

Ecologie du pin maritime en relation avec le feu et gestion des peuplements pour leur protection contre les incendies

par Eric RIGOLOT et Paulo FERNANDES

***Le pin maritime est un arbre
qui résiste très bien au feu, et ses
capacités de reconstitution après
un incendie sont plutôt bonnes.***

***Paradoxalement, ces mêmes
caractéristiques qui rendent le
pin maritime, en tant qu'individu,
plus résistant, sont aussi la cause
de la forte combustibilité
des peuplements qu'il constitue :
longues aiguilles, forte densité
des jeunes peuplements...***

***Les auteurs proposent
de retourner ce paradoxe
en faveur d'une gestion préventive
active des peuplements de pin
maritime par l'application
raisonnée de brûlages dirigés
périodiques.***

Introduction

Le pin maritime est l'une des principales espèces forestières de l'Europe du Sud-Ouest aussi bien géographiquement qu'économiquement. C'est pourquoi beaucoup des études menées sur les relations entre cette espèce et le feu l'ont été en Espagne et au Portugal.

Le risque statistique d'incendie – fondé sur la moyenne annuelle des surfaces brûlées ramenée à la surface totale couverte par l'espèce – associé au pin maritime est considéré élevé en Espagne (ICONA 1982) et très élevé au Portugal (REGO 1991). Ainsi, sur la période 1980-1986 plus de 18% de la surface total du pin maritime portugais a brûlé, soit une valeur bien supérieure à celle de tout autre espèce (ALMEIDA & REGO 1990), et sur la période 1974-1994 les zones de pin maritime ont concentré 35% des zones forestières brûlées en Espagne (PAUSAS & VALLEJO 1999).

De nombreuses études d'incendies et de feux expérimentaux (BURROWS *et al.* 1988) en plantations de cette espèce en Australie montrent sa vulnérabilité au feu en l'absence de pratiques sylvicoles adéquates et de gestion du combustible.

Les peuplements de pin maritime sont fortement combustibles, et pourtant cette espèce a des caractéristiques qui assurent à ses organes une certaine résistance au feu, et des modalités de reproduction qui lui permettent de se reconstituer rapidement après incendie.

Est-il possible de mettre à profit les caractéristiques individuelles de résistance au feu du pin maritime pour développer des pratiques sylvicoles et de maîtrise du combustible qui utilisent le feu comme outil de gestion ? C'est la question à laquelle on tentera de répondre ici.

L'adaptation du pin maritime au feu

On distinguera l'adaptation du pin maritime par les caractéristiques morphologiques et écologiques individuelles, de l'adaptation de l'espèce par ses capacités de régénération après incendie.

Les caractéristiques individuelles de résistance au feu

La principale caractéristique de résistance au feu du pin maritime est son épaisseur d'écorce, non pas en valeur absolue, puisque des espèces de plus grande dimension peuvent accumuler des écorces beaucoup plus épaisses (KEELEY & ZEDLER 1998), mais bien parce que le développement d'un rhytidome suffisamment épais pour protéger le cambium est pour cette espèce assez précoce (RYAN *et al.* 1994) comme le montre la figure 1.

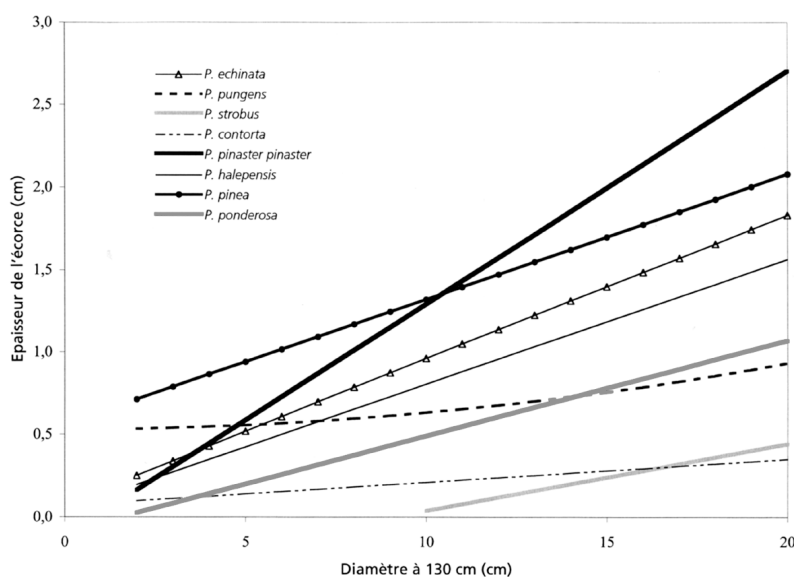
L'épaisseur d'écorce du pin maritime est néanmoins assez variable, avec une plus grande épaisseur pour la sous-espèce méditerranéenne (NICOLAS & GANDULLO 1967), pour laquelle l'écorce peut occuper plus de la moitié de la section du tronc (ALIA *et al.* 1996). L'épaisseur de l'écorce est caractérisée par un fort gradient de décroissance verticale, surtout chez les arbres jeunes : à l'âge de 10 ans, l'épaisseur de l'écorce à la base du tronc est quasiment le double de celle à 130 cm (DE RONDE 1982). Cette caractéristique rend cette espèce propice au traitement par des feux courants avec des flammes de petite taille comme dans le cas du brûlage dirigé. Il est à noter que la résistance du cambium du tronc aux dommages thermiques est directement proportionnel au carré de l'épaisseur de l'écorce (PETERSON & RYAN 1986 ; REGO & RIGOLOT 1990). Les dommages du feu au cambium deviennent peu probables au delà d'une épaisseur d'écorce de 2,5 cm (RYAN 1998).

Les fissures du rhytidome du pin maritime augmentent la possibilité d'exposition du cambium à des températures létales (DE RONDE 1982), mais il est probable que l'air qui s'y trouve joue comme un isolant et diminue l'effet d'échauffement (HARE 1961).

Les caractéristiques morphologiques des aiguilles de pin maritime et des bourgeons influencent la réponse à l'échauffement. Les aiguilles de pin maritime survivent à des températures de 55-65 °C et de 65-75 °C durant respectivement une minute et une seconde (FREITAS 1995 ; DUHOX 2004). Les aiguilles de pin maritime, dont le rapport surface/volume est moins élevé que celles du pin d'Alep et du pin pignon, sont plus tolérantes au stress thermique (ALEXANDRIAN & RIGOLOT 1992 ; FERNANDES & REGO 1998 ; RIGOLOT 2004). Cette caractéristique morphologique des aiguilles de pin maritime explique aussi en partie la note d'inflammabilité moyenne (2 à 3 sur une échelle variant de 1 à 5) attribuée aux aiguilles de pin maritime, valeur moins élevée que celle des aiguilles de pin d'Alep (VALETTE 1990).

