

Mise au point d'une typologie de combustibles pour la Basse Provence calcaire

par Olivier CHANDIOUX, Corinne LAMPIN-MAILLET,
Marielle JAPPIOT et Thomas CURT

La typologie de combustible est un outil qui permet d'intégrer le comportement du feu dans la gestion des milieux et dans la planification, à l'échelle d'un massif forestier. Le Cemagref d'Aix-en Provence, sur la base de descriptions de végétation situées en Basse Provence calcaire, a bâti une typologie des structures de végétation et a pu caractériser le comportement du feu, dans chacun des onze types de combustibles construits. Cette typologie offre des possibilités de cartographie traditionnelle ou par analyse d'image et est aisément utilisable par les gestionnaires sur d'autres territoires.

Introduction

Les espaces naturels occupent d'importantes surfaces dans la zone méditerranéenne française : 60 % des 80 000 km² des quinze départements soumis au climat méditerranéen (CORINE LAND COVER 2000). Ces continuums forestiers sont à l'origine d'incendies de grande ampleur et d'intensité élevée, du fait de l'accumulation de végétaux fortement combustibles et de conditions climatiques estivales souvent sévères, susceptibles de s'aggraver dans les années à venir.

La problématique des incendies de forêts en région méditerranéenne française concerne, non seulement les espaces très forestiers, au contact des zones urbanisées, mais aussi les zones d'interface. En effet, celles-ci, du fait de la déprise agricole et pastorale, ainsi que de l'extension concomitante de la forêt et de l'urbanisation, se sont développées en limite des espaces forestiers et sur les zones d'accrus, et sont à l'origine de difficultés de Défense des forêts contre l'incendie (DFCI), dans les territoires soumis au risque d'incendie (LAMPIN *et al.*, 2006).

L'agglomération urbaine d'Aix-en-Provence – Marseille n'échappe pas à ce processus, troisième agglomération de plus de 500 000 habitants la plus boisée de France, avec 35% de taux de boisement (IFN, 2006), les activités humaines, présentes dans ses interfaces, constituent non seulement les enjeux principaux de la lutte contre les incen-

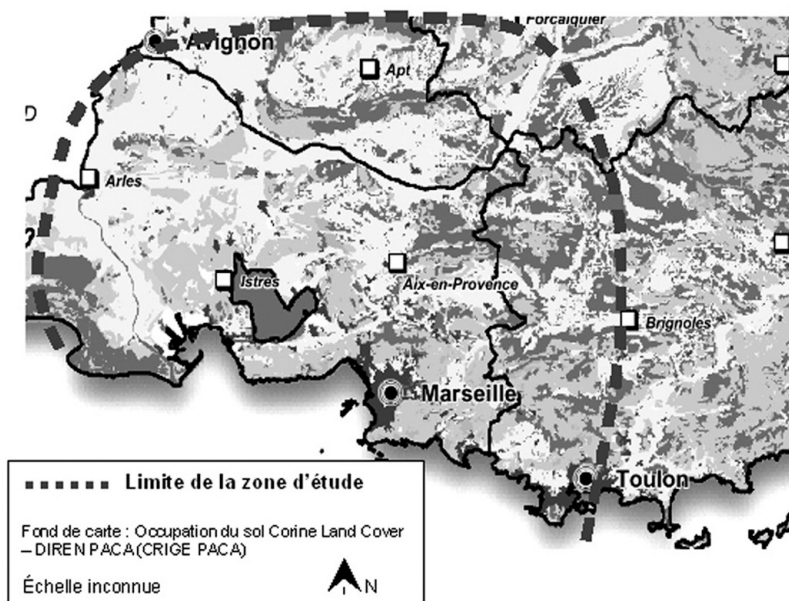
dies, mais sont également des sources potentielles de départ de feu (JAPPIOT *et al.*, 2003). Ainsi, c'est dans cette zone géographique que se concentrent l'essentiel des problèmes d'entretien et de gestion de la végétation combustible. La prévention des risques et l'aménagement des forêts contre l'incendie doivent donc s'affiner dans ces régions où s'interpénètrent les zones de végétation soumises aux incendies de forêts et celles liées aux dynamiques d'urbanisation.

Parmi les documents de prévention des incendies de forêts dont disposent les aménageurs, on peut distinguer : d'une part, les Plans intercommunaux de débroussaillage et d'aménagement forestier (PIDAF) et les Plans de massif "PFCI" et, d'autre part, les Plans de prévention des risques incendies de forêt (PPRIF).

Les premiers, dont l'objectif est la gestion et la prévention des risques d'incendie, comportent une analyse et une cartographie des formations forestières et de l'aléa d'incendie de forêt, au travers, notamment, de la combustibilité et de l'inflammabilité des formations végétales. Ces cartes sont généralement obtenues par l'estimation du niveau de combustibilité de l'essence dominante pour chaque type de formation forestière de l'Inventaire forestier national (HÉTIER, 2004).

Fig. 1 :

Carte de la zone d'étude



Pour les seconds, qui sont avant tout des documents réglementaires urbanistiques, des méthodes comparables peuvent être également appliquées pour cartographier l'aléa, étape nécessaire dans la prise en compte du risque à l'échelle cadastrale et en le reliant au comportement du feu (JAPPIOT *et al.*, 2002).

Alors que, dans le cadre de la prévention des incendies de forêt, il paraît nécessaire de prévoir le "comportement du feu" dans les différents types de peuplements, il n'existe pas, en France, de "typologie du combustible" comparable à celle développée par le NFFL (*National Forest Fire Laboratory*) aux Etats-Unis (ANDERSON, 1982 ; ROTHERMEL, 1983) ou par l'ICONA (*Instituto nacional para la conservación de la naturaleza*) en Espagne (MAPA 1989, LOPEZ 1993). En France, l'outil couramment employé est l'Indice de combustibilité (ALEXANDRIAN, 1982), indice mis au point par une démarche à dire d'expert sur la végétation de l'Hérault et intégrant le biovolume de la formation et une note de combustibilité (entre 1 et 8) pour les ligneux hauts et les ligneux bas.

