



HAL
open science

Les effets du passage d'un feu dans un peuplement arboré : synthèse des connaissances et applications pour le gestionnaire forestier méditerranéen

François Pimont, Jean-Luc Dupuy, Eric Rigolot, Yvon Duché

► To cite this version:

François Pimont, Jean-Luc Dupuy, Eric Rigolot, Yvon Duché. Les effets du passage d'un feu dans un peuplement arboré : synthèse des connaissances et applications pour le gestionnaire forestier méditerranéen. Rendez-vous Techniques de l'ONF, 2012, 35, pp.3-15. hal-01338627

HAL Id: hal-01338627

<https://hal.science/hal-01338627>

Submitted on 11 Jul 2024

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

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

Les effets du passage d'un feu dans un peuplement arboré : synthèse des connaissances et applications pour le gestionnaire forestier méditerranéen

Le passage d'un incendie constitue pour les écosystèmes une perturbation qui varie selon le type de feu (origine naturelle ou anthropique ; feu de surface ou feu total, concernant tant les strates basses que les cimes des arbres), son intensité (l'énergie qu'il produit) ou sa sévérité (les dommages qu'il cause à l'écosystème). À ces caractéristiques s'ajoute la notion de régime de feu, qui intègre à la fois sa composante temporelle (saison, fréquence, cycle¹) et sa composante spatiale (surface brûlée, hétérogénéité).

Le régime de feu peut être modifié par les efforts de prévention et de lutte contre les incendies, par les actions sylvicoles et par d'autres facteurs comme les changements climatiques ou d'occupation du sol.

Parmi les effets immédiats, l'impact du passage d'un feu sur un peuplement se traduit généralement par un roussissement foliaire plus ou moins marqué, une carbonisation du tronc et éventuellement la mort des individus. Les mécanismes en jeu sont de natures physique (transferts thermiques) et biologiques (mortalité cellulaire) et sont maintenant mieux connus. La végétation méditerranéenne est fortement conditionnée par les feux depuis des millénaires, et les espèces ont développé des adaptations pour survivre au passage du feu et/ou pour se régénérer après son passage.



a) dégâts aux houppiers



b) dégâts à l'écorce

Y. Duché, ONF

Fig. 1 : dommages causés aux arbres par un incendie d'intensité modérée dans un peuplement de pin pignon

Les scientifiques ont accumulé d'importantes connaissances sur les mécanismes à l'origine des impacts du feu et de la résistance des espèces, que ce soit en terme de survie ou de régénération. Ces connaissances permettent d'aborder les pratiques sylvicoles ou le brûlage dirigé² avec une meilleure compréhension. Nous exposons donc ici certaines connaissances scientifiques et la manière dont le gestionnaire forestier peut en tirer profit pour programmer ses interventions.

Mécanismes de la mortalité des arbres soumis au feu

Le passage du feu induit généralement la destruction de la strate arbustive et, dans la strate arborée, une mortalité variable selon la gravité des dommages et la résistance de l'espèce. Les dommages (figure 1) à l'origine de la mortalité

concernent le houppier, le cambium et le système racinaire. La température de flamme dans un feu de forêt atteint couramment les 1 000 °C, ce qui dépasse très largement la température létale des cellules de l'arbre, voisine de 70 °C pour une exposition de quelques secondes. Les cellules qui vont survivre sont donc soit très éloignées de la flamme, soit bien protégées. Par exemple, un feu ne concernant que le sous-bois (feu de surface) et ayant une intensité limitée, aura un impact faible sur les cellules des feuilles ou aiguilles (suffisamment éloignées de la flamme) ainsi que sur les cellules cambiales (bien protégées sous l'écorce ou dans les racines).

Dégâts au cambium et aux parties racinaires

Les cellules du cambium sont situées à proximité immédiate des flammes, car un feu se propage toujours en

¹ Nombre d'années nécessaires pour que la surface parcourue par les différents incendies au sein d'un massif de référence soit au moins égale à la surface totale du dit massif

² Voir dossier consacré au brûlage dirigé dans Duché & Rigolot 2004. RDV techniques n°4 : 36-40

surface, même lorsqu'il se propage aussi en cime³. Elles sont protégées par l'écorce, qui constitue un bon isolant. Les transferts thermiques ont lieu par convection et rayonnement sur la surface extérieure de l'écorce et la chaleur se propage dans l'écorce par conduction (voir l'encadré sur les modes de transfert thermique). Dans ces milieux faiblement conducteurs, la conduction thermique se poursuit longtemps après le passage du feu et a donc pour effet d'atténuer considérablement l'amplitude des variations thermiques au sein de l'écorce par rapport à celles de l'air au voisinage de l'écorce. Cette atténuation est d'autant plus forte que l'épaisseur d'écorce est importante et on estime en général que l'arbre peut survivre si le temps de séjour du feu (en minutes) est inférieur à $3x^2$, le « x » représentant l'épaisseur de l'écorce en centimètres.

À titre d'exemple, un pin d'Alep de 25 cm de diamètre (d130, mesuré à 1,30 de haut) a une épaisseur d'écorce voisine de 2 cm et peut donc survivre à un temps de séjour du feu de plus de 10 minutes. Un tel arbre risque moins de mourir de dégâts au cambium (les temps de séjour excèdent rarement quelques minutes) que d'éventuels dégâts dans son houppier. En revanche, dans le cas d'un taillis de chêne vert, des tiges de 10 cm de diamètre ne sont protégées que par 5 mm d'épaisseur d'écorce, et ne peuvent résister à un feu de plus de 45 secondes de temps de séjour, ce qui est courant, même lors d'un brûlage dirigé. À épaisseur égale, les propriétés thermo-physiques des écorces sont relativement similaires, à quelques exceptions près comme le chêne liège, dont l'écorce très poreuse, constitue un excellent isolant (quand elle n'a pas été récoltée !). On pourra retenir que plus un arbre est gros, plus son épaisseur d'écorce est importante, mieux son cambium est protégé.

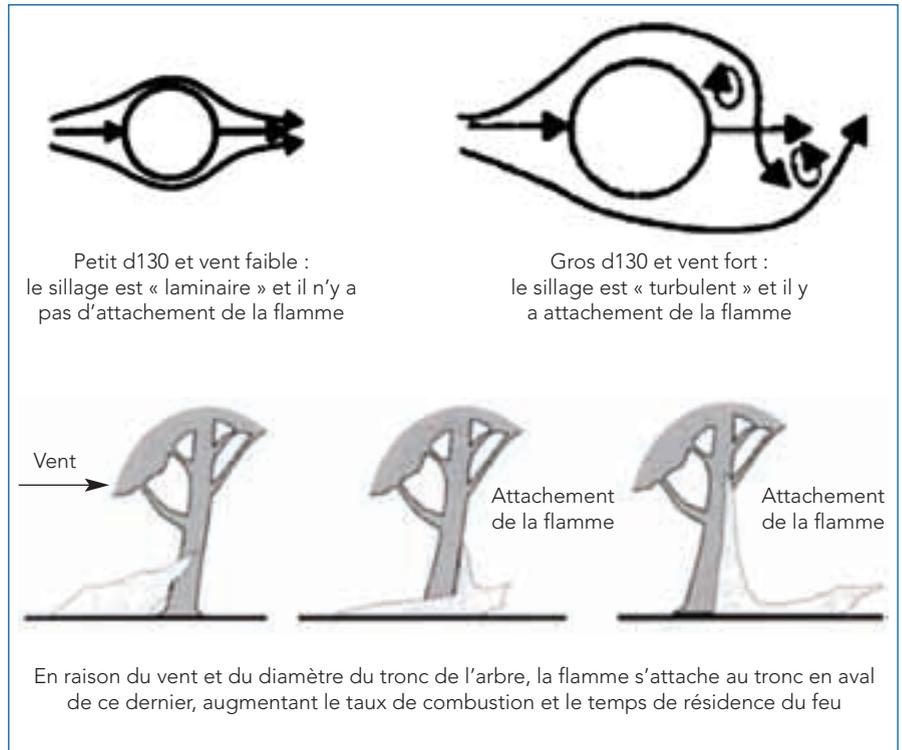


Fig. 2 : phénomène d'attachement de la flamme sur le tronc, à l'origine de dégâts plus marqués en aval de la direction de propagation sur les plus gros arbres (d'après Gutsell et Johnson, 1996)