DUHOX (1994) rapporte que les températures létales des bourgeons de pin maritime sont plus élevées que celles de ses aiguilles. Les bourgeons du pin maritime sont en effet de grande taille et sont protégés par leurs écailles et les aiguilles qui les recouvrent. RYAN *et al.* (1994) considèrent que le pin maritime est comparativement moins sen-

Fig. 1 :
Épaisseur de l'écorce en fonction du diamètre à 130 cm du pin maritime et d'autres espèces résineuses méditerranéennes et nord américaines
Sources : Harmon 1984 ; Ryan & Reinhardt 1988 ; Hengst & Dawson 1994 ; Ryan *et al.* 1994



sible aux dommages foliaires que d'autres espèces méditerranéennes (pin d'Alep, pin pignon) et d'Amérique du Nord (*Larix occidentalis*, *Pinus ponderosa*, *Sequoia sempervirens*, *Pseudotsuga menziesii*).

Les possibilités de feu de cime, et en conséquence, la gravité des effets du feu sur les arbres, diminue avec l'augmentation de la distance entre la base du houppier et le combustible du sous bois, et augmente avec la densité foliaire de la cime (VAN WAGNER 1973).

L'élitage naturel du pin maritime, considéré de niveau intermédiaire (KEELEY & ZEDLER 1998), conduit les individus adultes à un rapport de 1/3 entre la longueur du houppier et la hauteur totale de l'arbre (ALIA *et al.* 1996). Selon MAUGÉ (1987), des peuplements denses de la sous-espèce *pinaster* favorisent la mort des branches basses, mais pas l'élitage naturel proprement dit. Le couvert du feuillage du pin maritime est considéré par ALIA *et al.* (1996) comme peu dense. RICHARDSON & RUNDEL (1998) soulignent que le faible indice de surface foliaire (LAI) de beaucoup d'espèces de pin est lié à la courte permanence des aiguilles dans la cime. Le pin maritime observe cette tendance, avec LAI = 3 (BERBIGIER & BONNEFOND 1995), ou 0,8 – 2,3 (OLIVEIRA *et al.* 2000), et une durée de persistance des aiguilles sur l'arbre de deux à trois ans (MAUGÉ 1987). Ces éléments tempèrent la susceptibilité des peuplements de pin maritime à entretenir des feux de cimes généralisés.

De bonnes capacités de reconstitution après incendie

Les individus vigoureux de *Pinus pinaster* fleurissent entre 7 et 8 ans (MAUGÉ 1987), mais la floraison est plus précoce dans les populations sujettes à des feux fréquents, et peut même avoir lieu dès 4 ans avec la première fructification entre 5 et 12 ans (MARTÍN & GIL 2000 ; TAPIAS *et al.* 2001).

Les graines de pin maritime sont protégées par les cônes, des prédateurs, des champignons et des pathogènes, ainsi que du feu. Les dimensions des cônes de cette espèce sont très supérieures à la moyenne des pins (MAUGÉ 1987) ; ils constituent une protection mécanique et thermique efficace.

Le temps de rétention des graines mûres dans les cônes des pins en général dépend de l'espèce, des conditions environnementales,

et du taux de sérotinité. Les cônes sérotineux sont maintenus fermés par de la résine qui ne fond qu'avec les hautes températures accompagnant le passage du feu. L'ouverture des cônes est ensuite possible sous l'effet des variations hygrométriques de l'air. Le caractère sérotineux des cônes de pin maritime est établi (LANNER 1998), bien que d'une fréquence discutée par certains auteurs. Ce phénomène de thermo-déhiscence chez le pin maritime est en effet très variable entre les populations et entre les individus d'une même population, mais semble toujours présent : le pourcentage de cônes fermés variait entre 2% et 97% dans 14 populations de l'Espagne, avec une fréquence plus élevée de cônes sérotineux dans les peuplements les plus jeunes de la même population (MARTÍN & GIL 2000). Le pin maritime présente un taux de cônes sérotineux relativement faible en comparaison du pin d'Alep ou du pin radiata chez lesquels ce caractère est très développé (REYES & CASAL 2002). Finalement la durée de rétention des graines dans les cônes du pin maritime est moyenne en comparaison des autres espèces de pin.

Le pin maritime constitue néanmoins une banque de graines aérienne dans les cônes du houppier. Dans ces conditions, la durée de vie des graines est importante. Des études de laboratoire REYES & CASAL (2001) montrent que les graines de pin maritime peuvent survivre 11 ans dans les conditions idéales de conservation (faible température et faible humidité relative de l'air). *In situ* la banque de graines aérienne d'un peuplement de pin maritime varie énormément, selon l'âge, la densité, le taux de sérotinité et la qualité de la station, pouvant atteindre plus de quatre millions d'unités par hectare (MARTÍN & GIL 2000). La banque de graine sur le sol est au contraire réduite (VALBUENA & CALVO 1998 ; REYES & CASAL 2001) et éphémère (MARTÍNEZ-SÁNCHEZ *et al.* 1995 ; MARTÍN & GIL 2000).

Le pin maritime est une espèce qui ne requiert pas de températures excessivement hautes pour l'ouverture des cônes et la dispersion des graines (REYES & CASAL 2002), les températures estivales habituelles dans nos régions accompagnées de faibles humidités relatives de l'air étant généralement suffisantes pour ce faire. Les températures nécessaires à l'ouverture des cônes sérotineux doivent en effet atteindre les 42 à 50°C (MARTÍN & GIL 2000 ; TAPIAS *et al.* 2001).

Néanmoins l'ouverture n'est pas systématique : les chocs thermiques imposés à des cônes pour simuler en laboratoire le passage d'un feu ne provoque l'ouverture des écailles des cônes de pin maritime que dans 50% des cas en moyenne (REYES & CASAL 2001).

La régénération après incendie du pin maritime semble beaucoup plus abondante s'il y a mortalité des houppiers, mais pas leur combustion, laquelle élimine ou endommage la majorité des graines. Ainsi MARTÍNEZ *et al.* (2002) ont vérifié qu'après un feu de cime, on constatait un moins grand nombre de graines dispersées, un plus fort taux de dommages sur celles-ci, un moindre taux de viabilité et de germination des semences, en comparaison d'un feu de surface.

L'étude de laboratoire des effets du feu sur le pouvoir germinatif des graines de pin maritime (REYES & CASAL 2001) montre que sur ce critère, cette espèce est relativement peu sensible à la stimulation thermique, à la présence de cendres ou à l'âge de la graine en comparaison notamment du pin radiata. En revanche, la probabilité de germination diminue sur des graines soumises directement à des températures supérieures à 130°C (ESCUERO *et al.* 1999) ou 200°C (MARTÍNEZ-SÁNCHEZ *et al.* 1995).