L'objectif général des travaux menés, ici, par le Cemagref, est donc de décrire les types de formations végétales arbustives et arborées en Provence calcaire, puis de comprendre le comportement du feu dans chacun d'entre eux, de manière à établir des "types de combustibles". L'objectif final est de hiérarchiser et de caractériser ces formations végétales par rapport à des critères de combustibilité (vitesse de propagation du feu, intensité du feu, etc.).

La naissance des premiers modèles de combustible date de presque un siècle. Concernés par le risque d'incendie de forêts, les forestiers américains ont, en effet, cherché à développer des méthodes pour évaluer le risque (DUBOIS, 1914) et, dans ce but, ils ont vite établi trois modèles de combustibles simples (herbacées, buissons, forêts). Les travaux se sont poursuivis dans le NFFL aux Etats-Unis (ANDERSON, 1982), conduisant à une typologie, valable pour l'ensemble des Etats-Unis, relative à quatre types de végétation contribuant aux feux de surface : les herbacées, les buissons, la litière sous couvert forestier et les rémanents de coupe (ROTHERMEL, 1983). Cette typologie a été reprise et adaptée : en Espagne, par l'ICONA, qui a mis au point une clé photographique de reconnaissance des types de combustibles présents dans dix régions forestières (MAPA, 1989 ; LOPEZ, 1993) et en

Italie, par MARCHETTI et LOZUPONE (1995). Il existe en outre un grand nombre de typologies du combustible à travers le monde, mais la plupart ont une valeur très locale (BELTRAN *et al.* 2002) et un grand nombre d'entre elles sont construites sur la connaissance empirique du comportement du feu (TRABAUD 1971 ; PETRUCCI 1992 ; SALAS *et al.* 1994).

Le logiciel de propagation du feu *Farsite* (FINNEY, 1998), basé sur les modèles de combustibles du NFFL, a été utilisé en France dans les Alpes-Maritimes (VIVIEN 1999), sur la végétation de la zone d'étude, en rapprochant les types de végétation locale aux modèles types du NFFL, ce qui a conduit l'auteur à préconiser la création de modèles de combustibles qui soient adaptés à la végétation méditerranéenne française.

L'objectif de cet article est donc de proposer une méthode originale de typologie de la végétation combustible, spécifique à la Provence calcaire, utilisant le logiciel *Behave* (ANDREWS *et al.* 2004) pour décrire certaines caractéristiques du comportement du feu.

Cette typologie doit être simple d'utilisation et accessible aux gestionnaires de terrain, en s'appuyant sur des critères de reconnaissance élémentaires, accompagnés d'une clé photographique. La possibilité de cartographier les types de combustibles est, par ailleurs, indispensable à leur intégration dans des cartographies d'aléa, pour la planification du territoire, et doit, notamment, être envisagée à partir de l'analyse de photos aériennes ou d'images satellites.

Protocole d'étude

La zone d'étude

La zone d'étude (Cf. Fig. 1) se situe dans l'Ouest de la Basse Provence calcaire. Elle représente près de 5 500 km², dont 45% sont couverts de forêts et garrigues (IFN).

Le climat de cette région est typiquement méditerranéen avec un déficit pluviométrique estival prononcé et 1 à 2 mois de sécheresse selon GAUSSEN (1953), tandis que le substrat géologique est assez homogène, principalement composé de calcaires durs (BOISSEAU *et al.*, 1992).

Ces facteurs écologiques, associés à une anthropisation très ancienne caractérisée par l'emploi du feu, le surpâturage et un abandon du territoire depuis la moitié du

XX^e siècle, induisent une végétation de garrigues, pinèdes à pin d'Alep (*Pinus halepensis*) et taillis bas de chênes méditerranéens (*Quercus ilex* & *Quercus pubescens*) très propices aux incendies de forêts. Les taillis de chêne représentent 28,5% des 235 577 hectares boisés de la zone d'étude, tandis que les futaies de pin d'Alep, les garrigues et les forêts mélangées représentent respectivement 19,7% ; 18% et 16,7% (IFN 1999, 2003).

En outre, l'urbanisation importante (le "mitage") de cette région, se traduit par une étroite interpénétration des zones urbaines et de la végétation forestière, augmentant la probabilité de départs de feu et la vulnérabilité des habitations (LAMPIN *et al.* 2004).

Échantillonnage et relevés de terrain pour décrire la structure

Un total de 142 relevés (106 pour l'échantillon de départ et 36 pour la validation) a été effectué, d'après un échantillonnage stratifié aléatoire, en fonction de la surface couverte par les formations et des essences forestières dominantes, présentes dans les différentes régions identifiées par l'Inventaire forestier national sur l'ensemble de la zone d'étude.

Une placette de relevé est constituée par un peuplement forestier homogène en termes de structure de la végétation, mais sans limite (haute ou basse) de surface. Les placettes mesurent entre 500 et 1000 m²,

Photo 1 :
Interface urbanisation-
forêt à Cabriès
Photo Olivier Chandiooux



selon la physionomie et la variabilité spatiale de la végétation.

Les facteurs pris en compte doivent traduire le mieux possible le comportement potentiel du feu et être simples à mesurer. Ils concernent donc :

- la biomasse combustible et sa répartition dans le peuplement forestier (car c'est elle qui influence la puissance du feu) : elle est évaluée par le recouvrement de la végétation dans les différentes strates (0 à 0,5 mètres ; 0,5 à 1 mètre ; 1 à 3 mètres ; 3 à 6 mètres ; 6 à 10 mètres et plus de 10 mètres), de la litière, du bois mort et des mousses et lichens,

- la continuité verticale et horizontale de la végétation combustible, influençant la propagation du feu, au travers : de la hauteur de la première branche morte, de la première branche verte et du type de peuplement.

