle permet de déterminer objectivement des critères relatifs au comportement attendu du feu. Il convient donc d'en tirer des éléments synthétiques contribuant, avec la connaissance tirée de l'approche à dire d'expert, à quantifier le niveau d'efficacité d'un segment de coupure.

L'efficacité locale d'un segment de coupure constitue un des critères conditionnant les décisions du gestionnaire ou des services de lutte quant aux actions à conduire. Le niveau de ce critère doit être traduit en termes de règles pour l'action :

- seuils d'embroussaillement,
- seuils caractérisant les discontinuités dans la répartition du combustible,
- espèces végétales à favoriser ou éliminer,
- largeur locale de la coupure et équipements nécessaires (pistes, bandes décapées,...)

## 3. Démarche scientifique

### 3.1. Description des coupures de combustible

Une description précise sera réalisée en s'appuyant sur les acquis en matière de typologie des coupures (rapport Cochelin) et sur les ouvrages suivis dans le cadre du Réseau Coupures de Combustible et présents dans la base de données du réseau. Les critères de classification comprendront le caractère arboré ou non, le faciès de végétation, le niveau d'embroussaillement, les caractéristiques de l'ouvrage...

Cette description sera utilisée pour choisir les coupures dont les segments serviront de support au projet (segments expertisés, types de combustible supposés par la modélisation).

### 3.2. Description du combustible

Il s'agit de caractériser la végétation en termes de quantité, de composition et de structure. La description passe par la détermination de la hauteur et du recouvrement de chacune des strates (couverture morte et herbacée, strate arbustive et strate arborée), par espèce. Elle doit aussi comporter une information précise sur la fragmentation du couvert à travers un indicateur qui reste à définir. Cela suppose de spatialiser les mesures décrites ci-dessus.

De plus, pour mener à bien l'approche par modélisation, il faut aussi connaître la composition en familles de particules combustibles (feuilles, rameaux et branches par classes de diamètre) pour chaque espèce considérée. Les caractéristiques physiques de ces particules doivent être par ailleurs déterminées au laboratoire (forme, surface spécifique, densité, courbes de pyrolyse) ou tirées de la littérature. Cette description fine nécessitera des mesures destructives réalisées sur quelques espèces typiques.

Dans le cadre de ce projet, on se focalisera sur un nombre réduit de communautés végétales représentatives (voir paragraphe 3.1.)

### 3.3. Modélisation du comportement du feu

Actuellement, trois modèles ont été dérivés des équations générales issues de l'approche mécaniste. Ils correspondent à des finesses de description des mécanismes très différentes et se distinguent par le nombre de dimensions prises en compte. Ces modèles comportent des limites qui ont été décrites dans le contexte scientifique. Ils nécessitent donc d'être améliorés, adaptés aux situations particulières rencontrées sur les coupures, et validés par l'expérience.

#### *Modèles disponibles*

Un modèle, que nous appelleront *modèle « complet »-2D* (Porterie *et al.* 1998), décrit l'évolution des variables d'état dans le temps et dans un espace à deux dimensions (x direction de propagation, z la verticale). Il prend en compte les mécanismes physico-chimiques de base et inclut les effets de la turbulence et le rayonnement du milieu mixte gaz/suies.

Un *modèle dit quasi-2D* (Giroud 1997) décrit l'évolution des variables d'état dans le temps et dans une direction d'espace (x) pour une strate de combustible de propriétés uniformes comportant plusieurs types de particules solides. Certains mécanismes ne sont pas pris en compte explicitement (turbulence, rayonnement du mélange gaz/suies).

Un *modèle dit quasi-2D stationnaire* (Dupuy 1997) prédit essentiellement la vitesse de propagation d'un feu en régime permanent pour une strate de combustible de propriétés uniformes comportant un type de particules solides. Certaines simplifications physiques sont opérées par comparaison au modèle quasi-2D précédent.

Les deux modèles quasi-2D permettent de travailler à une échelle sensiblement plus grande que celle du laboratoire, pourvu que le combustible puisse être considéré comme uniforme (exemples : le feu incident dans la zone non débroussaillée, le feu sur la coupure en absence de discontinuités fortes). En revanche, pour le modèle « complet »-2D, les solutions numériques sont aujourd'hui calculées à l'échelle du laboratoire, l'extension à des échelles plus grandes est envisageable, mais doit être progressive et prudente.

#### *Travaux proposés*

Ces travaux ont pour but d'une part de fournir les ordres de grandeur des caractéristiques du feu incident sur le segment de coupure, d'autre part de traiter les problèmes de discontinuité rencontrés sur les coupures et cela en deux étapes : une étude à une échelle fine sur des systèmes isolés (un arbuste et un arbre), puis la recherche de modèles approchés permettant de décrire les phénomènes à une échelle plus grande.