Ceci étant, une circulation de l'air au sein du peuplement complexifie singulièrement cette analyse sommaire car le tronc perturbe l'écoulement d'air et crée une zone de turbulence sur sa face aval (par rapport au sens du vent et de progression du feu). Cette zone de turbulence induit un attachement de la flamme au tronc, une combustion plus intense et un temps de séjour plus long (figure 2). Il en résulte une asymétrie des cicatrices de feu sur l'écorce des arbres, plus marquées et plus hautes sur la face aval du tronc. Cela constitue un des indicateurs de la direction de propagation utilisés lors des reconstitutions post-incendie, mais qui doit être confirmé par d'autres traces, car la hauteur de carbonisation peut aussi être influencée par d'autres facteurs, notamment par la quantité de combustible accumulée à proximité du tronc. La dimension de cette zone d'attachement

de flamme est proportionnelle à la vitesse du vent, mais aussi au diamètre du tronc. Ceci explique pourquoi les petits arbres ont peu de cicatrices et pourquoi leur asymétrie est rarement marquée (figure 3).

Ce phénomène implique des dégâts plus importants sur l'écorce des gros arbres pour une même situation de feu, ce qui compense en partie la meilleure protection dont ils bénéficient du fait de leur écorce plus épaisse. Même si l'arbre survit, la zone de tissus morts sous l'écorce, généralement en forme de triangle, entraîne un décollement de l'écorce et la mise à nu du bois. Des bourrelets cicatriciels se formeront et recouvriront progressivement la zone blessée, sauf si un nouveau feu touche le peuplement. Dans ce cas, le bois non protégé peut entrer en combustion et former une cavité à la base du tronc fragilisant l'arbre.

3 Quelques témoignages rapportent néanmoins des feux se propageant uniquement en cimes dans des peuplements denses de pin pignon.

Dans certains cas, la combustion de l'arbre peut être totale et se poursuivre jusque dans les racines ; après incendie, il ne reste alors plus qu'un trou dans le sol à l'emplacement de l'arbre. En cas de passages multiples du feu, les bourrelets cicatriciels successifs permettent par carottage de reconstituer l'histoire locale des feux.

L'impact des dégâts au système racinaire est encore mal connu, car très délicat à étudier (Ryan 1998). Cependant, la mortalité associée à des dégâts racinaires ne concerne que les espèces d'arbres dont les racines affleurent : compte tenu des propriétés isolantes du sol, les racines sont bien moins exposées que les parties aériennes de l'arbre.

Dégâts au houppier

Voyons maintenant plus en détail les mécanismes en jeu pour les dégâts au houppier, qui sont la principale cause de mortalité des arbres, en tout cas des pins matures dont l'écorce épaisse protège généralement bien les troncs.

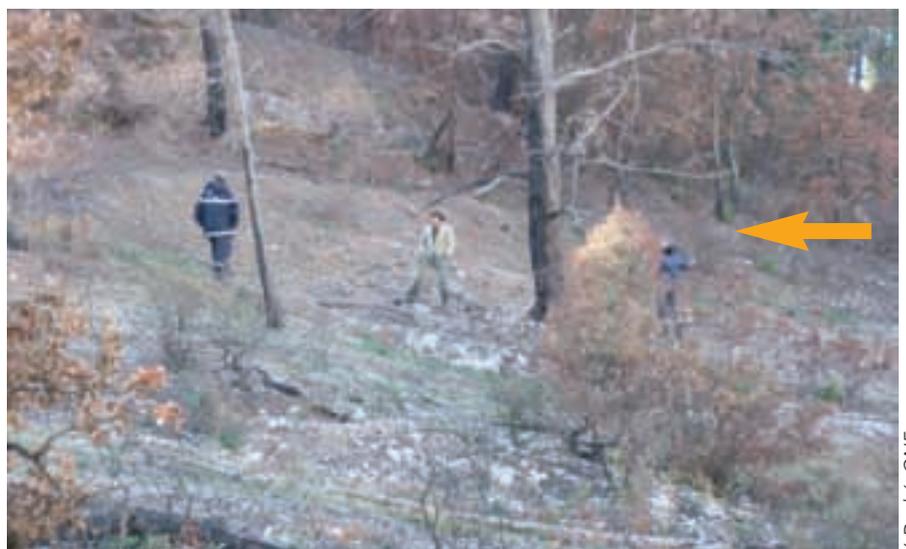
Les parties aériennes les plus sensibles à l'échauffement sont les éléments les plus fins, comme les feuilles ou les bourgeons, et ce pour deux raisons. D'abord, le flux de chaleur qu'ils reçoivent est inversement proportionnel à leur épaisseur, donc d'autant plus important que l'élément est fin. Ensuite, plus un élément est fin, plus la chaleur se diffuse rapidement à l'intérieur, tuant plus de cellules et causant ainsi la mort de l'organe. Pour donner des ordres de grandeur, une aiguille de pin exposée à 60 °C pendant une minute sera tuée alors qu'un bourgeon de chêne vert pourra survivre près de 3 minutes. Mais l'exposition d'une aiguille de pin ou d'un bourgeon de chêne à une température de plus de 75 °C pendant cinq secondes entraînera systématiquement leur mort.

Les modes de transfert thermique

Conduction : c'est le mode de transfert de la chaleur de proche en proche, au sein d'un matériau, dont une extrémité est chauffée par exemple. La chaleur se propage rapidement dans les milieux fortement conducteurs, comme le métal, mais lentement dans les milieux faiblement conducteurs (l'écorce, le bois, l'air). La conduction joue un rôle clé dans la propagation des feux de litière de faible intensité ou dans les feux d'humus. Elle est aussi responsable de la destruction des cellules cambiales, car elle induit un transfert de chaleur entre l'extérieur de l'écorce et le cambium. Bien que ce transfert soit lent, les cellules cambiales seront tuées si le temps de séjour du feu au pied de l'arbre est excessif.

Rayonnement : c'est le mode de transfert de la chaleur sous forme d'ondes ou de particules par rayonnement électromagnétique. Il est possible dans les milieux dits semi-transparents, comme l'air. L'énergie reçue par un élément de végétation est d'autant plus importante que celui-ci est fin et diminue rapidement avec la distance entre l'émetteur et le récepteur. Certains matériaux permettent de réfléchir le rayonnement. Cette propriété est mise à profit pour la conception des vêtements de protection. L'influence du rayonnement dans la propagation des feux et les dégâts à la végétation est toujours significative. Il a longtemps été considéré comme le mode de transfert prédominant par les chercheurs et les praticiens, mais il est communément admis aujourd'hui que le transfert convectif joue un rôle non négligeable, voire dominant, dans le comportement du feu.