Les graines de pin maritime ont de petites ailes qui ne favorisent pas leur dissémination anémophile (OLIVEIRA *et al.* 2000). De plus leur taille est relativement importante, avec un poids moyen de 0,05 à 0,07 g (ESCUERO *et al.* 2000 ; REYES & CASAL 2001), qui les placent au deuxième rang après le pin pignon des graines les plus résistantes à la chaleur des pins du Sud de l'Europe (ESCUERO *et al.* 1999). Ces graines massives permettent de produire des semis plus vigoureux dont le taux de mortalité est plus faible que ceux issus de graines de plus petite taille (REYES & CASAL 2001). Face à la pression sélective du feu et compte tenu de la variabilité considérable des dimensions des propagules, il est plausible de considérer avec ESCUERO *et al.* (2000) un compromis entre l'efficacité de la dissémination post-incendie et l'aptitude compétitive des plantules pour leur survie.

Le résultat de la régénération post-incendie est très variable, car la densité de plantules produites est corrélée positivement avec le recouvrement de la litière rémanente (CASTRO *et al.* 1990), ce qui signifie que la

reconstitution du peuplement est d'autant moins favorisée que le feu est sévère.

L'ouverture des cônes se déroule progressivement dans les deux ou trois jours qui suivent le choc thermique (REYES & CASAL 2002) de sorte que, lorsque la dispersion des graines commence, le feu est généralement éteint et les graines tombent sur un lit de cendres refroidies. MARTÍNEZ *et al.* (2002) rapportent que 80-90% de la dispersion des semences a lieu dans les deux mois qui suivent l'incendie, et LUIS-CALABUIG *et al.* (2002) constatent que la germination des semences se prolonge durant les deux ans qui suivent l'incendie.

Des peuplements pourtant hautement combustibles

Certains des caractères morphologiques ou reproductifs qui favorisent une moindre sensibilité individuelle du pin maritime au feu participent paradoxalement à la forte combustibilité des pinèdes de cette espèce.

Ainsi les aiguilles de grande dimension forment une fois tombées au sol des litières épaisses et aérées très favorables à la propagation du feu. Il est commun de rencontrer des litières dont l'épaisseur varie de 10 à 50 cm. L'épaisseur de la litière de la pinède de 28 ans ayant fait l'objet de l'expérimentation portugaise développée dans cet article était de 13 cm. En outre, une partie des aiguilles mortes forment une litière aérienne suspendue aux branches basses des pins et recouvrant les arbustes.

Les bonnes capacités de régénération après incendie du pin maritime amène au développement de jeunes peuplements très denses et donc très combustibles. Ainsi la régénération de pin maritime après l'incendie de 1979 sur la commune de La Garde-Freinet dans les Maures présentée plus loin compte 40 000 tiges par hectare.

Le couvert généralement clair du feuillage des arbres adultes favorise le développement d'un sous-bois abondant qui alimente des feux de forte intensité, bien supérieure aux capacités de résistances des individus, même âgés. Ainsi le cas d'étude portugais présenté ici, comprenait 45 tonnes par ha de combustible disponible au feu.

En France, une note de combustibilité de 7 sur une échelle de 1 à 9 est attribuée aux pinèdes de pin maritime (CEMAGREF 1987).

La thèse développée par les auteurs propose de retourner ce paradoxe en faveur d'une gestion préventive active des peuplements de pin maritime. Le gestionnaire méditerranéen peut s'appuyer sur la relativement bonne tenue du pin maritime aux feux de faible intensité, pour développer un programme de mise en autoprotection de ces pinèdes par l'application raisonnée de brûlages dirigés périodiques. L'objectif est de maintenir en permanence la charge en combustible disponible en deçà de celle qui conduirait un incendie de remplacement du peuplement.

Deux études sont présentées pour appuyer cette thèse, l'une menée en France dans le massif des Maures et l'autre au Portugal dans la région Nord-Est.

Deux expériences montrant les potentialités de gestion des peuplements de pin maritime par le brûlage dirigé

1 - Le brûlage dirigé comme technique de première éclaircie dans un contexte de prévention des incendies de forêts (Binggeli 1997 ; Rigolot 2000)

Le brûlage dirigé est maintenant une technique classique de contrôle du combustible dans le cadre de la prévention des incendies de forêt (FERNANDES *et al.* 2002 ; DUCHÉ & RIGOLOT 2004). En revanche, l'utilisation du brûlage dirigé comme outil sylvicole est une possibilité souvent citée, mais peu explorée en Europe méditerranéenne. Cet objectif revêt des applications variées : au Nord-Ouest des Etats-Unis (PYNE *et al.* 1996) et au Canada (TAYLOR 1998), le brûlage dirigé est une technique d'intervention commune en gestion sylvicole industrielle pour préparer la régénération naturelle ou la plantation, et pour éliminer les rémanents d'exploitation. Par ailleurs, différentes études expérimentales ont montré l'intérêt du brûlage dirigé pour l'éclaircie pré-commerciale de pinèdes issues de régénération naturelle, une application très prometteuse, mais peu explorée,

ce qui explique que le développement de prescriptions adéquates soit à peine initié (CROW & SHILLING 1990 ; SACKETT & HAASE 1998). L'expérimentation ici décrite entre dans cette dernière catégorie. Elle a déjà été présentée dans la revue *Forêt Méditerranéenne* par BINGGELI (1997) pour illustrer l'intérêt de l'élagage et l'éclaircie thermique en D.F.C.I.

Des brûlages expérimentaux sous régénération dense de pin maritime après incendie ont été initiés en 1995, afin de mettre en relation le comportement du feu avec les impacts apparents immédiats, puis les effets différés, sur les arbres.

Le jeune peuplement étudié se développe sur 400 à 600 m à l'aval d'une coupure de combustible située en haut de versant (Cf. Photo 1).

Après la première phase expérimentale de 1995, puis une série de brûlages de gestion en 1996 réalisés sur les acquis de 1995, le dispositif expérimental a été réactivé à l'automne 1997. Il s'agissait dans cette seconde phase de suivre les effets de différents régimes de brûlages dirigés sur la mortalité/survie du pin maritime et la dynamique du combustible.

Photo 1 :

Coupure de combustible du Camp de la Suyère (La Garde-Freinet, Var) et régénération dense de pin maritime à l'aval.
Photo E.R./INRA Avignon



L'objectif est finalement de répondre aux trois séries de questions suivantes :

1. Conforter la coupure de combustible. Les brûlages dirigés périodiques permettent-ils de diminuer suffisamment la puissance du feu pour éviter un feu total aux abords de la coupure ? D'un feu total concernant toutes les strates de végétation, l'objectif est de passer avant la coupure à un feu courant au sol s'élevant seulement localement dans la cime des arbres.

2. Mettre en auto-protection le peuplement. Les traitements proposés peuvent-ils permettre une réduction encore plus drastique de la puissance du feu pour garantir la survie d'une proportion significative des arbres ? Autrement dit, peut-on tendre progressivement vers une auto-résistance d'une partie du peuplement ? Pour ces deux séries de question, avec quel régime de brûlages et en combien d'années parvient-on à ces résultats ?

3. Gérer finement l'éclaircie. Le choix des conditions de brûlage permet-il de prévoir suffisamment finement l'impact sur les arbres, en termes de taux de survie et de diamètre seuil de survie ? Le brûlage dirigé pourrait-il être un outil précis d'intervention sylvicole ?