Les données de recouvrement ou relatives à la description du peuplement, ont été estimées visuellement sur le terrain. Celles concernant la hauteur des strates, arbres, branches mortes... ont été mesurées avec une perche télescopique ou un dendromètre Haga.

Analyse des données

Les données, des 106 placettes de départ, ont été soumises à une chaîne d'analyses statistiques multivariées, notamment à des Analyses en composantes principales (ACP) des variables liées au recouvrement de la végétation par strate de hauteur. Celle-ci a permis de déterminer neuf groupes de relevés présentant des caractéristiques proches en termes de structure de végétation. Les caractéristiques retenues, pour définir ces groupes, sont le recouvrement de la strate

arborée et le biovolume des garrigues. Ces descripteurs ont été choisis pour leur fiabilité et pour la possibilité qu'ils offriraient d'être, éventuellement, reconnus sur des images satellitales.

Une vérification de cette typologie a été réalisée à partir des 36 relevés supplémentaires qui ont permis une validation, grâce à une comparaison des moyennes des facteurs descripteurs.

Une typologie des structures de combustible s'est ainsi constituée, basée sur les neuf groupes identifiés précédemment.

Données supplémentaires nécessaires pour estimer la combustibilité des types de peuplements

Pour estimer la combustibilité des types de peuplement, nous utilisons le logiciel *Behave Plus 2.0* (<http://fire.org/>) et son module de création de modèles de combustibles.

Les données suivantes sont nécessaires pour créer un modèle de combustible :

- * la hauteur du lit de combustible (hauteur de végétation continue depuis le sol) : donnée relevée dans la description de la structure sur le terrain ;

- * les ratios surface/volume et les pouvoirs calorifiques des classes de végétaux décrites ci-dessus : les valeurs données dans *Behave* comme valeur par défaut ont été utilisées ;

- * la biomasse combustible répartie dans les classes suivantes :

- biomasse morte < 0,64 cm (1H) ;
- biomasse morte 0,64 - 2,5 cm (10H) ;
- biomasse morte 2,5 - 7 cm (100H) ;
- biomasse des herbacées vivantes (LHV) ;
- biomasse des ligneux vivants (LWF).

Tab. 1 :
Valeurs moyennes de biomasse du lit de combustible pour les neuf types de combustible décrits dans la figure 3, p. 214

Types de combustible	A	B	C	D	E	F	G	H	I
Profondeur du lit de combustible (en m)	1	0.3	3	1.2	1.2	3	0.8	0.9	2.5
Biomasse (en t/ha)									
1H	16,84	15,50	6,97	7,45	12,78	14,93	14,68	13,69	17,51
10 H	1,29	2,07	0,99	1,78	0,96	1,92	1,70	1,30	1,68
100 H	0,31	0,55	0,34	0,47	0,24	0,66	0,47	0,34	0,52
LHF	1,88	0,74	2,00	2,42	1,69	1,47	1,85	1,48	2,40
LWF	1,16	0,09	5,00	12,34	2,09	5,01	0,72	2,04	3,21
Total	21,48	18,95	15,30	24,46	17,76	23,99	19,41	18,85	25,33

Ces données ont été calculées à partir de prélèvements de terrain, selon la méthode développée dans l'encadré 1 (ci-contre) ;

* la hauteur de la base de la canopée (première branche verte) et la masse volumique des houppiers : la première valeur était mesurée sur le terrain, la seconde était calculée à partir de la hauteur des houppiers, de leur recouvrement et de valeurs moyennes de masse volumique d'espèces connues.

Cf. Tab. I.

Les neuf groupes de relevés ont conduit à la caractérisation de neuf types de structure de végétation qui, pour certains d'entre eux, ont été complétés par des variantes intégrant la spécificité des types de structure de végétation relatives aux peuplements situés en interfaces périurbains et débroussaillés : au total, ce sont onze types de combustibles qui ont été créés et analysés dans le logiciel *Behave Plus*.

Ce logiciel nous a permis de simuler des scénarios de feu de surface en faisant varier la vitesse du vent, la pente et l'humidité du combustible pour un même type de combustible. Nous avons choisi de tester : 2 pentes (0 et 20%), 3 vitesses de vent (0, 30 et 60 km/h) et 3 "scénarios d'humidité" pouvant correspondre aux situations estivales du combustible (combustible mort sec et taux d'humidité des herbacées de 30% ; combustible mort sec et taux d'humidité des herbacées de 60% ; combustible mort assez sec et et taux d'humidité des herbacées de 90%).

Les caractéristiques de combustibilité étudiées sont : la vitesse maximale de propagation et l'intensité du rayonnement du front de flamme, la longueur des flammes, la probabilité de passage en feu de cime et le type de feu prévisible (Cf. Fig. 2).

Un classement des types de combustible a été établi à partir des valeurs obtenues pour ces caractéristiques et tous les résultats, en matière de comportement du feu, sont issus de ces données. Il faut rappeler que le comportement du feu est, principalement, lié à la quantité et à la répartition de biomasse combustible fine et sèche (les aiguilles, feuilles et branches de moins de 6 mm), qui alimente le feu et brûle très vite (ANDREWS *et al.*, 2004).