Convection : c'est le mode de transfert lié à une différence de température entre la végétation et l'air (généralement l'air chaud) transporté par le vent. Lorsque l'air est plus chaud que les éléments de végétation, celui-ci les échauffe d'autant plus qu'ils sont fins (feuilles, rameaux) et que la vitesse de l'écoulement est forte (dans un panache et/ou avec le vent). Lorsque l'on passe la main au-dessus d'une bougie, la chaleur que l'on ressent est transmise à la peau par convection depuis les gaz chauds du panache. Ce mode de transfert est très efficace et en grande partie à l'origine de l'accélération des feux en pente ou en présence de vent. Longtemps sous-estimé par rapport au transfert radiatif, ce mode de transfert est dominant dans la propagation de la plupart des feux rapides (vent, pente montante, etc.), mais est aussi à l'origine des dégâts aux houppiers. On notera bien que lorsque le gaz est plus froid que la végétation (par exemple, un vent soufflant sur une canopée préalablement échauffé), le transfert thermique conduit à un refroidissement. Celui-ci est très rapide, en particulier pour des éléments fins (feuillage) par fort vent et peut compenser un échauffement dû au rayonnement du feu de surface.



Y. Duché, ONF

Fig. 3 : observation des traces de carbonisation dues au phénomène d'attachement de flamme

Ces traces sont nettement plus hautes du côté opposé à l'arrivée du feu (flèche jaune) et plus importantes sur l'arbre le plus gros.

Compte tenu de ces valeurs relativement faibles par rapport aux températures de flamme, on comprend que les organes doivent être à bonne distance de la flamme pour survivre. Ainsi, aucune feuille ni bourgeon ne survivra à un feu total.

Lorsque le feu ne se propage qu'en surface (brûlage dirigé ou incendie peu intense), le transfert thermique vers le houppier a lieu par convection et rayonnement. D'une manière générale, le transfert convectif est largement dominant du fait des forces de flottabilité (poussée d'Archimède) qui font monter les gaz chauds. On pourra, pour s'en convaincre, tester à quel point il est facile d'approcher la main sur le côté de la flamme d'une bougie (rayonnement seul), alors qu'il est impossible de l'approcher au-dessus à la même distance (rayonnement, mais surtout convection).

La hauteur h de roussissement foliaire pour un feu d'intensité donnée peut s'évaluer en utilisant le modèle de Van Wagner (1977) :

$$h = 4.55 \frac{l^{0.67}}{(60 - T_{air})}$$

où l est l'intensité du feu en kW/m et T_{air} la température de l'air.

En application de cette formule, pour une température de l'air de 20 °C et une intensité de 250 kW/m (intensité faible), la hauteur de roussissement estimée est de 4.6 m. Plus un arbre est haut et élagué, plus il a de chance qu'une part dominante de son houppier soit hors de danger par rapport au feu.

Cependant la présence de vent tend à incliner le panache, ce qui réduit les hauteurs de roussissement foliaire. Pour prendre en compte l'effet du vent, Van Wagner propose de diviser la hauteur de roussissement sans vent par la formule :

$$\sqrt{1 + 38 \frac{U^3}{l}}$$

où U est la vitesse du vent en m/s sous la canopée, sans que l'on ait beaucoup de recul sur la validité de la formule.

Des travaux récents réalisés par les auteurs du présent article montrent qu'un vent ambiant de 20 km/h peut réduire la hauteur de roussissement d'environ 30 % et cette réduction peut même atteindre 60 % pour 40 km/h, pour une intensité de feu fixée.

Application au diagnostic et à la prédiction de la mortalité après incendie

Si l'on occulte le phénomène d'attachement de flamme, plus un arbre est gros, plus son houppier et son cambium sont protégés. Ainsi, la résistance des arbres au feu augmente avec l'âge des individus jusqu'à une baisse de vigueur liée à la sénescence. La mortalité liée au feu intervient généralement durant les deux premières années après feu et on observe une stabilisation au bout de 3 à 5 ans. La présence de scolytes peut induire une mortalité différée jusqu'à 10-15 ans chez les plus vieux individus. Des facteurs abiotiques comme la sécheresse augmentent la mortalité après incendie. Le diagnostic précoce de la mortalité des arbres après incendie constitue un

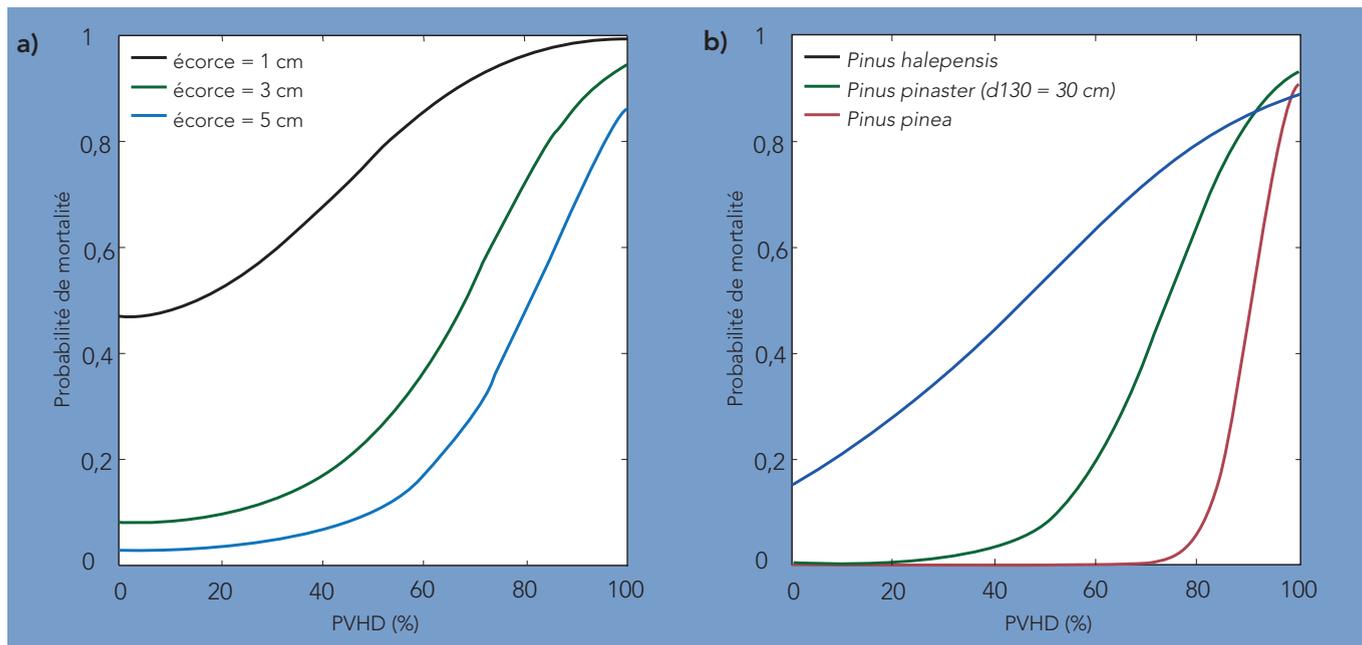
enjeu important pour le gestionnaire. En effet, il est parfois nécessaire de supprimer les arbres qui vont mourir, afin de limiter les risques d'attaques de scolytes, de sécuriser les abords des routes ou des chemins ou de limiter l'impact paysager dans certaines zones. Mais il convient de ne pas couper les arbres qui peuvent survivre, car ils ont encore un potentiel de croissance et surtout ils peuvent assurer une régénération naturelle.