Les modalités d'intervention mises en œuvre pour atteindre ces objectifs comprenaient les étapes suivantes :

- ouverture par le brûlage dirigé en 2 ou 3 passes étalées sur 4 à 10 ans. Ces passages multiples sont nécessaires pour compléter l'ouverture du peuplement et résorber les charpentes des arbres et arbustes dévitalisés, et le surplus de litière issue des roussissements d'aiguilles,
- entretiens tous les 2 ans sur les 100 à 200 premiers mètres,
- entretiens tous les 3 à 5 ans sur la moitié inférieure du versant.

Description du site

Le site expérimental est situé sur la commune de La Garde-Freinet dans le massif des Maures (Var). Le site a été parcouru par un incendie en 1979, épargnant seulement quelques pins maritimes de diamètre important. Les parcelles étudiées sont constituées de la régénération naturelle de pin maritime qui lui a succédé. Lors de l'étude en 1995, le peuplement est donc âgé de 15 ans. Les pins

maritimes ont un diamètre moyen de 3,3 cm et une hauteur moyenne de 4 mètres.

Le pin maritime est associé à quelques chênes-lièges et localement au taillis de châtaignier. La strate arbustive est composée de bouquets épars d'arbousier, de bruyère arborescente et de bruyère à balai.

Le peuplement n'a subi aucun traitement sylvicole avant l'intervention par le brûlage dirigé.

Le recouvrement de la strate arborée est de 90% ; celui de la strate arbustive de 30 à 40% ; celui de la strate herbacée est compris entre 0 et 10%. La couverture morte au sol est pratiquement continue, et composée principalement d'aiguilles de pin et de quelques branches mortes. L'épaisseur moyenne de la litière est importante et d'environ 12 cm. De surcroît, beaucoup d'aiguilles restent suspendues dans les verticilles bas des arbres et sur les arbustes.

Méthode

La survie du pin maritime est évaluée au regard des conditions de brûlage dirigé. Les conditions de brûlage dirigé comprennent l'un des facteurs suivants ou leur combinaison :

- la conduite du feu (montante ou descendante),
- la saison du brûlage (hiver = repos de la végétation ; printemps = activité végétative),
- caractéristique du combustible (épaisseur de la litière, recouvrement des arbustes...),
- la teneur en eau du combustible (litière profonde, superficielle et suspendue),
- les conditions microclimatiques au sein de la parcelle et à la station météo située à découvert sur la coupure de combustible (température, hygrométrie, vitesse du vent),
- le comportement du feu (vitesse de propagation, hauteur de la flamme).

Les valeurs des paramètres listés ci-dessus ont été notées au moment du passage du front de flamme, puis les impacts sur les pins ont été évalués dans les semaines qui ont suivies.

La dynamique du combustible a été suivie au travers des trois strates dominantes :

- la litière : stock initial, consommation par le brûlage, chute des aiguilles roussies par le brûlage, chute naturelle des aiguilles,
- les bruyères : recouvrement et hauteur initial, charpentes après l'incendie de 1979,

Placette	Date du brûlage	Saison	Conduite du feu	Charge en Combustible kg/m ²	Teneur en eau litière %	T °C	HR %	Vent général	Vitesse m/h
1	7 mars 95	Hiver	Descendant	1.0	13	7	53	modéré-fort	18
2	15 mars 95	Hiver	Descendant	1.2	25	11	60	faible-moderé	12
3	17 mars 95	Hiver	Descendant	0.8	19	12	58	faible-moderé	12
4	9 mai 95	Printemps	Descendant	1.2	18	22	53	faible-moderé	18

rémanents après chaque brûlage, rejets après brûlage,

– les pins : densité et distribution des diamètres avant intervention, taux et diamètre de mortalité après le premier brûlage, mortalité supplémentaire après les brûlages d'entretien, affaissement et décomposition des pins morts au cours du temps et au fur et à mesure des brûlages d'entretien.

Au total une vingtaine de parcelles ont été installées : cinq sur les brûlages de 1995, sept sur ceux de 1996 et huit sur ceux de 1998.

Résultats et discussion

Ces résultats présentés ici ne concernent que quatre des parcelles brûlées en 1995.

Les parcelles étudiées possédaient des charges en combustible comparables et voisines de 1kg/m² (Cf. Tab. I). La première variable qui explique la mortalité est la saison de brûlage dirigé. En effet la parcelle 4 brûlée au printemps a connu une mortalité des pins de 80%, très supérieure aux autres parcelles (Cf. Tab. II). Pour les parcelles brûlées au repos végétatif, la mortalité des pins semble plutôt expliquée par le teneur en eau de la litière. La parcelle 2 dont la litière est plus humide que celle des trois autres placettes et proche de l'humidité d'extinction du feu bénéficie d'une survie quasi totale des pins.

La hauteur de carbonisation des troncs est un bon indicateur de la hauteur des flammes. La parcelle traitée au printemps subit un feu plus puissant avec des flammes d'une hauteur moyenne de 1,20 m alors que les trois parcelles brûlées en hiver n'ont des flammes que de 80 cm en moyenne. Le dépressage thermique concerne des brins de diamètre à 130 cm inférieur à 3 cm pour les parcelles traitées en hiver, alors que les pins jusqu'à 6 cm sont tués par le brûlage de printemps. Cette différence s'explique non seulement par la plus forte puissance du feu de

Placette	Roussissement du feuillage %	Hauteur de carbonisation maxi (m)	Taux de mortalité %	Diamètre du seuil de mortalité (cm)
1	36	0.8	43	3
2	40	0.7	< 1	-
3	36	0.8	18	3
4	84	1.2	80	6

printemps, mais aussi par l'état physiologique des arbres en croissance plus sensibles à l'échauffement.

Des brûlages d'entretien ont ensuite été menés dans les années qui ont suivi sur certaines des premières parcelles ouvertes par le brûlage dirigé, montrant ainsi la faisabilité de brûlages périodiques. Des suivis ont été mis en place pour évaluer, selon la fréquence des brûlages d'entretien, la dynamique de reconstitution du combustible entre deux brûlages, la vitesse de destruction des rémanents de bruyère et des arbres morts, et l'impact des brûlages d'entretien sur les arbres vivants.

Ces brûlages d'entretien permettent de résorber la couche de litière qui se reconstitue chaque année par chute naturelle des aiguilles, et surtout celle liée aux roussissements foliaires du brûlage d'ouverture. Ces brûlages permettent aussi de contrôler le recru des espèces arbustives rejetant de souche, comme la bruyère et l'arbousier. Les brûlages d'entretien conduits à contre pente et à contre-vent en période hivernale n'ont pas produit de mortalité supplémentaire parmi les pins maritimes car ils n'ont jamais atteint la puissance du brûlage d'ouverture. En revanche, des modes de conduites particulièrement dynamiques, montant la pente et/ou en période chaude et sèche, ont été expérimentés et ont démontré la possibilité de compléter l'éclaircie initiale, si elle avait été insuffisante. Dans tous les cas les pins morts s'affaissent et sont détruits au fil des

Tab. I (en haut) :

Caractéristiques des brûlages dirigés

HR : humidité relative

Tab. II (ci-dessus) :

Impacts comparés des brûlages dirigés sur les pins

traitements successifs selon une dynamique qui reste à préciser.