Fig. 2 :
Comparer les types de combustible à l'aide des résultats de Behave

Méthode d'évaluation de la biomasse combustible

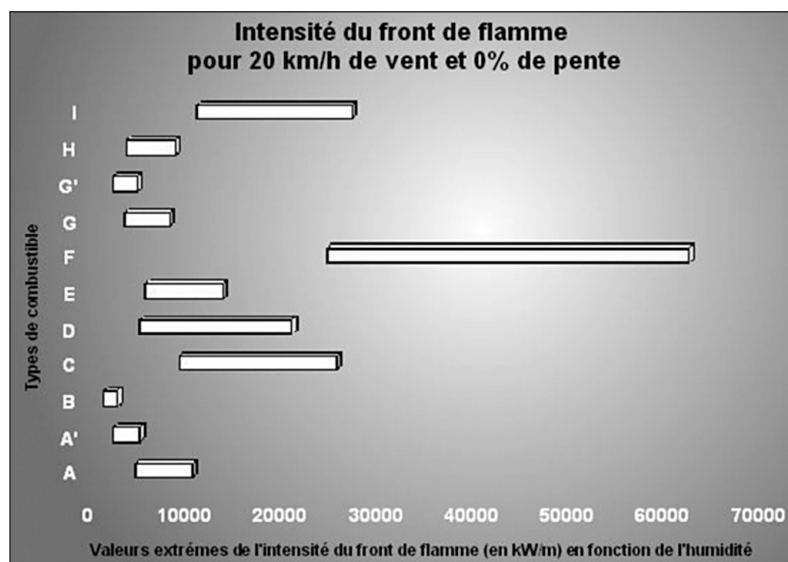
Les peuplements combustibles sont découpés en unités élémentaires pouvant se combiner les unes aux autres (BELTRAN et XANTHOPOULOS, 2002).

Six placettes de 100 m² ont été choisies comme représentatives des unités élémentaires des types de peuplement. Sur ces placettes, l'ensemble du combustible a été prélevé (litière, strate herbacée et arbustes) sur la hauteur du « lit de combustible ». Le combustible a été pesé après séchage en serre et trié selon différentes classes de combustible. Une mesure du taux d'humidité des échantillons a été réalisée par séchage à l'étuve d'échantillons pendant 12 ou 24 h à 100° selon la taille des éléments. On obtient ainsi des résultats de biomasse combustible pour chaque classe recherchée (suite à un calcul de la teneur en eau de la biomasse verte). Les données issues des placettes de mesure de la biomasse ont ainsi été détaillées en fonction de leur appartenance à la litière ou à la strate herbacée et arbustive.



Strates	Recouvrement	Espèces	Mélange pin - chêne b = 40 t/ha
6 à 10 m	20 %	Pin d'Alep	Garrigue claire b = 10 t/ha
3 à 6 m	50 %	Chêne vert	
1 à 3 m	30 %	Chêne vert	Litière pin - chêne b = 15 t/ha
0 à 1 m	30 %	Chêne kermès	
Litière	90 %	Pin - chêne	

Figure : Le concept d'unités élémentaires
b = biomasse



1 - Ici le concept de "feu total" est utilisé pour traduire le terme *Crown fire* utilisé dans *Behave*. Le phénomène est celui du passage du feu se propageant par la végétation basse aux houppiers et une propagation du feu par les broussailles et les cimes des arbres. Sauf exceptions (certains peuplements denses de pin pignon), la propagation par les seules cimes des arbres n'est pas possible.

Résultats

Typologie du combustible : clé photographique

Cf. Fig. 3, ci-dessous.

Les neuf types de combustible et leurs variantes

Type A : peuplement haut fermé

Description du peuplement : ce type rassemble les futaies de pins de tous âges dépassant 12 mètres de hauteur et des peuplements de chênes denses et hauts. Le recouvrement des arbres, de plus de 10 mètres, est toujours supérieur à 60 %. Le sol est généralement couvert d'une litière dense et d'une forte strate herbacée.

Caractérisation de la biomasse : dans ce type de combustible, c'est la litière abon-

dante qui apporte l'essentiel de la biomasse fine combustible (Cf. Tab. I).

Comportement du feu : c'est l'une des formations les plus combustibles en l'absence de vent. Le combustible, s'il est très sec, induit alors des vitesses de propagation et des intensités très fortes. Le feu peut se propager aux cimes des arbres par le phénomène de « torche ».

Dans ce type, le vent est ralenti et perturbé par la forte densité d'arbres hauts, rendant cette végétation moins combustible que des formations ouvertes, sauf si le feu se transforme en feu total¹.

Une variante du type A, notée A' correspond aux formations arborées hautes et denses situées en interface avec l'urbanisation et régulièrement débroussaillées. Le sous-étage y est plus épars et une discontinuité verticale est créée. Dans cette variante, le passage du feu en cime semble impossible, en l'absence de vent.

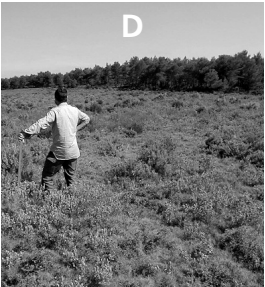
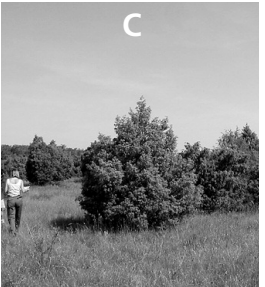
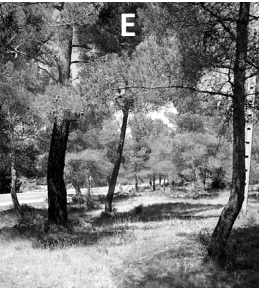
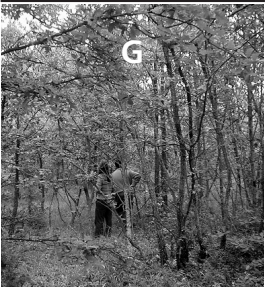
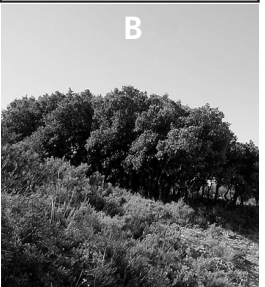

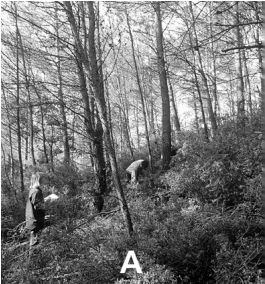
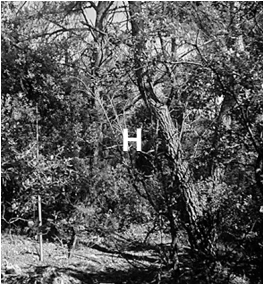

	Garrigue basse	Peuplements forestiers	
		Très ouverts ou garrigue haute	Fortement éclaircis et débroussaillés
Biovolume faible			
	Couvert > 60%	Pas de strate basse	Couvert < 60%
Peuplement : strate arborée < 10 m			
	Couvert > 60%	Couvert des herbacées	
Peuplement : strate arborée > 10 m			
		> 60%	< 60%

Fig. 3 : Clé photographique des types de combustible

Type B : peuplement forestier bas sans sous-étage

Description du peuplement : il s'agit de formations de chêne vert ou de jeunes pins d'Alep très denses ayant éliminé toute végétation en sous-étage. Ce type de peuplement est très rare et ne dépasse jamais 10 m de hauteur.