Dans ce contexte, les chercheurs ont développé des modèles statistiques, qui estiment la probabilité de mortalité de l'arbre en fonction de certains paramètres dendrométriques (notamment le d130) et du niveau de dégât constaté (Note de carbonisation de l'écorce, part de la longueur du tronc carbonisée, part du volume du houppier desséchée). Ces indicateurs de niveau de dommage sont liés notamment à la hauteur de flamme et au temps de séjour du feu. Des modèles de ce type sont spécifiques et disponibles pour les pins pignon, d'Alep, maritime, laricio, et pour le chêne liège notamment, même si un modèle générique (non dépendant de l'espèce) a également été développé (tableau 1 et figure 4).

Espèces	Expression de L
Modèle générique (Ryan et Amman 1994)	$-1.94 - 0.000535PVHD^2 + 6.32 (1 - e^{-0.394EC})$
<i>Pinus halepensis</i> (Rigolot 2004)	$1.75 - 0.039 PVHD$
<i>P. pinaster</i> (Botelho et al. 1998)	$7.39 - 0.10 PVHD + 0.38 d130$
<i>P. pinea</i> (Rigolot 2004)	$33.0 - 0.31 PVHD - 1.9 NC$
<i>P. sylvestris</i> (Sidoroff et al. 2007)	$-1.52 - 0.19 PLC + 0.29 d130$
<i>P. nigra</i> subsp <i>laricio</i> (prob. mortalité immédiate) (Pimont et al. 2011a)	$7.65 - 0.12 PLC - 8.7 e^{-0.044 d130}$
<i>Quercus suber</i> (prob. de faible régénération) (Catry 2009)	$1.682 + 0.901 EC - 0.042 d130 - 0.0145 PLC$

P = probabilité de mortalité (« stabilisée » entre 2 et 4 ans, sauf mention contraire)
 L = combinaison linéaire des variables aléatoires du modèle logistique
d130 : diamètre à hauteur de poitrine (en cm)
NC : Note de Carbonisation de l'écorce (de 0 à 3)
PLC : Part de la Longueur du tronc Carbonisée (en %)
PVHD : Part du Volume du Houppier Desséchée (en %)
EC : Épaisseur d'écorce (en cm)

Tab. 1 : sélection de modèles statistiques de mortalité après incendie
 $P = [1 + \exp(L)]^{-1}$ pour les principales espèces européennes



a) modèle générique, pour 3 épaisseurs d'écorce

b) modèles par espèces

Fig. 4 : probabilité de mortalité après incendie, en fonction du roussissement foliaire ou part de volume du houppier desséché (PVHD, %)

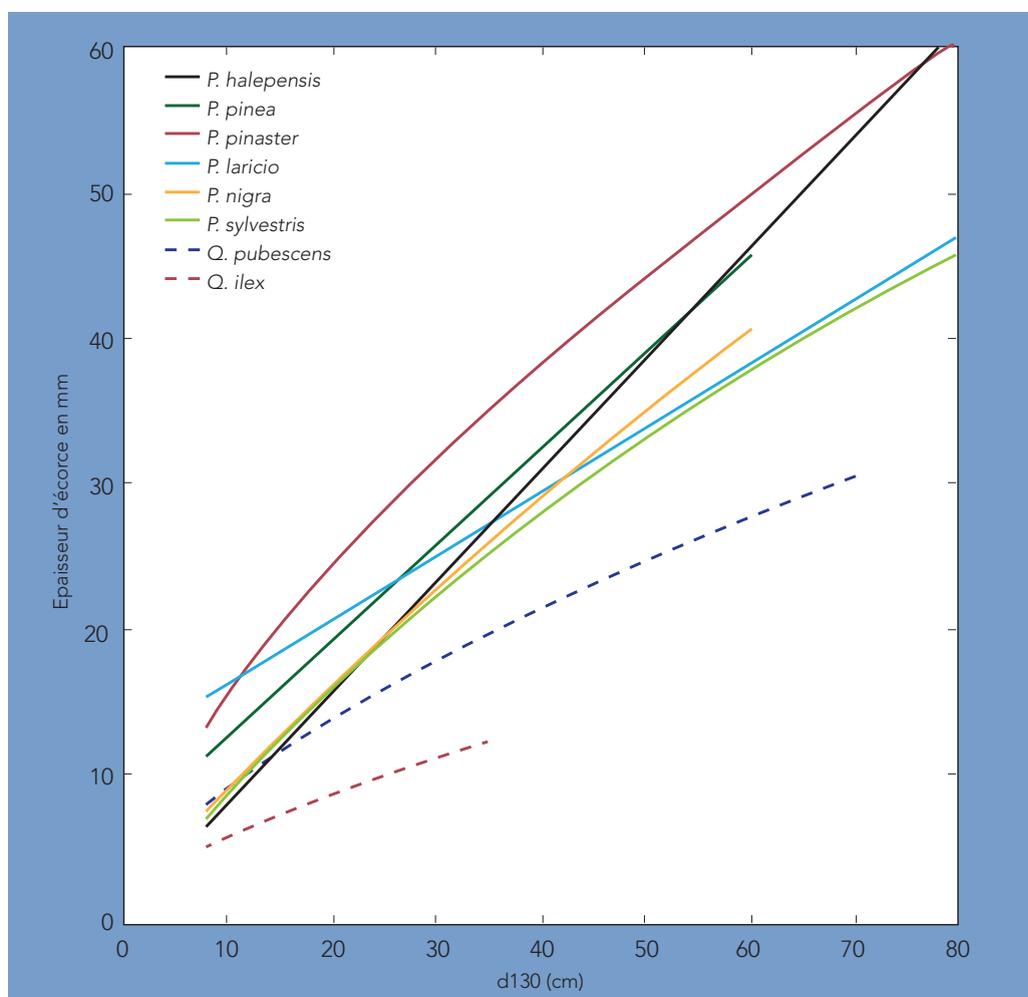


Fig. 5 : exemples de relation entre épaisseur d'écorce (mm) et diamètre de l'arbre (d130, cm), qui illustrent les différences entre espèces (origine des données : IFN)

La figure 4a illustre, à partir du modèle générique, le rôle clé joué par l'épaisseur d'écorce. Pour 50 % de roussissement foliaire, la probabilité de mortalité passe de 80 % à 10 % si l'épaisseur d'écorce passe de 1 à 3 cm. L'épaisseur d'écorce varie bien entendu avec d130 mais aussi avec l'espèce (figure 5), les feuillus (sauf le chêne liège) ayant en général des écorces beaucoup plus fines que les résineux à d130 équivalent. Le modèle générique ne rend pas compte de la résistance exceptionnelle de certaines espèces (pin pignon, chêne liège). Ainsi la probabilité de mortalité du pin d'Alep est beaucoup plus importante que celle du pin pignon pour un même niveau de roussissement foliaire : le pin pignon est capable de survivre dans 90 % des cas lorsque moins de 80 % de son houppier est roussi (figure 4b). Le pin maritime présente un comportement intermédiaire. Enfin, la comparaison des probabilités de mortalité des pins maritime et laricio de Corse a permis de mettre en évidence une moins bonne survie après incendie chez le pin laricio dans un peuplement de montagne (Pimont *et al.* 2011a).