Le risque d'attaques par des insectes de type scolytes n'est pas à exclure avec ce genre d'opération, bien qu'aucune n'est été observée sur le site d'étude. Le risque se concentre autour des mois d'avril à septembre (période d'essaimage), et il est proportionnel au nombre de tiges qui présentent des signes d'affaiblissement pendant cette période. Il est donc préférable de mener les opérations de brûlage en automne, afin que les tiges endommagées aient le temps de mourir et de sécher pendant l'hiver, et que leurs tissus soient secs le printemps arrivé.

Conclusions

Faute de financements pour poursuivre le programme de brûlage et les suivis associés, le dispositif n'a pu livrer qu'une partie des résultats attendus. Ceux-ci sont particulièrement encourageants. Le brûlage dirigé peut être envisagé pour intervenir dans ce type de régénération naturelle, et il est d'ores et déjà assuré que :

- des brûlages dirigés d'ouverture sont possibles dans ce type de pinède en choisissant soigneusement les modalités d'intervention, malgré la densité des arbres et la continuité horizontale et verticale du combustible. Une fois le milieu ouvert, des brûlages tous les deux ans, voire tous les ans sont possibles, même si la seconde fréquence semble préférable ;

- des conditions de brûlage contrastées conduisent à des impacts différenciés sur le taux de survie des arbres et sur les diamètres seuil de mortalité. En ce sens, le brûlage dirigé est un outil sensible de dépressage et de défoliation thermique. Certains facteurs comme la teneur en eau du combustible mort et fin, ou la saison du brûlage semblent fortement influencer sur ces paramètres. La formulation de prescription combinant plusieurs facteurs décrivant les conditions de brûlage dirigé et permettant le contrôle de la survie du pin maritime semble donc un objectif tout à fait réaliste ;

- le brûlage dirigé bien conduit, permet de résorber de grandes quantités de combustible tout en conservant l'intégrité de l'étage arboré. Contrairement aux interventions mécaniques, le traitement du peuplement est progressif (BAYLAC & BINGGELI 2004). Le suivi sur le moyen terme de la dynamique du com-

bustible (dégradation des arbres morts, reconstitution de la litière, rejet des bruyères...) après chaque modalité de traitement, permet d'évaluer la rémanence de leurs effets et la durée pendant laquelle le peuplement est en situation d'autoprotection ;

- des répétitions à haute fréquence de brûlages sont possibles dans ce type de milieu. Restent à préciser les meilleurs régimes de feu à appliquer selon que l'objectif de gestion dominant est le renforcement de la zone d'appui, ou la valorisation du peuplement.

2 - Comportement et sévérité d'un feu dans un peuplement de pin maritime pour des conditions de végétation variées (Fernandes *et al.* 2004)

Les études du comportement du feu dans des peuplements de pin maritime en Europe se sont cantonnées aux conditions de feu peu à modérément sévères dans le cadre de projets de recherche sur le brûlage dirigé (FERNANDES *et al.* 2002). De plus, les études de cas bien documentées de feux de cime dans les pinèdes sont rares dans la littérature, et limitées à la forêt boréale canadienne (STOCKS *et al.* 2004).

Les opérations de gestion de contrôle du combustible sont destinées à limiter l'étendue et les dommages des incendies, essentiellement en réduisant la puissance du feu, et en augmentant l'efficacité des opérations de lutte.

Pour la première fois en Europe, une étude expérimentale menée au Portugal dans le cadre du projet européen Fire Star a permis d'atteindre des niveaux d'intensité particulièrement élevée.

Méthode

Un feu expérimental a été réalisé pendant l'été 2002 dans une plantation de pin maritime âgé de 28 ans, situé au Nord-Est du Portugal. Les conditions du combustible dans le peuplement étaient dépendantes de la période d'accumulation, avec quatre situations ; trois traitées avec brûlage dirigé (BD) en différents moments, respectivement 2, 3,

et 13 ans avant l'étude, et une, jamais traitée, où le temps d'accumulation de combustible était égal à l'âge du peuplement.

La hauteur des pins était en moyenne de 12 m, et le diamètre moyen à 130 cm était d'environ 9 cm. La hauteur de la base des houppiers était significativement plus importante dans les parcelles BD2 et BD3 du fait de la défoliation réalisée par les brûlages récents sur les branches basses des arbres. La parcelle qui n'avait jamais été traitée (NT) et celle dont le brûlage remontait à 13 ans (BD13) présentaient une strate arbustive de *Chamaespartium tridentatum* et de bruyère multiflore basse, aérée et relativement continue, et une forte accumulation de litière de pin maritime. En revanche, les parcelles récemment traitées par le brûlage dirigé étaient constituées d'arbustes dispersés et d'une couche de litière plus fine des 2/3 à la moitié (Cf. Tab. III).

Le feu expérimental a eu lieu le 16 juillet 2002, alors que l'indice de risque feux de forêt était très élevé et en présence d'un important dispositif de sécurité. La température était de 29°C, l'humidité relative de l'air de 25%, la teneur en eau du combustible fin mort d'environ 5%, et la vitesse du vent à 2 m au dessus du sol variable autour des 15 km/h.

Résultats

Le tableau IV récapitule les paramètres de comportement et de sévérité du feu dans les différentes placettes.

Le feu s'est en général déplacé lentement sous les effets conjugués d'une pente très faible (0-5%) et d'un vent en général faible. Les caractéristiques du feu les plus discriminantes selon les parcelles ont été liées à la longueur des flammes et à l'intensité du feu. La longueur des flammes et la puissance du feu augmentent avec l'accumulation de combustible. Trois comportements de feu peuvent être distingués : le feu courant d'une intensité faible (BD2) à moyenne puissance (BD3) dont les flammes n'ont jamais dépassé 3 m, le feu de surface puissant avec des passages localisés en cimes (BD13) et un mur de flamme relativement continue se développant dans les strates basses et dans les cimes

	Non traité (NT)	Placettes		
		BD13	BD3	BD2
Densité (tiges.ha ⁻¹)	2192	1480	1856	1760
Hauteur de la base du houppier (m)	4,7	4,0	5,4	5,2
Recouvrement arbustif (%)	85	85	21	17
Hauteur des arbustes (m)	0.52	0.50	0.31	0.30
Épaisseur de la litière (cm)	12,1	9,1	5,9	5,6
Charge de combustible fin (t.ha ⁻¹)	45,46	36,41	12,07	11,23

des pins (NT). Des sautes de feu de courte distance (5-15 m) ont été observées dans les parcelles BD13 et NT, nécessitant des interventions des forces de luttés dans les zones environnant les peuplements (voir encadré, page suivante).