A cet effet, trois grands groupes de travaux de modélisation sont proposés.

Le premier groupe consiste en l'amélioration de modèles approchés de propagation en strate uniforme, s'appuyant sur l'approche mécaniste. Ces modèles sont adaptés à la description du feu incident sur le segment de coupure, ou d'un feu courant sur la coupure pourvu que les discontinuités soient faibles. La description de la végétation peut en effet se faire classiquement par une strate unique supposée assez homogène.

Les modèles quasi-2D constituent une base de départ solide pour ce travail. Leur amélioration sera appréciée sur la base d'expériences de laboratoire (banc thermique) déjà existantes (Dupuy 1997) et éventuellement d'expériences complémentaires. Leur validation implique des expériences indépendantes et peut aussi être envisagée sur la base de feux de terrain conduits dans une strate basse sans discontinuité.

Le second groupe consiste à réaliser des simulations à l'aide du modèle « complet » -2D à une échelle de prédiction *a priori* adaptée à la description des mécanismes de base.

Il s'agit de simuler le passage du feu d'une touffe à une touffe voisine, ou d'une touffe à un houppier (coupure arborée), ou encore la possibilité de propagation d'un houppier à un houppier voisin (coupure arborée).

Dès lors que le changement d'échelle est raisonnable et bien maîtrisé, la validation du modèle « complet »-2D sur la base d'expériences de laboratoire, même en conditions homogènes, est suffisante.

Le troisième groupe consiste, à l'aide des résultats des simulations précédentes, à concevoir des modèles approchés pour traiter les problèmes spécifiques du passage de touffe à touffe, de touffe à houppier ou de houppier à houppier, qui permettent d'étendre les prédictions à des échelles comparables à celles d'une coupure entière et de prendre en compte le caractère toujours tri-dimensionnel de la réalité de terrain. Des expériences spécifiques, d'abord au laboratoire pour simuler des discontinuités, puis sur le terrain (brûlages dirigés sur des coupures comportant des discontinuités) doivent être conduites pour la validation de ces modèles.

La génération de sautes de feu est aussi un autre problème important pour estimer le risque de franchissement d'une coupure, il pourrait aussi être abordé en terme de modélisation physique. Ce problème des sautes de feu est néanmoins exclu de ce projet dans la mesure où un programme européen (SALTUS) consacré à ce thème débutera en mars 1998.

### **3.4. Approche à dires d'expert**

#### *Recueil de l'information par expertise*

Une grille d'évaluation de l'efficacité de segments de coupures de combustible a été conçue dans le cadre du Réseau Coupures de Combustible et est en cours de validation auprès des différentes catégories d'experts identifiés (forestiers, pompiers, ...). Cette grille permet de recueillir des informations sur les caractéristiques attendues de l'incendie au voisinage de la coupure, puis sur la coupure elle-même (géométrie de la flamme, strate impliquée dans la propagation, distance supportable, niveau de gêne des fumées, probabilité de sautes, ...).

Elle permet aussi d'indiquer les probabilités de franchissement du segment, la possibilité d'y engager la lutte et les chances de succès des manœuvres envisagées.

Elle offre en outre la possibilité de lister des améliorations souhaitables dans la réalisation de l'ouvrage.

Cette grille est remplie dans le cadre de scénarios prédéfinis combinant deux niveaux de vent (modéré, fort) et deux niveaux de type de feu incident (feu de flanc et tête de feu).

Des groupes d'experts seront formés à la finalité de l'opération et à l'usage de cette grille dans quelques départements (Var, Vaucluse, Corse du Sud). Des segments de coupures seront retenus de façon à constituer un échantillonnage comprenant des situations contrastées et des « répétitions » en s'appuyant sur les acquis au paragraphe 3.1.

Il faut prévoir au moins deux campagnes d'expertise qui devront se dérouler préférentiellement pendant la période estivale pour des raisons évidentes de phénologie de la végétation et de mise en condition des intervenants.

#### *Traitement de l'information recueillie*

L'objectif est de mettre en relation des paramètres de description du segment de coupure et des indicateurs d'efficacité. Pour ce faire on procédera en deux temps :

Dans un premier temps, deux approches sont menées en parallèle :

L'approche statistique qui consiste successivement à :

- dépouiller les fiches d'évaluation et analyser la distribution des réponses par segment,
- mettre en classes les paramètres décrivant le segment de coupure et son environnement,
- mettre en classes les indicateurs d'efficacité du segment de coupure,
- établir des relations entre paramètres de description et indicateurs d'efficacité en utilisant les méthodes statistiques de correspondance entre classes.

Les méthodes d'extraction de la connaissance qui sont destinées :

- à analyser le processus de raisonnement suivi par les experts,
- à identifier les indicateurs prépondérants qu'ils utilisent pour évaluer l'efficacité.