Ces modèles constituent des outils intéressants pour le diagnostic de la mortalité et la comparaison des espèces entre elles. Globalement, on retiendra que, pour 50 % de houppier roussi, un individu ayant une écorce peu épaisse (feuillus, jeunes résineux) a une forte probabilité de mourir, alors qu'un individu ayant une écorce épaisse (résineux âgé) a de bonnes chances de survie. Cette forte épaisseur d'écorce est une première forme d'adaptation au feu.

Face au feu, la résilience du peuplement dépend de la survie individuelle, mais surtout de la régénération

Régénération post-incendie

La capacité des arbres à régénérer après l'incendie est la seconde adaptation clé. Deux stratégies exis-

tent : la dissémination de graines ou la production de rejets. L'efficacité de la dissémination de graines dépend de multiples facteurs comme la présence de semenciers, la réceptivité du sol, la présence de végétation concurrente (notamment les espèces qui rejettent), mais aussi de l'ouverture du milieu, de la saison d'occurrence de l'incendie et des conditions climatiques dans les mois qui suivent l'incendie. Ajoutons qu'un feu très sévère induit généralement une régénération faible (destruction de la banque de graines, mortalité de certains rejeteurs).

Une adaptation au feu fréquemment rencontrée chez les pins méditerranéens est la présence de cônes sérotineux (figure 6a) : ces cônes fermés par de la résine constituent une banque aérienne de graines dormantes, soumises lors d'un feu à des températures et surtout un temps de séjour beaucoup moins sévères que la banque de graines du sol ; sous l'effet de la chaleur, la résine fond et les cônes s'ouvrent, libérant les graines après passage du feu et permettant ainsi une régénération massive. Les chaleurs extrêmes atteintes à la surface du sol noirci par les cendres facilitent la levée de dormance des graines qui germent dans des conditions optimales de nutrition minérale et face à une pression de compétition réduite.

La stratégie de régénération après feu par la production de rejets (régénération dite végétative) est très fréquente dans les écosystèmes méditerranéens. Les rejets sont produits à partir de la souche par des bourgeons situés en dessous du sol (figure 6b). Notons d'ailleurs, que la production de rejets peut aussi avoir lieu dans le houppier pour reconstituer la cime lorsqu'elle n'est que partiellement endommagée par le feu (figure 6c).

Certaines plantes comme les pins se régénèrent uniquement par la voie

sexuée (à l'exception du pin des Canaries, assez marginal), et d'autres comme les chênes développent les deux stratégies simultanément avec souvent une dominante pour la reproduction végétative.



a) Cônes sérotineux (pin d'Alep)

Y. Duché, ONF



b) Rejets de souche (chêne kermès)

Y. Duché, ONF



c) Rejets de parties aériennes (chêne liège)

Y. Duché, ONF

Fig. 6 : mécanismes permettant la résilience post-incendie des espèces

Stratégie	Régime et intensité d'incendie compatibles	Taux de mortalité	Mode de régénération	Capacité de régénération	Espèces typiques
Espèces moyennement résistantes	Feux peu intenses	Moyen	Dissémination de graines	Faible	Pin noir Pin sylvestre
Espèces résistantes	Feux d'intensité modérée, mais fréquents	Très faible	Dissémination de graines	Faible	Pin pignon
			Production de rejets de souches	Moyenne à forte	Chêne liège
Espèces pionnières	Feux intenses	Fort	Dissémination de graines	Forte	Pin d'Alep Pin maritime Pin brutia
Espèces endurentes	Feux intenses et répétés	Très faible	Production de rejets	Forte	Chêne kermès Chêne vert Pin des canaries

Tab. 2 : stratégie adaptative des espèces ligneuses arborées méditerranéennes après incendie

Stratégies adaptatives des espèces face au feu

Les différents traits liés à la mortalité, la dispersion, la régénération et la croissance après incendie peuvent être résumés en trois stratégies adaptatives face à la perturbation : stratégies pionnière, de résistance ou d'endurance (tableau 2). On notera qu'il existe toujours un compromis entre ces différents traits, car aucune espèce ne peut à la fois cumuler une forte survie, de bonnes capacités de dispersion, une forte régénération et une forte croissance après incendie (il n'existe pas de « super-espèce »).

Les espèces « pionnières pyrophytes » privilégient une régénération sexuée forte et une bonne capacité de dispersion ; en contrepartie leur mortalité est forte. Il s'agit principalement pour les espèces arborées du pin d'Alep (figure 7), du pin brutia et du pin maritime. Ces espèces sont typiques des régimes de feux intenses. Leurs fortes capacités régénératives se traduisent généralement par un recrutement de plus de 1 000 tiges par hectare et pouvant même dépasser 100 000 tiges par hectare. Ces espèces pré-

sentent fréquemment des cônes sérotineux, le taux de sérotinie variant énormément d'un individu à l'autre et d'une population à l'autre. Ce taux peut atteindre 80 % dans certains peuplements jeunes et fréquemment incendiés. Sa variabilité pourrait expliquer les variations importantes de régénération post-incendie observées. Cependant, la régénération n'est plus possible lorsque la fréquence de feu est trop élevée (risque d'immaturité) : 5 à 7 ans après l'incendie, certains individus de la nouvelle génération sont déjà capables de produire des cônes mais il faut attendre 10 à 20 ans pour reconstituer la banque de graines. Pour une récupération complète et une maturité structurelle et fonctionnelle, on compte 20 à 30 ans.

Les espèces « résistantes » privilégient une mortalité faible ; il s'agit typiquement d'espèces de pins ou de chêne à mortalité faible et à régénération limitée comme le pin pignon ou le chêne liège ; leur croissance est généralement moins forte après l'incendie. Le chêne liège est capable de rejeter depuis ses branches 3 à 4 semaines après l'incendie, voire moins si des pluies significatives sur-

viennent avant ce délai. Ces espèces sont typiques des régimes de feu peu intenses (ou même intenses pour le chêne liège, figure 8), mais fréquents. Le pin pignon est capable de survivre même lorsque 80 % de son houppier est roussi. Sa régénération est plus modeste que celle des pionnières pyrophytes (entre 100 et 1 000 tiges par hectare), car bien que ses graines soient protégées dans des cônes épais, ses cônes ne sont pas sérotineux et les capacités de survie de la régénération sont faibles. À cela s'ajoute une faible distance de dispersion. Les espèces de montagne, comme le pin noir ou le pin sylvestre sont aussi à classer dans la catégorie résistante. En effet, leur régénération après incendie est quasi nulle (en général inférieure à 10 tiges par hectare), alors que leur survie après incendie peu intense est généralement satisfaisante. Ces espèces semblent correctement adaptées au passage de feu de surface (le plus souvent en fin d'hiver), comme en témoigne la présence fréquente de cicatrices de feu.