Caractérisation de la biomasse : l'essentiel de la biomasse fine de ce type de combustible est concentré dans les quelques premiers centimètres formés par la litière.

Comportement du feu : les feux, limités à la litière et protégés du vent par le couvert arboré, sont très peu rapides, peu intenses et les flammes y sont courtes. Cependant, les feux totaux sont possibles dès que le vent se lève et des cas d'embranchement d'arbres sont possibles, en cas de pentes ascendantes, les flammes étant, alors, plus longues et pouvant toucher le houppier des arbres.

Type C : formations pré-forestières ouvertes

Description du peuplement : constitué, par l'ensemble, des formations ouvertes irrégulières, ce type rassemble de jeunes accrus morcelés à pin d'Alep, des landes, des garrigues boisées ou encore des taillis de chêne dégradés.

Caractérisation de la biomasse : discontinuité horizontale du combustible : des secteurs de forte densité de végétation sont séparés par des secteurs de sol nu ou des trouées.

Comportement du feu : le feu y présente un comportement caractéristique, puisqu'il y est, à la fois, rapide et moyennement intense. Ce comportement est lié à une biomasse peu importante où les herbacées et ligneux vivants tiennent une place prépondérante, ainsi qu'à l'absence d'arbres formant un frein au vent. Cette composition induit une forte sensibilité de la vitesse de propagation à l'humidité du combustible.

Type D : garrigues

Description du peuplement : très fréquent en basse Provence, ce type se caractérise par un recouvrement presque nul des végétaux au dessus de 1 mètre de hauteur. Il s'agit de formations régulièrement parcourues par le feu.



De haut en bas :

Photo 2 :

Futaie de pin d'Alep dense à Peyrolles, type A
Photo O.C

Photo 3 :

Garrigue basse à Vitrolles, type D

Photo 4 :

Futaie de pin éclaircie en zone de départs de feu à Ensues, type E
Photos O.C.

Comportement du feu : la vitesse du feu est moyenne dès que le vent est présent mais son intensité est faible si celui-ci est très fort. C'est la densité moyenne de la végétation, combinée à sa hauteur modeste et à sa composition dominée par les ligneux vivants, qui induit ce comportement.

Type E : peuplement forestier fortement éclairci

Description du peuplement : ce type est constitué par tous les peuplements forestiers hauts (Type A, G, H ou I) où une éclaircie forte a été pratiquée dans les 10 dernières années et où la végétation arbustive a été supprimée. Il peut s'agir, aussi bien, de coupes rases de taillis dans des peuplements mélangés, que de bandes débroussaillées de sécurité.

Comportement du feu : toutes les caractéristiques de la combustibilité y sont moyennes.

Type F : peuplement forestier bas ouvert

Description du peuplement : rassemblant des formations résineuses jeunes ou des taillis jeunes ou mal venants, ce type est caractérisé par un recouvrement des arbres

de moins de 60% en dessous de 10 mètres et une végétation très dense en dessous de 3 mètres.

Caractérisation de la biomasse : une continuité verticale est ainsi formée entre les ligneux bas et les ligneux hauts. La biomasse accumulée est très forte et la strate concernée par un feu de surface est très épaisse.

Comportement du feu : cumulant une forte continuité verticale, une biomasse forte et une exposition au vent importante, ce type est le plus combustible de ceux présents dans la zone d'étude. La vitesse de propagation comme l'intensité du feu ou la longueur de flamme y sont toujours très forts. Il s'agit, dans toutes les conditions de vent, d'humidité ou de pente, du type où les valeurs sont les plus élevées.

Le passage du feu aux houppiers se fait toujours par embrasement localisé des houppiers.

Type G : peuplement forestier dense et bas

Description du peuplement : regroupant les formations où le couvert arboré ne dépasse guère 10 mètres de hauteur mais est supérieur à 60%, ce type est caractéristique des taillis de chênes. On peut aussi y associer des futaies de pin d'Alep basses et denses.

Caractérisation de la biomasse : le sous-étage de ces formations est assez variable mais présente, toujours, une certaine continuité verticale. La biomasse combustible fine y est cependant essentiellement constituée par la litière.

Comportement du feu : du fait d'une assez faible accumulation de biomasse, ce type fait partie des moins combustibles. La vitesse de propagation et la longueur de flamme y sont modérées et l'intensité du front de flamme est faible, sauf lorsque le vent atteint 60 km/h.

En revanche, sauf en l'absence de vent, un passage du feu dans les houppiers est toujours possible.

Un type G', variante du type G, a été constitué pour les peuplements débroussaillés aux abords de l'urbanisation. Le comportement du feu y est assez semblable bien que les vitesses de propagation y soient toujours parmi les plus faibles du fait de la faible biomasse présente en sous-étage après débroussaillage.

Photo 5 :

C'est dans la litière que les accumulations de biomasse combustible sont les plus importantes

Photo O.C.



Types H et I : peuplement forestier haut mais clair

Description du peuplement : constitué, essentiellement, des taillis de chênes sous futaies de pin d'Alep, très fréquents dans le Var et sur le versant nord des principaux massifs de la basse Provence, ces deux types se distinguent par la constitution de la strate herbacée. Pour le type H, le sol est, essentiellement, couvert par la litière, puisque la strate herbacée n'atteint jamais 60% de recouvrement. En revanche, pour le type I, qui rassemble aussi des formations feuillues hautes (chênaies, ripisylves), le sol est recouvert par une strate herbacée dense.