Le tableau V montre les indicateurs de sévérité du feu pour les quatre placettes.

De manière générale, le combustible fin des strates basses a été complètement consommé. Les différences de combustible après-feu entre les parcelles et l'apparente sévérité plus forte des parcelles BD13 et NT, sont à mettre en relation avec l'abondance initiale de combustible : l'épaisseur de litière

Tab. III :

Description des caractéristiques du peuplement et du combustible

Tab. IV :

Description du comportement du feu dans les placettes

	Non traité (NT)	Placettes		
		BD13	BD3	BD2
Vitesse de propagation (m.min ⁻¹)	3,6	1,9	2,6	1,2
Longueur des flammes au sol	5,4	3,8	2,5	1,2
Longueur des flammes en cime (m)	13,6	9,4	-	-
Puissance (kW.m ⁻¹)	4925	1520	931	399
Feu de cime (%)	100	53	0	0
Saute de feu	Oui	Oui	Non	Non



Photo 2 :

Comportement du feu dans la parcelle BD13
Photo H. Botelho (UTAD, Vila Real)

	Placettes			
	Non traité (NT)	BD13	BD3	BD2
Épaisseur de litière consommée (cm)	13	7,8	5,9	5,5
Diamètre terminal des rémanents arbustifs (mm)	12	8	4	3
Taux de roussissement du feuillage	1,00	1,00	0,94	0,88
Mortalité des pins (%)	100	100	55	41

Tab. V :
Description
de la sévérité du feu
sur les placettes

consommée dépend de l'épaisseur de la litière initiale, et le diamètre terminal des rémanents arbustifs est une conséquence du développement des arbustes avant feu.

L'épaisseur de litière consommée a été corrélée ou associée à l'échauffement du sol, faisant de ce paramètre un bon indicateur de l'impact biologique du feu sur les couches superficielles du sol (VALETTE *et al.* 1994).

La mortalité des arbres dans les parcelles BD13 et NT a été totale, ce qui était prévisible compte tenu des dommages foliaires généralisés. Environ la moitié des arbres ont été tués dans les parcelles récemment traitées par le brûlage dirigé, mais ce bilan devrait s'alourdir lors de la seconde saison de végétation après le passage du feu pour atteindre 65% et 80%, pour respectivement BD2 et BD3 (BOTELHO *et al.* 1998).

Même si les placettes NT et BD13 ont toutes les deux subi des incendies qui ont détruit le peuplement, une comparaison des sévérités des perturbations respectives subies par ces deux placettes reste pertinente sur la base des différences de consommation des catégories de combustible présentes. Les capacités de reconstitution de la parcelle BD13 seront certainement moins hypothéquées que celles de la parcelle NT.

Ces résultats montrent donc que si le combustible est très sec et que la vitesse du vent est faible à modérée, un peuplement de pin maritime récemment traité par le brûlage dirigé ne provoque pas de feu de cime, ne génère pas de saute, et survit partiellement au feu courant. La structure de peuplement après brûlage dirigé est peut-être critiquable du point de vue de la production forestière, mais est considérablement plus résistante au feu et peut être gérée comme une coupure de combustible arborée (AGEE *et al.* 2000). La gestion des pinèdes par le brûlage dirigé périodique limite l'impact écologique des incendies qui s'y développeraient, et augmente la faisabilité et l'efficacité des actions de lutte qui pourraient y être opposées.

Conclusion

Ces résultats doivent encourager les gestionnaires des peuplements de pin maritime à développer une politique volontariste de mise en protection de ces boisements en favorisant le traitement extensif par le brûlage dirigé périodique. Le broyage mécanique des sous-bois des pinèdes, en plus d'être bien plus coûteux, constitue souvent un leurre car cette opération laisse au sol une biomasse morte et fine dont la combustion provoque des échauffements dépassant les seuils létaux des pins. Si un traitement généralisé de toutes les pinèdes est bien entendu exclu pour des raisons de faisabilité technique et d'impact environnemental, des priorités peuvent être identifiées. On traitera en priorité les peuplements en appui des coupures de combustible, les peuplements à forte valeur patrimoniale, et notamment ceux éloignés des infrastructures d'accès pour les services de lutte ou au contraire trop proches d'enjeux urbains qui, on le sait par expérience, absorbent les moyens de lutte engagés.

E.R., P.F.

Les sautes de feu (COLIN comm. pers.)

Dans le cadre du projet de recherches européen Saltus, le type *Pinus pinaster* a été étudié en Espagne, au Portugal et en France. C'est un type ayant un comportement moyen, à la fois pour le pourcentage de sautes et leur distance.

La présence de combustible en sous-étage est nécessaire au déclenchement de sautes longues ou très longues, au cours de feux intenses, rapides et aux flammes longues. Toutes choses égales par ailleurs, le principal facteur explicatif est la vitesse maximale du vent. Lorsque la biomasse est faible (moins de 10t/ha), celui-ci n'est pas aussi influent ; la topographie semble par contre jouer un rôle important : les trois cas de sautes longues observés avec une biomasse faible sont tous issus d'incendies placés sur un sommet.

En pratique :

- le débroussaillage en amont des coupures de combustible réalisées dans les pinèdes de pin maritime devra être particulièrement soigné pour réduire au maximum la probabilité d'apparition des sautes longues,
- la cartographie des zones à forte potentialité de saute devra intégrer l'importance du sous-bois dans ce type (et éventuellement la position sommitale),
- la prévision d'un vent maximal élevé doit être le signe avant-coureur d'une forte probabilité de saute longue dans ce type.