Enfin, les espèces « endurentes » sont capables de survivre à des incendies successifs et intenses. Il s'agit princi-



Y. Duché, ONF

Fig. 7 : 15 ans après un incendie, régénération de pin d'Alep et de chêne vert

palement d'espèces qui rejettent très bien (chêne kermès, chêne vert), dont la croissance après incendie est forte. Ces espèces sont typiques des régimes de feux fréquents. On notera d'ailleurs que les chênes verts sont susceptibles de perdre leur capacité à rejeter avec l'âge, ce qui laisse penser que leur capacité de survie après incendie pourrait diminuer en cas de longues périodes sans passage du feu.

Impact anthropique et conséquences du changement global

L'essentiel des incendies est d'origine anthropique, et leur fréquence augmente avec la densité de population. Les conséquences attendues du changement climatique comprennent une extension géographique du risque incendie, au-delà de la région méditerranéenne actuelle, et notamment vers l'Ouest de la France.



Y. Duché, ONF

Les formations à pin d'Alep et à pin maritime, qui se situent déjà dans les zones les plus sèches en été, risquent donc d'être confrontées de plus en plus souvent au passage des incendies, au point ne plus parvenir à se régénérer ; cela conduirait progressivement à leur régression au profit de landes, garrigues et maquis à dominantes d'espèces « résistantes » arborées ou arbustives. En altitude, les années de sécheresse associées à une augmentation de la fréquence des feux intenses mettent en danger les peuplements caractéristiques de montagne. C'est notamment le cas en Corse où le pin maritime « monte » dans l'étage supra-méditerranéen dès ouverture du milieu et concurrence déjà le pin laricio.

Quant au chêne liège, son déclin actuel en Europe ne serait pas dû au feu, mais aux changements d'usage, aux maladies et peut-être au changement climatique.

Fig. 8 : peuplement de chêne liège 3 ans après un incendie de forte intensité (du type représenté en médaillon)



S. Royer, ONF



S. Royer, ONF

Fig. 9 : coupe de combustible dans un peuplement de pin d'Alep

Noter la forte réduction de la masse combustible du sous-bois, mais aussi de la densité et du couvert de la strate arborée : les rares feuillus et quelques genévriers ont été conservés.

La sylviculture peut-elle protéger les pinèdes méditerranéennes contre le feu ?

La prégnance du risque incendie en zone méditerranéenne a conduit les forestiers à raisonner la sylviculture pour diminuer la vulnérabilité des peuplements forestiers. Cela concerne en particulier les pinèdes parce qu'elles sont très majoritaires (en France) et parce que les autres formations (de chênes vert et pubescent) sont le plus souvent des taillis ; or le traitement en taillis n'offre pas de possibilités sylvicoles de réduire la vulnérabilité du peuplement (élever la cime, limiter le combustible de surface), sauf en ce qui concerne éventuellement la répartition des coupes dans l'espace.

Sylviculture...

La sylviculture met à profit les facteurs écologiques et les potentialités naturelles pour assurer la pérennité et optimiser durablement les produits et les services que l'homme peut en attendre. Elle se conçoit donc en fonction d'objectifs déterminants qui, en région méditerranéenne, sont surtout d'ordre paysager, environnemental et social (sauvegarde du patrimoine arboré), la production de bois étant assez accessoire. Ainsi la sylviculture traditionnelle des pinèdes et des peuplements mélangés pin et chêne

consiste en un nombre restreint d'éclaircies fortes, avec sélection d'essences en faveur du mélange feuillus-résineux et parfois des élagages. Elle stimule la croissance individuelle des arbres et augmente la distance entre les couronnes ainsi que la hauteur de la base des houppiers. Elle est donc en principe propice à la protection des peuplements contre l'incendie, en permettant l'accroissement des épaisseurs d'écorce et en réduisant la continuité verticale et horizontale du combustible. Cependant l'ouverture de la canopée contribue à favoriser une végétation basse déjà naturellement très dynamique, où un feu devient inévitablement intense quel que soit le traitement appliqué à la strate arborée.

... et autres travaux de défense des forêts contre l'incendie

C'est pourquoi on pratique en parallèle des interventions qui ne relèvent pas de la sylviculture mais d'un dispositif de protection des massifs forestiers, et qui modifient profondément certains peuplements au point parfois de compromettre, au moins temporairement, leur capacité de régénération. C'est en particulier le cas de la création et de l'entretien des « coupures de combustible » (figure 9) : on n'y maintient (pour l'esthétique et la rugosité au vent) qu'un couvert arboré très réduit, de l'or-

dre de 25 % par exemple dans les peuplements à pin d'Alep, et on débroussaille énergiquement tous les 2 à 4 ans en fonction de la vigueur des repousses. L'objectif est de modifier le régime de feu en faisant en sorte que l'incendie se réduise, sur la coupe de combustible, à un feu de surface peu intense sans passage en cime (sauf éventuellement sur quelques arbres isolés) afin de permettre l'intervention des services de lutte dans des conditions optimales de sécurité et d'efficacité (figure 10). Ce traitement de coupe de combustible ne s'applique qu'à une fraction faible de la surface forestière (l'objectif affiché est de l'ordre de 3 à 5 % selon les départements), sur des secteurs préalablement identifiés avec les services de secours comme zones d'appui pertinentes pour lutter contre le feu et limiter les surfaces parcourues.

Un réseau « coupe de combustible » s'est constitué. Il regroupe des chercheurs et des personnels des différentes entités intervenant dans la protection des forêts contre les incendies notamment pour mutualiser les réflexions sur ces coupures : conception (position par rapport au vent et au relief, maillage) et modalités de création et d'entretien (itinéraires techniques). Ce réseau a publié plusieurs guides à l'intention des praticiens ; il a aussi formalisé



Y. Duché, ONF

Fig. 10 : la coupe de combustible a bien eu l'effet attendu

Elle n'a été parcourue que par un feu au sol partiel, et les houppiers des arbres conservés n'ont pas participé à la combustion... de sorte que les pompiers ont pu arrêter le feu.

une méthodologie de retour d'expérience après incendie pour évaluer l'efficacité des coupures existantes, ce qui permet des échanges fructueux.

Alternative : une sylviculture « mixte » à but DFCI ?

Dans certains secteurs où, pour diverses raisons que nous ne détaillerons pas ici, cette complémentarité entre sylviculture traditionnelle et travaux de défense des forêts contre l'incendie (DFCI) n'est pas envisageable, les forestiers ont conçu une sylviculture dite à objectif DFCI qui, dans les peuplements matures, associe à chaque éclaircie « traditionnelle » une opération systématique d'élagage et de réduction des strates basses (débroussaillage, brûlage dirigé ou pâturage contrôlé). Des itinéraires techniques détaillés ont été élaborés localement, mais les objectifs poursuivis ne sont pas toujours clairement définis. Quoiqu'il en soit, l'efficacité de ce type de pratique reste à améliorer entre

forestiers, services d'intervention et organismes de recherche, en systématisant les retours d'expérience pour tirer les enseignements de tout incendie survenant dans ces secteurs.

Intégrer les réponses de la recherche dans les stratégies sylvicoles

Le travail doit donc se poursuivre, d'autant que les résultats récents de la recherche donnent déjà des éléments opérationnels pour structurer la réflexion sylvicole.