Dans un deuxième temps des critères d'évaluation de l'efficacité des coupures seront construits à partir des paramètres pertinents retenus par les deux méthodes. Pour ce faire, un seuil d'efficacité spécifique sera recherché pour chaque indicateur prépondérant en utilisant une méthode statistique de segmentation. Ces indicateurs avec leurs seuils associés seront combinés au sein de modèles d'aide à la décision. Ces modèles prendront la forme, soit d'équations de régression prédisant une probabilité de franchissement du segment de coupure, soit d'une série de règles de production du type « Si condition Alors résultat » structurées dans un arbre de décision.

### **3.5. Validation des résultats**

#### *Feux de validation des modèles de comportement*

Comme déjà mentionné, certaines étapes de l'amélioration des modèles ou de la conception de nouveaux modèles, nécessiteront d'être validées en réalisant des feux expérimentaux de laboratoire (banc thermique).

Dans le cadre de ce projet, où des changements d'échelle de prédiction seront opérés (troisième groupe de travaux de modélisation), il convient aussi de conduire quelques brûlages dirigés sur coupures destinés à la validation. Les conditions de brûlage devront si possibles être bien différenciées en terme de structure du combustible et de scénarios météorologiques. Bien entendu, ces feux expérimentaux ne peuvent pas être conduits dans les périodes où les conditions sont les plus sévères.

Afin de faciliter les comparaisons avec les prédictions des modèles, il est nécessaire de réaliser les mesures météorologiques de base, de décrire le combustible et son état hydrique aussi précisément qu'il est possible, et de réaliser des mesures sur le feu aptes à bien valider les modèles de comportement.

Sur ce dernier point, il faudra suivre l'évolution spatio-temporelle du feu, mais aussi noter les événements qualitatifs importants (passage de touffe à touffe ou non, passage aux cimes localisé,...), et inclure, si les contraintes pratiques le permettent, des mesures physiques (températures et flux).

#### *Analyses après incendies*

Le Réseau Coupures de Combustible suit une soixantaine d'ouvrages sur la façade méditerranéenne.

Chaque été, certains d'entre eux sont touchés par des incendies qui font alors l'objet d'une analyse selon un protocole standard (Lambert 1994). A chaque occasion, ces analyses seront poursuivies pour enrichir la liste des cas de figure documentés.

Des rapprochements seront effectués entre ces études de cas et les segments analysés dans le cadre de l'approche à dire d'expert. Ces rapprochements se faisant sur la base de la structure de la végétation et du contexte météorologique, ils permettront une validation partielle des critères d'évaluation proposés.

Enfin, les enseignements des retours d'expérience effectués par les services de lutte sur des coupures similaires aux coupures étudiées seront intégrés dans ces analyses.

### Références bibliographiques

- Albini F A, 1985.- A model for fire spread in wildland fuels by radiation. *Combust. Sci. and Tech.* 42 : 229-258.
- Albini F A, 1986.- Wildland fire spread by radiation – a model including fuel cooling by natural convection. *Combust. Sci. and Tech.* 45 : 101-113.
- Dupuy J L, 1997.- Mieux comprendre et prédire la propagation des feux de forêts : expérimentation, test et proposition de modèles. Thèse de doctorat. Université Claude Bernard (Lyon I). INRA Avignon. 272 p.
- Giroud F, 1997.- Contribution à la modélisation de la propagation des feux. Approche multiphasique des feux de forêt. Développement d'un feu de propergol en milieu semi-confiné. Thèse de doctorat. Université de Provence. IUSTI. 198 p.
- Lambert B, 1994.- Une coupure stratégique pastorale à l'épreuve du feu dans les Pyrénées-Orientales, bilan et évaluation. Réseau Coupures de Combustible, 24 p. + annexes.
- Larini M, F Giroud, B Porterie et J C Loraud, 1998.- A multiphase formulation for fire propagation in heterogeneous combustible media. *Int. J. Heat Mass Transfer* . Vol. 41 N°6-7 pp 881-897.
- Pagni P J and T P Peterson, 1973.- Flame spread through porous fuels. 14<sup>th</sup> Symposium (International) on combustion. USDA Forest Service, Washington, D.C. The Combustion Institute, Pittsburgh. 1099-1107.
- Porterie B, D Morvan, M Larini and J C Loraud, 1998.- Wildfire propagation : a two-dimensional multiphase approach. Accepté dans la revue russe « *Physica Goreniya i Vzryva* », soumis à la revue « *Combustion, explosion and shock waves* ».
- Rothermel R C, 1972.- A mathematical model for predicting fire spread in wildland fuels. USDA Forest Service Research Paper INT-115, 40p.