Comportement du feu : l'importance de la strate herbacée dans le type I et la continuité qu'elle forme avec le sous-étage induit des comportements du feu assez différents pour les deux types.

Pour ces deux types, la probabilité de passage en feu total est forte dès que le vent intervient. Mais alors que pour le type I, des embrasements d'arbres sont possibles sans vent, pour le type H, c'est un feu de surface qui est plus probable en cas d'absence de vent.

Le gradient de combustibilité

L'objectif est de classer les divers types les uns par rapport aux autres selon leur combustibilité.

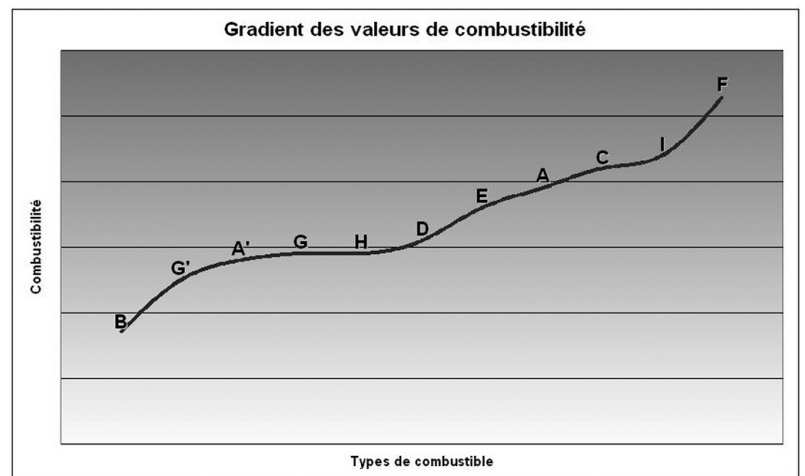
Le logiciel *Behave* est basé sur un modèle semi-probabiliste, dont deux des hypothèses fondamentales ne sont vérifiées que dans des conditions très particulières (VALETTE, 1992) :

- le combustible est considéré comme homogène (dans le lit de combustible défini, les particules sont réparties de manière homogène dans l'espace) ;

- les conditions de propagation (teneur en eau du combustible, vitesse et direction du vent) sont stables dans l'espace et dans le temps.

Par ailleurs, nous utilisons des valeurs par défaut pour de nombreux paramètres d'entrée (rapports surfaces/volume, pouvoirs calorifiques, teneur en eau du combustible) et des valeurs dont la mesure est difficile comme l'épaisseur du lit de combustible, auquel le modèle est très sensible.

Ces contraintes et limites, dans l'utilisation de *Behave*, peuvent expliquer l'obtention



de valeurs de sortie du modèle éloignées des données expérimentales. Ces écarts sont cependant systématique et ne remettent pas en cause la hiérarchie entre les types de combustibles. Ainsi, bien que les valeurs absolues, obtenues par l'utilisation de *Behave*, ne peuvent être utilisées en tant que telles, les écarts relatifs, entre les valeurs obtenues pour chacun des types de combustibles, restent valables.

Ainsi, pour chaque condition simulée, une note, de 1 à 3, est attribuée à chaque combustible, selon que la valeur obtenue est faible (1), moyenne (2) ou forte (3).

L'addition de ces valeurs nous permet de constituer un gradient de combustibilité qui reprend les valeurs détaillées et synthétise les caractéristiques de combustibilité. Sur la base de ce gradient, 4 classes de combustible ont été mises en place (Cf. Fig. 4).

Application de la méthode à d'autres domaines géographiques

Cette même méthode a été appliquée à d'autres domaines géographiques.

Citons le massif des Maures dans le Var où une typologie du combustible a été créée par le Cemagref, dans le cadre de la caractérisation de l'aléa feux de forêt, pour les PPR Incendie de forêt en 2005. Cette typologie a été mise au point à partir de données issues de la typologie des stations du même massif (LADIER et RIPERT, 1996). Ces données ont

Fig. 4 :
Gradient des valeurs de combustibilité

permis la création d'un schéma dynamique des séquences de végétation / types de combustibles.

Après un essai de validation, dans les garrigues montpelliéraines, de la typologie du combustible en Provence calcaire (FARGES, 2007), la méthode a été appliquée à la végétation de garrigues et pinèdes à pin d'Alep du domaine de Restinclières (Prades-le-Lez, Hérault). Sur la base de descriptions de la structure de la végétation, complétées par des prélèvements de végétation dans la litière, suivant une méthode standard, une typologie de la végétation combustible a été mise au point, intégrant l'ensemble du territoire de ce domaine (ALCINA 2007).

Discussion et perspectives

L'objectif initial de ce travail était d'aboutir à une typologie de la végétation combustible applicable aux formations végétales de la Basse Provence calcaire en développant une méthode originale.

Cette typologie de la végétation combustible permet de répondre aux besoins de cartographie à grande échelle (une forêt, une parcelle...). En effet, les critères de reconnaissance des onze types sont suffisamment simples pour permettre une cartographie de terrain. Le gradient de combustibilité permet également de créer des cartes de combustible en niveaux de « risque ». Enfin, la méthode développée, pour créer des typologies du combustible, est suffisamment simple pour être applicable à d'autres domaines géographiques.

A une échelle plus petite (massif, département), cette typologie offre aussi plusieurs possibilités de cartographie. Des analogies entre types de formations forestières, telles que définies par l'Inventaire forestier national et types de combustibles, sont réalisables.

Cette typologie et celles qui pourraient être créées en suivant la même méthode, ont une validité locale et une grande fiabilité. Elle constitue une avancée par rapport à l'Indice de combustibilité ou d'autres typologies empiriques, notamment par la qualification du comportement du feu.