Éléments pour la gestion des pinèdes en milieu méso-méditerranéen

Une végétation dynamique de type méso-méditerranéen présente en général une quantité de combustible de surface supérieure à 4 tonnes/ha lorsqu'elle n'a pas subi de débroussaillage récent. Or on peut calculer (formule de Byram⁴) qu'un feu se propageant dans un

sous-bois de 4 t/ha à la vitesse modérée de 0,1 m/s (soit 360 m/h) a une intensité de 720 kW/m ; en été, pour une température ambiante de 30 °C, un tel feu peut roussir des houppiers jusqu'à plus de 12 m (d'après la formule de Van Wagner vue précédemment). En dehors de quelques forêts de pin pignon âgées ou de chêne liège, on voit mal quels peuplements pourraient survivre dans ces conditions. Ainsi, en région méso-méditerranéenne, il est illusoire de chercher à garantir la survie de la strate arborée à l'incendie par de simples mesures d'éclaircie et d'élagage ; cet objectif impose un travail complémentaire de débroussaillage régulier, que ce soit par brûlage dirigé, pâturage contrôlé ou débroussaillage mécanique (figure 11).

Mais le débroussaillage régulier modifie la structure du peuplement ; il est susceptible d'en modifier temporairement l'équilibre et de détruire l'essentiel de la régénération. En conséquence, il est à réserver à des peuplements pour lesquels l'objectif de survie des arbres en cas d'incendie est primordial (arboretum, peuplements porte-graines, peuplements paysagers, d'accueil du public...), sachant qu'il faudra nécessairement suspendre les opérations lors de la phase de régénération de ces peuplements, qui pourra s'étaler sur plusieurs années. Pour le reste de la forêt, mieux vaut chercher à préserver la possibilité de régénération plutôt que les arbres eux-mêmes. Dans ce contexte, la protection d'îlots de semenciers bien répartis au sein des massifs, pour assurer un minimum de régénération naturelle même en cas d'incendies très fréquents, est une idée prometteuse même si les distances de dispersions des pins sont généralement modestes. Par ailleurs, les dépressages précoces (5 ou 10 ans après incendie) ont montré qu'ils permettaient d'améliorer la vigueur des peuplements, d'augmenter la proportion d'arbres produisant des

⁴ L'intensité du feu vaut $I (kw/m) = 18000 W V$, avec W la charge (en kg/m^2) en combustible fin et V la vitesse de propagation du feu (m/s)



S. Royer, ONF

Fig. 11 : éclaircie à objectif DFCI, avec élagage et débroussaillage (qui ne sera pas répété avant la prochaine coupe, soit dans au moins une quinzaine d'années)

cônes, ainsi que le nombre et la qualité des cônes par individu. Cependant, compte tenu du nombre d'individus supprimés, l'impact sur la banque de graines totale est rarement positif, en particulier dans les stations de faible fertilité.

Éléments pour la gestion des pinèdes en milieu supra-méditerranéen

En milieu supra-méditerranéen, le sous-bois est moins dynamique, les arbres atteignent des dimensions plus importantes et ils ont une meilleure valeur marchande. Cela permet parfois des stratégies de sylviculture avec des éclaircies plus progressives (plus fréquentes et moins brutales que dans le cas précédent), du moins après la première éclaircie qui, elle, peut être forte et ouvrir temporairement le milieu si elle intervient tardivement du fait des contraintes du marché. C'est notamment le cas de certaines forêts de pins laricio en Corse, où le rythme des éclaircies permet une croissance assez régulière et soutenue sans trop favoriser

le développement du sous-bois. En outre, ces interventions progressives limitent la pénétration du vent dans le peuplement, ce qui assure sa survie pour des feux d'intensité modérée (scénarios de feu descendant ou latéral). Sinon, dès lors que la dimension des trouées excède la hauteur des arbres, le vent pénètre sous la canopée (Pimont et al. 2011 b), ce qui favorise à la fois la propagation du feu et les dégâts associés aux tempêtes (ces questions font l'objet de travaux de recherches actuels). On notera également que les itinéraires techniques correspondants visent non seulement la sauvegarde des peuplements arborés mais aussi la prise en compte des autres objectifs assignés à ces peuplements (accueil du public, maintien de la biodiversité et des paysages, etc.).

Éléments concernant le brûlage dirigé en forêt

Si paradoxal que cela puisse paraître, le brûlage dirigé est un bon moyen de prévenir le risque incen-

die en réduisant le combustible. Son usage en forêt peut poser question, en particulier vis-à-vis des usagers. Pourtant sa pratique peut être très efficace si les conditions météorologiques et la conduite du chantier permettent d'épargner les arbres et de contenir le feu, tout en faisant un brûlage relativement dynamique.

Pour épargner les arbres, le brûlage dirigé doit être conduit en conditions fraîches car, selon la formule de Van Wagner, un brûlage dirigé réalisé à la température ambiante de 10 °C induira une hauteur de roussissement 20 % plus basse qu'un brûlage de même intensité conduit par 20 °C. En outre, la fraîcheur de la température ambiante induit également une baisse de l'intensité du feu.

Par ailleurs, l'intensité du feu est directement proportionnelle à la quantité de combustible consommée durant le brûlage. La consommation de litière diminue avec son humidité (qui dépend de la météorologie du jour même et des jours précédents), mais augmente avec le temps de séjour du feu. En combinant les formules de Van Wagner et Byram, on peut évaluer la hauteur de roussissement foliaire par la formule :

$$h = \frac{82000 (W \times V)^{0,67}}{(60 - T_{\text{air}})}$$

où W est la charge en combustible (kg/m^2) et V la vitesse de propagation du feu (en m/s). À titre d'exemple, les hauteurs de roussissements prédites peuvent être visualisées sur la figure 12, pour deux températures de l'air et trois faciès typiques.

Comme nous l'avons vu précédemment, la présence de vent tend à réduire la hauteur de roussissement d'un feu d'intensité donnée. Il peut donc être utile de réaliser le brûlage en conditions modérément ventées, sous cer-

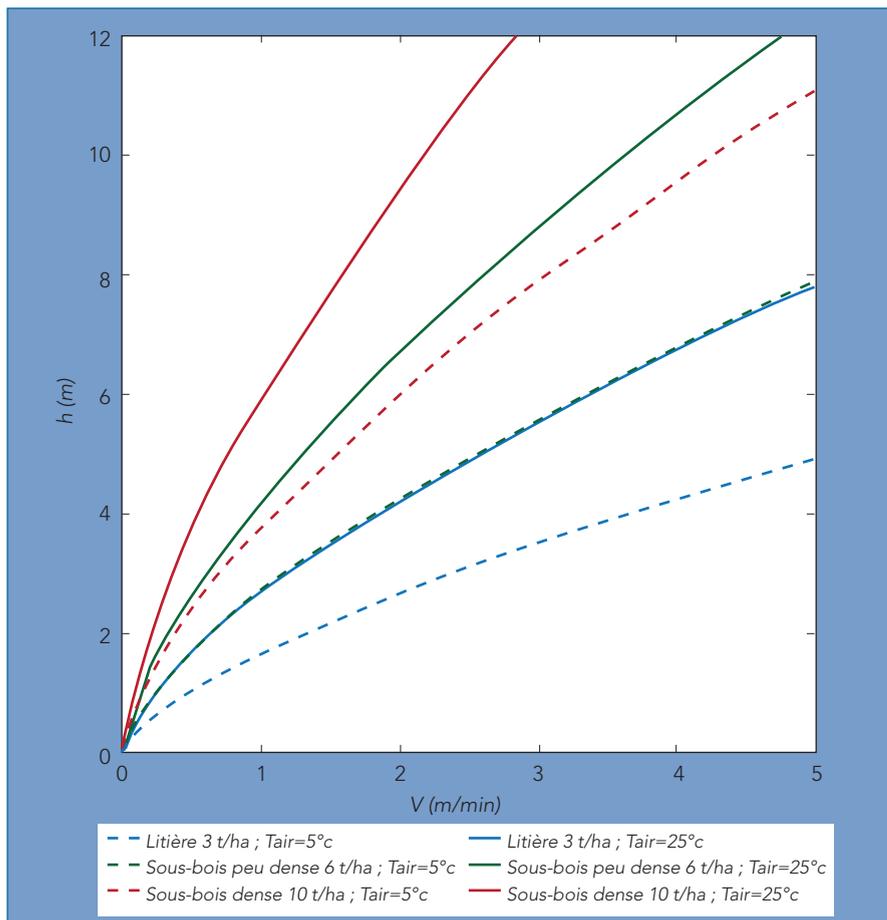


Fig. 12 : hauteurs de roussissement foliaire pour différents sous-bois typiques et deux valeurs de températures de l'air, en fonction de la vitesse de propagation du feu (m/min)