Bibliographie

- Agee J.K., Bahro B., Finney M.A., Omi P.N., Sapsis D.B., Skinner C.N., Van Wagtenonk J.W., Weatherspoon C.P. 2000. The use of shaded fuelbreaks in landscape fire management. *For. Ecol. Manage.* 127: 55-66.
- Alexandrian D., Rigolot E. 1992. Sensibilité du pin d'Alep à l'incendie. *Forêt Méditerranéenne* XIII: 185-198.
- Alia R., Martin S., de Miguel J., Galera R., Agundez D., Gordo J., Salvador L., Catalan G., Gil L. 1996. Regiones de procedencia *Pinus pinaster* Aiton. Ministerio de Medio Ambiente, Organismo Autonomo Parques Nacionales, Madrid.
- Almeida A., Rego F. 1990. Caracterização dos ecossistemas portugueses e sua relação com o perigo de incêndio. In: Rego F. C., Botelho H., Eds. *A Técnica do Fogo Controlado*, Univ. de Trás-os-Montes e Alto Douro, Vila Real. p. 5-8.
- Baylac J.P., Binggeli F. 2004. Brûlage dirigé en milieu forestier : pourquoi, comment ? 1^{er} au 3 décembre 2003, Le Muy, Var, Réseau Brûlage Dirigé. p. 12.
- Berbigier P., Bonnefond J.M. 1995. Measurement and modelling of radiation transmission within a stand of maritime pine (*Pinus pinaster* Ait.). *Ann. Sci. For.* 52: 23-42.
- Binggeli F. 1997. Elagage et éclaircie thermique en DFCI : mécanismes, indications, modes d'emploi, incidences. *Forêt Méditerranéenne* XVIII(4): 318-326.
- Botelho H.S., Rego F.C., Ryan K.C. 1998. Tree mortality models for *Pinus pinaster* of Northern Portugal. In: Proc. 13th Conf. on Fire and Forest Meteorology, IAWF. p. 235-240.
- Burrows N., Ward B., Robinson A. 1988. Aspects of fire behaviour and fire suppression in a *Pinus pinaster* plantation. Dept. of Conserv. and Land Manage. of West. Aust., Landnote 2/88, Perth. 4 p.
- Castro J.F., Bento J., Rego F.C. 1990. Regeneration of *Pinus pinaster* forests after wild-fire. In: Goldammer J., Jenkins M. J., Eds. *Fire in ecosystem dynamics*, Proc. 3rd Int. Symp. Fire Ecology, SPB Academic Publishing, The Hague. p. 71-75.
- Cemagref 1987. Guide technique du forestier méditerranéen français, Cemagref, Aix-en-Provence.
- Crow A.B., Shilling C.L. 1990. Use of prescribed burning to enhance southern pine timber production. *Sout. J. Appl. For.* 4(1): 15-18.
- de Ronde C. 1982. The resistance of *Pinus* species to fire damage. *S. Afr. Forest. J.* 122: 22-25.
- Duché Y., Rigolot E. 2004. Equipement du territoire : le brûlage dirigé, bases scientifiques et réalisations. *Rendez-vous techniques* 4: 36-40.
- Duhoux F. 2004. Sensibilités de plusieurs espèces arborées méditerranéennes aux stress thermiques et prédiction de la mortalité après incendie du pin d'Alep et du pin pignon. Mémoire de fin d'études, ETSIPA/INRA, Lab. Rech. For. Méditer., PIF, Avignon.
- Escudero A., Nunes Y., Pérez-García F. 2000. Is fire a selective force of seed size in pine species ? *Acta Oecol.* 21(4-5): 245-256.
- Escudero A., Sanz M.V., Pita J.M., Pérez-García F. 1999. Probability of germination after heat treatment of native Spanish pines. *Ann. For. Sci.* 56: 511-520.
- Fernandes P., Botelho H., Loureiro C. 2002. Models for the sustained ignition and behavior of low-to-moderately intense fires in maritime pine stands. In: Proc. IV Int. Conf. on Forest Fire Research & 2002 Wildland Fire Safety Summit, Luso, 18-23 Nov., Millpress Science Publishers, Rotherdam.
- Fernandes P.A.M., Loureiro C.A., Botelho H.S. 2004. Fire behaviour and severity in a maritime pine stand under differing fuel conditions. *Ann. For. Sci.* 61: 1-8.
- Fernandes P.M., Rego F.C. 1998. A new method to estimate fuel surface area-to-volume ratio using water immersion. *Int. J. Wildland Fire* 8(3): 121-128.
- Freitas H. 1995. Efeitos do fogo nos processos regenerativos do *Pinus pinaster*. Rel. Fin. de estágio da Lic. em Eng^a Florestal, UTAD, Vila Real.
- Hare R.C. 1961. Heat effects on living plants. USDA For. Serv. Occas. Pap.
- Harmon M.E. 1984. Survival of trees after low-intensity surface fires in Great Smoky Mountains National Park. *Ecology* 65(3): 796-802.
- Hengst G.E., Dawson J.O. 1994. Bark properties and fire resistance of selected tree species from the central hardwood region of North America. *Can. J. For. Res.* 24: 688-696.
- ICONA 1982. Manual de Predicción del Peligro de Incendios Forestales. Min. Agric., Pesca y Aliment., Int. Nac. Conserv. Natur., Madrid. 25 p.
- Keeley J.E., Zedler P.H. 1998. Evolution of life histories in *Pinus*. In: Richardson D. M., Ed. *Ecology and Biogeography of Pinus*, University Press, Cambridge. p. 219-250.
- Lanner R.M. 1998. Seed dispersal in *Pinus*. In: Richardson D. M., Ed. *Ecology & Biogeography of Pinus*, Cambridge University Press, Cambridge. p. 281-295.
- Luis-Calabuig E., Torres O., Valbuena L., Calvo L., Marcos E. 2002. Impact of large fires on a community of *Pinus pinaster*. In: Trabaud L. R. P., Ed. *Fire and Biological Processes*, Backhuys Publishers, Leiden. p. 1-12.
- Martín R., Gil L. 2000. Adaptación reproductiva de las especies forestales ante el fuego. *La Defensa Contra Incendios Forestales: Fundamentos y Experiencias*, McGraw-Hill, Madrid. p. 4.36-4.66.
- Martínez E., Madrigal J., Hernando C., Guijarro M., Vega J.A., Pérez-Gorostiaga P., Fonturbel M., Cuiñas P., Alonso M., Beloso M. 2002. Effect of fire intensity on seed dispersal and early regeneration in a *Pinus pinaster* forest. In: Proc. IV Int. Conf. Forest Fire Research & 2002 Wildland Fire Safety Summit, Millpress Science Publishers, Rotherdam.
- Martínez-Sánchez J.J., Martín A., Herranz J.M., Ferrandis P., de las Heras J. 1995. Effects of high temperatures on germination of *Pinus halepensis* Mill. & *P. pinaster* Aiton subsp. *pinaster* seeds in southeast Spain. *Vegetatio* 116(1): 69-72.
- Maugé J.P. 1987. Le pin maritime premier résineux de France, Centre de Productivité & d'Action Forestière d'Aquitaine, Institut pour le Développement Forestier, Paris.
- Nicolas A., Gandullo J.M. 1967. Ecología de los pinares españoles. 1. *Pinus pinaster* Ait. Ministerio de Agricultura, Instituto Forestal de Investigaciones y Experiencias, Madrid.