Cependant, une première limite de cette typologie réside dans son champ d'application. En effet, elle se limite aux formations dites naturelles, de la garrigue aux forêts

fermées. Les formations végétales herbacées: friches, incultes, haies, jardins, talus et surtout agricoles, participent, elles aussi à la propagation des incendies, surtout dans les conditions périurbaines. Or, bien qu'elles puissent être aisément cartographiées, elles ne sont pas caractérisées en termes de combustibilité.

Mais la méthode, mise au point pour réaliser cette typologie, peut être utilisée pour déterminer la combustibilité de ces formations et, ainsi, les intégrer à une analyse du risque d'incendie, sur l'ensemble d'un territoire. Il faudra, alors, pour constituer de nouvelles typologies du combustible, relever des données de recouvrement des strates de végétation, de recouvrement et d'épaisseur de litières et, enfin, des mesures de la biomasse de litière, éventuellement de strates arbustives dans les végétations pour lesquelles il n'y a pas de références existantes.

La seconde limite concerne la méthode utilisée pour mettre au point cette typologie. Il s'agit de créer une typologie de peuplements combustibles, uniquement basée sur des critères de répartition spatiale de la végétation, puis de caractériser la combustibilité de chacun de ces types. C'est dans cette deuxième phase que réside le principal obstacle.

La complexité du phénomène de l'incendie de forêt et la difficulté d'instrumenter un feu réel, obligent à se tourner vers l'utilisation de modèles. Le modèle de propagation de feu *Behave* est, pour l'instant, le seul modèle intégré disponible, éprouvé et gratuit. Mais, il n'est pas idéal notamment du fait des hypothèses utilisées (citées plus haut), mais aussi de son inadaptation aux combustibles hétérogènes et aux lits de combustibles dépassant 3 mètres de hauteur.

Les valeurs fournies par un tel outil ne peuvent être utilisées que d'une manière relative, mais la validation des résultats obtenus est une perspective intéressante pour cette typologie.

Elle peut passer : par une démarche d'expertise, par une démarche de suivi de feux réels, ou bien encore, par l'utilisation d'autres modèles de combustibles. Des recherches, à ce sujet, sont en cours pour développer des modèles physiques, en deux voire trois dimensions, notamment dans le cadre du programme de recherche Fireparadox.

Au delà de cette perspective, demandant que le modèle cité ci-dessus soit finalisé, la méthodologie appliquée pour mettre au point

cette typologie du combustible, est suffisamment simple et fiable pour être appliquée à d'autres territoires. Il deviendrait alors nécessaire de maintenir une veille, pour rassembler les différentes typologies du combustible réalisées sur le territoire soumis au risque d'incendie, voire, de mener une politique volontariste de réalisation de typologies de combustible et de mise à disposition de celles-ci auprès des gestionnaires du territoire.

O.C., C.L.M., M.J., T.C.

Remerciements

Nous remercions le Conseil régional de Provence-Alpes-Côte d'Azur pour le financement de cette étude dans le cadre de la convention DEB 02/27 du 15/03/2002.

Nous remercions aussi l'organisation *Systems for Environmental Management* pour la mise à disposition du logiciel *Behave Plus* sur son site www.fire.org.

Références bibliographiques

- Alcina, Centre Technique de l'Olivier, Réalisation d'une étude de diagnostic et de réhabilitation d'olivieraies et de sylviculture truffière en lien avec le risque incendie, Guide méthodologique, OCR Incendi, Conseil général de l'Hérault, 2007
- Anderson H.E., Aids to determining fuel models for estimating fire behavior, Ogden UT : USDA FSIRS, Gen. Tech. Rep. INT 122; 1982
- Andrews, PL, Bevins, CD, Seli, RC (2004). BehavePlus Fire Modelling System Users's Guide v. 3.0. USDA For. Serv., RMRS Gen. Technical Report, Ogden, UT, 132 pp.
- Beltran I., Xanthopoulos G., Some particularities and findings in the characterization of forest fuels in Tenerife Island (Spain), Forest Fire Research and Wildland Fire Safety, 2002
- Bagnouls F., Gaussen H., Saison sèche et indice xérothermique, Faculté des Sciences, Toulouse, 1953
- Boisseau B., Nouals D., Ripert C., Guide technique du forestier méditerranéen, tome 2 : stations forestières, 1992
- Farges Y., Méthodologie de diagnostic forestier à vocation multiple en zone méditerranéenne, AgroParisTech, Alcina, 2007
- Finney, Mark A. 1998. FARSITE : Fire Area Simulator-model development and evaluation. Res. Pap. RMRS-RP-4, Ogden, UT: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station. 47 p.
- Hétier J.P., Diagnostic des PIDAF des Bouches-du-Rhône, BRL Ingenierie, 2004
- Inventaire Forestier National, Département du Var, résultats du troisième inventaire forestier, 1999
- Inventaire Forestier National, Département des Bouches-du-Rhône, résultats du troisième inventaire forestier, 1999
- Inventaire Forestier National, IF n°11, 2006
- Jappiot M., Bianchi R., Guarnieri F., Alexandrian D., Plans de prévention des risques naturels (PPR) Risques d'incendies de forêt. Guide méthodologique, 86 pages, La Documentation Française, 2002
- Jappiot M., Philibert-Caillat C., Borgniet L., Dumas E., Alibert N., Analyse spatiale des interfaces agricoles - forêt - urbain. Ingénieries - E A T n° spécial Risques naturels et aménagement du territoire, pp. 69-81, 2003
- Ladier J., Ripert C., Typologie des stations forestières de la Provence cristalline (Cap Sicié, Iles d'Hyères, Maures, Tanneron), Cemagref Aix-en-Provence, Rapport final pour le ministère de l'Agriculture et le Conseil régional PACA, 93 p. + annexes, 1996
- Lampin C., Jappiot M., Borgniet L., Long M., Cartographie des interfaces habitat-forêt : une approche spatiale pour estimer le risque d'incendie de forêt. Revue internationale de géomatique. European Journal of GIS and Spatial analysis. Information géographique et gestion des risques. Vol.16- n°3-4/2006 pp. 321-340, 2006
- Lampin C., Chandioix O., Paulet V., Jappiot., Typologie de la végétation combustible dans les interfaces agriculture-forêt-urbain, Conseil régional PACA, Rapport final, 2004
- Lopez P.B., La prevención de los incendios forestales, El Campo, 1993
- MAPA, Clave fotográfica para la identificación de modelos de combustible, ICONA. Madrid, 1989
- Marchetti M., Lozupone G., I modelli di combustibile nelle realtà italiana. Primi risultati di una analisi quantitativa, Monti et Boschi, 1985
- Petrucci B., Studi dei parametri vegetazionali nelle difese dagli incendi boschivi (AIB), Monti et Boschi, 1992
- Rothermel R.C., How to predict the spread and intensity of forest Range Fire, Ogden UT : USDA FSIRS, Gen. Tech. Rep. INT 143, 1983
- Salas et al., A local risk map for the council of Poaires central Portugal: comparison of GIS and field work method, 2nd Int. Conf. Forest Fire Research Proceedings, 1994
- Trabaud L., Les combustibles végétaux dans le département de l'Hérault, CNRS CEFÉ, 1971
- Valette J.C., La modélisation du comportement du feu, Rencontre forestiers-chercheurs en forêt méditerranéenne, 1992
- Vivien C., Etude de l'utilisation, dans le contexte méditerranéen français d'un logiciel de simulation des feux de forêt : FARSITE, FIF – Rocky Mountain Research Station of Missoula, 1999
- Vivien C., FARSITE, Guide de l'utilisateur, ONF SD06, 2000