taines conditions. En effet, le vent permet la propagation du feu dans des conditions de forte humidité et faible température ambiante, propres à minimiser les impacts. Ce type de brûlage doit être conduit en « bandes successives », selon le principe présenté sur la figure 13, afin de contrôler la vitesse de propagation du feu ; le chef de chantier peut alors empêcher le feu d'accélérer sur chaque bande en réduisant sa largeur, de manière à maintenir l'intensité du feu dans une limite acceptable. D'une manière générale, on veillera donc à travailler avec des températures ambiantes basses, si possible en présence de vent (20 à 40 km/h), et en maintenant l'intensité du feu dans une gamme permettant la propagation, mais suffisamment faible pour limiter les dégâts sur les houppiers. Sans oublier qu'en cas de vent, les dégâts sont produits dans la colonne de convection, c'est-à-dire largement en aval de la zone en combustion.

Mais la « fenêtre de tir » est réduite : pas plus de 15 à 20 jours par an dans l'étage méso-méditerranéen. Le brûlage dirigé ne peut donc pas se substituer au débroussaillage classique, d'autant qu'il mobilise beaucoup de monde et exige une grande compétence. Pas question d'y renoncer pour autant : c'est aussi, pour les gestionnaires et équipes de secours, un moyen indispensable de se « roder » face au feu et d'acquiescer les bons réflexes.

En résumé et pour conclure

Deux mécanismes différents liés au passage du feu peuvent conduire à la mort immédiate de l'arbre : un feu qui reste longtemps au pied d'un arbre dont l'écorce est trop mince et/ou un panache qui chauffe trop le houppier.

Il en résulte qu'en basse région méditerranéenne, compte tenu de l'abondance de la biomasse arbustive et de la faible taille des ar-



Y. Duché, ONF

Fig. 13 : conduite d'un brûlage dirigé en bandes successives
Les bandes 1, 2, 3... sont allumées successivement et leur largeur est modulée en fonction du vent, de la pente, et de la quantité et de l'état du combustible au sol.

bres, la sylviculture seule ne peut suffire à protéger le peuplement, sauf peuplement exceptionnellement haut ou très fermé et quasiment sans sous-bois. Un débroussaillage complémentaire est généralement indispensable. Cette analyse ne s'applique pas aux peuplements de montagne, nettement plus hauts et avec des sous-bois moins dynamiques.

Pour mettre en œuvre le débroussaillage en milieu boisé, le brûlage dirigé peut être une bonne solution s'il est conduit dans des conditions adéquates (en particulier de température ambiante et de vent). Comme ces conditions sont assez contraignantes, les journées permettant le brûlage sont peu nombreuses, ce qui limite les surfaces pouvant être traitées de cette manière.

Par ailleurs les espèces de pins sont d'une manière générale menacées par une augmentation des fréquences de feu, que ce soit en basse région méditerranéenne, où la reconstitution de la banque de graines nécessite entre 10 et 20 ans, ou même en montagne où les peuplements régénèrent mal après incendie sévère.

Enfin, l'impact probable du changement climatique sur la fréquence de feux, à la fois en zone méditerranéenne et dans l'ouest de la France, nous impose de poursuivre et élargir la réflexion sur l'adaptation des sylvicultures et les travaux de prévention.

François PIMONT
Jean-Luc DUPUY
Éric RIGOLOT

Écologie des forêts
méditerranéennes
UR0629
INRA Avignon

Yvon DUCHÉ
Pôle territorial DFCl
ONF DT Méditerranée

Bibliographie

Botelho HS, Rego FC, Ryan KC, 1998. Tree mortality for *Pinus pinaster* of Northern Portugal. In : Proc. 13th Conf. Fire and Forest Meteorology. IAWF. pp. 235-240

Catry FX, Moreira F, Duarte I, Acacio V, 2009. Factors affecting post-fire crown regeneration in cork oak (*Quercus suber* L.) trees. European Journal of Forest Research vol. 128, pp. 231-240

Fernandez PM, Vega JA, Jimenez E, Rigolot E, 2008. Fire résistance of European pines. For. Ecol. Management vol. 256, pp. 246-255

Gutsell SL, Johnson EA, 1996. How fire scars are formed: coupling a disturbance process to its ecological effect. Canadian Journal of Forest Research vol. 26, pp. 166-174

Pimont F, Rigolot E, Prodon R, 2011a. Comparison of post-fire mortality in endemic Corsican black pine (*Pinus nigra* ssp. *laricio*) and its direct competitor (*Pinus pinaster*). Annals of Forest Sciences, vol. 68 n°2, pp., 425-432

Pimont F, Dupuy J-L, Linn RR, Dupont S, 2011b. Impact of tree canopy structure on wind-flows and fire propagation simulated with FIRETEC. Annals of Forest Sciences vol. 68 n°3, pp. 523-530

Rigolot E, 2004. Predicting postfire mortality of *Pinus halepensis* Mill. and *Pinus pinea* L. Plant Ecology vol. 171, pp. 139-151

Ryan KC, 1998. Analysis of the relative value of morphological variables in predicting fire-caused tree mortality. In : Proceedings of the 3rd International Conference on Forest Fire Research and 14th Conference on Fire and Forest Meteorology. Luso-Coimbra, Portugal (Ed. DX Viegas) pp. 1511-1526 (ADAI -Associacao para o Desenvolvimento da Aerodinamica Industrial: Coimbra, Portugal)

Ryan KC, Amman GD, 1994. Interactions between fire-injured trees and insects in the greater Yellowstone area. Plants and their Environments. In : US Department of Interior and National Park Service (ed.), Book of Proceedings of the First Biennial Scientific Conference on the Greater Yellowstone Ecosystem 1991, pp. 259-271

Pausas JG, Llovet J, Rodrigo A, Vallejo R, 2008. Are wildfires a disaster in the Mediterranean basin ?- A review. Int. J. Wildland Fire, vol. 17, pp.713-723

Sidoroff K, Kuuluvainen T, Tanskanen H, Vanha-Majamaa I, 2007. Tree mortality after low-intensity prescribed fires in managed *Pinus sylvestris* stands in southern Finland. Scand. J. For. Res., vol. 22, pp. 2-12

Van Wagner CE, 1977. Conditions for the start and spread of crown fire. Canadian Journal of Forest Research, vol. 7, pp. 23-24