Olivier CHANDIOUX
Actuellement à
ALCINA
2 place Pierre Viala,
34060 Montpellier
Cedex
Mél : olivier.
chandioux@alcina.fr
A l'époque
au Cemagref
d'Aix-en-Provence

Corinne LAMPIN-MAILLET
Marielle JAPPIOT
Thomas CURT
Cemagref
Aix-en-Provence
3275 route
de Cézanne-CS 40061
13182
Aix-en-Provence
cedex 5

Résumé

La typologie du combustible est un outil utilisé par les gestionnaires des milieux naturels soumis aux incendies dans de nombreux pays et massifs subissant ce risque. Cet outil permet d'intégrer le comportement du feu dans la gestion des milieux et dans la planification, à l'échelle d'un massif forestier. Des typologies de combustibles existent pour les États-Unis, l'Espagne ou l'Italie, mais il y avait un manque pour la région méditerranéenne française. Ces typologies caractérisent la répartition verticale et horizontale de la végétation, ainsi que sa biomasse, éléments déterminants du comportement du feu, en milieu naturel.

Le Cemagref d'Aix-en Provence, sur la base de près de 150 descriptions de végétation situées en Basse Provence calcaire, a bâti une typologie des structures de végétation. À l'aide du logiciel *Behave Plus*, nous avons pu caractériser le comportement du feu, dans chacun des onze types de combustibles construits.

Cette typologie, valable dans les limites de la Basse Provence calcaire, apporte une avancée dans la caractérisation du comportement du feu et offre des possibilités de cartographie traditionnelle ou par analyse d'image. D'autre part, la méthode développée est assez aisément utilisable par les gestionnaires sur d'autres territoires.

Summary

Establishing a typology for inflammable material in the limestone areas of Lower Provence (S.-E. France)

In many countries and mountainous areas, those responsible for managing natural habitats exposed to the threat of wildfire use typologies of inflammable material. Such typologies are tools that make it possible to integrate the behaviour of wildfire into an overall habitat management scheme and planning covering a whole mountain area. Typologies for inflammable material exist in the USA, Italy and Spain but they are lacking for the French Mediterranean region. These typologies detail the vertical and horizontal distribution of the plant cover along with its biomass, parameters which determine the behaviour of wildfire in natural conditions.

The CEMAGREF (a French research body focusing on agriculture and rural engineering) at Aix-en-Provence has established a typology of the make-up of plant cover based on 150 descriptions of flora in the limestone areas of Lower Provence. Using the *Behave Plus* software, the behaviour of wildfire has been plotted for each of the eleven structural types of inflammable plant cover.

This typology, valid within the limits of the limestone areas of Lower Provence, represents a step forward in characterising the behaviour of wildfire and widens the possibilities for traditional map-making or for image analysis. Furthermore, the method developed can be adapted fairly easily for use by managers working in other regions.

Riassunto

Messa al punto di una tipologia di combustibili per la Bassa Provenza calcarea

La tipologia del combustibile è un arnese usato dai gestori degli ambienti naturali sottoposti agli incendi in numerosi paesi e massicci che subiscono questo rischio. Questo arnese permette di integrare il comportamento del fuoco nella gestione degli ambienti e della pianificazione alla scala di un massiccio forestale. Tipologie di combustibile esistono per gli Stati Uniti, la Spagna o l'Italia, ma c'era una mancanza per la regione mediterranea francese. Queste tipologie caratterizzano la ripartizione verticale e orizzontale della vegetazione come la sua biomassa, elementi determinanti del comportamento del fuoco in ambiente naturale.

Il Cemagref di Aix-en-Provence, sulla base di circa 150 descrizioni di vegetazione situate in Bassa Provenza calcarea, ha costruito una tipologia delle strutture di vegetazione. Coll'aiuto del software *Behave Plus*, abbiamo potuto caratterizzare il comportamento del fuoco in ognuno degli undici tipi di combustibile costruiti.

Questa tipologia, valida nei limiti della Bassa Provenza calcarea, porta un anticipo nella caratterizzazione del comportamento del fuoco e offre possibilità di cartografia tradizionale o da analisi di immagine. D'altra parte, il metodo sviluppato è abbastanza facilmente utilizzabile dai gestori su altri territori.