Eric RIGOLOT
Institut national
de la recherche
agronomique
Unité de recherches
forestières
méditerranéennes
Equipe Prévention
des incendies
de forêt
Avenue A. Vivaldi
84000 Avignon
rigolot@avignon.
inra.fr

Paulo FERNANDES
Universidade
de Trás-os-Montes
e Alto Douro
Departamento
Florestal/Centro
de Estudos
em Gestão
de Ecossistemas,
Vila Real, Portugal
pfern@utad.pt

- Oliveira A.C., Pereira J.S., Correia A.V. 2000. A silvicultura do pinheiro bravo, Centro Pinus, Porto.
- Pausas J.G., Vallejo V.R. 1999. The role of fire in European Mediterranean ecosystems. In: Chuvieco E., Ed. Remote Sensing of Large Wildfires in the European Mediterranean Basin, Springer-Verlag, Berlin. p. 3-16.
- Peterson D.L., Ryan K.C. 1986. Modeling postfire conifer mortality for long range planning. *Env. Manage.* 10(6): 797-808.
- Pyne S.J., Andrews P.L., Laven R.D. 1996. Introduction to wildland fire, 2nd ed. John Wiley & Sons, New York.
- Rego F.C. 1991. Cartografia do perigo de incêndio (bases metodológicas). ISA, Lisboa.
- Rego F.C., Rigolot E. 1990. Heat transfer through bark - a simple predictive model. In: Goldammer J., Jenkins M. J., Eds. Fire in Ecosystem Dynamics, SPB Academic Publishing, The Hague. p. 157-161.
- Reyes O., Casal M. 2001. The influence of seed age on germinative response to the effects of fire in *Pinus pinaster*, *Pinus radiata* and *Eucalyptus globulus*. *Ann. For. Sci.* 58: 439-447.
- Reyes O., Casal M. 2002. Effect of high temperatures on cone opening and on the release and viability of *Pinus pinaster* and *P. radiata* seeds in NW Spain. *Ann. For. Sci.* 59: 327-334.
- Richardson D.M., Rundel P.W. 1998. Ecology & biogeography of Pinus: an introduction. In: Richardson D. M., Ed. Ecology & Biogeography of Pinus, Cambridge University Press, Cambridge. p. 3-46.
- Rigolot E. 2000. Le brûlage dirigé en France: outil de gestion et recherches associées. Actas de la reunion sobre quemas prescritas, Sociedad Espanola de ciencias forestales. p. 165-178.
- Rigolot E. 2004. Predicting postfire mortality of *Pinus halepensis* Mill. and *Pinus pinea* L. *Plant Ecology* 171: 139-151.
- Ryan K.C. 1998. Analysis of the relative value of morphological variables in predicting fire-caused tree mortality. In: Proc. 3rd International Conf. on Forest Fire Research & 14th Fire and Forest Meteorology Conf., ADAI. p. 1511-1526.
- Ryan K.C., Reinhardt E.D. 1988. Predicting post-fire mortality of seven western conifers. *Can. J. For. Res.* 18: 1291-1297.
- Ryan K.C., Rigolot E., Botelho H. 1994. Comparative analysis of fire resistance and survival of Mediterranean and North-American conifers. In: 12th Conf. Fire and Forest Meteorology, Jekyll Island, GA, 1993, SAF Pub. 94-02, Soc. Am. For., Bethesda. p. 701-708.
- Sackett S.S., Haase S.M. 1998. Two case histories for using prescribed fire to restore ponderosa pine ecosystems in Northern Arizona. In: Fire in Ecosystem Management: Shifting the Paradigm from Suppression to Prescription, Tall Timbers Fire Ecology Conf., Tallahassee, Tall Timbers Res. Stn. p. 380-389.
- Stocks B.J., Alexander M.E., Lanoville R.A. 2004. Overview of the International Crown Fire Modelling Experiment (ICFME). *Can. J. For. Res.* 34: 1543-1547.
- Tapias R., Gil L., Fuentes-Utrilla P., Pardos J.A. 2001. Canopy seed banks in Mediterranean pines of south-eastern Spain: a comparison between *Pinus halepensis* Mill., *P. pinaster* Ait., *P. nigra* Arn., & *P. pinea* L. *J. Ecol.* 89: 629-638.
- Taylor S.T. 1998. Prescribed fire in Canada ... a time of transition. *Wildfire November*: 34-37.
- Valbuena L., Calvo L. 1998. Seedling establishment after a wildfire in *Pinus pinaster* Ait. & *Pinus nigra* Arn. stands. In: Proc. 3rd Int. Conf. Forest Fire Research & 14th Conf. Fire & Forest Meteorology, ADAI. p. 1901-1911.
- Valette J., Gomeny V., Maréchal J., Houssard C., Gillon D. 1994. Heat transfer in the soil during very low-intensity experimental fires: the role of duff and soil moisture content. *Int. J. Wildland Fire* 4(4): 225-237.
- Valette J.C. 1990. Inflammabilité des espèces forestières méditerranéennes. Conséquences sur la combustibilité des formations forestières. *Revue Forestière Française XLII* (N° spécial "Espaces Forestiers et Incendies"): 76-92.
- Van Wagner C.E. 1973. Height of crown scorch in forest fires. *Can. J. For. Res.* 3(3): 373-378.

Résumé

Le pin maritime est l'une des principales espèces forestières de l'Europe du Sud-Ouest, aussi bien géographiquement qu'économiquement. Les peuplements de pin maritime sont fortement combustibles, même si cette espèce a des caractéristiques écologiques lui conférant certains atouts vis-à-vis du feu.

Dans une première partie, les principales caractéristiques de résistance du pin maritime au feu sont présentées. Son écorce épaisse lui assure, même jeune, une relativement bonne protection thermique des tissus sous-corticaux. Les aiguilles et les bourgeons de cette espèce sont moins sensibles à l'échauffement que beaucoup d'autres résineux méditerranéens, limitant les dommages foliaires lors de feux de faible intensité. L'élagage naturel du pin maritime, l'inflammabilité moyenne de ses aiguilles et la faible densité de son feuillage, tempèrent la susceptibilité des peuplements de pin maritime à entretenir des feux de cimes généralisés.

Les capacités de reconstitution du pin maritime après incendie sont plutôt bonnes, car l'espèce fructifie

jeune, et le peuplement constitue rapidement une banque de graines aériennes protégées dans des gros cônes, dont une certaine proportion est sérotimeux.

Certains des caractères écologiques qui favorisent une moindre sensibilité individuelle du pin maritime au feu participent paradoxalement à la forte combustibilité des pinèdes de cette espèce. Ainsi les aiguilles de grande dimension forment, une fois tombées au sol, des litières épaisses et aérées très favorables à la propagation de feux de surface. Les bonnes capacités de régénération après incendie du pin maritime conduisent rapidement au développement de jeunes peuplements denses fortement combustibles. Le feuillage clair des arbres adultes favorise le développement d'un sous-bois abondant qui alimente des feux de forte intensité, souvent bien supérieure aux capacités de résistances des individus même âgés.

La thèse développée dans cette intervention propose de retourner ce paradoxe en faveur d'une gestion préventive active des peuplements de pin maritime. Le gestionnaire méditerranéen peut s'appuyer sur la relativement bonne tenue du pin maritime aux feux de faible intensité, pour développer un programme de mise en autoprotection de ces pinèdes par l'application raisonnée de brûlages dirigés périodiques. Deux études sont présentées pour appuyer cette thèse, l'une menée en France dans le massif des Maures, et l'autre au Portugal dans la région Nord-Est.

La première étude a mis en œuvre une série de brûlages dirigés d'ouverture puis d'entretien dans une jeune régénération très dense de pin maritime. Cette étude a montré la faisabilité et l'efficacité de ces interventions. Le choix des conditions, des modalités et de la fréquence des interventions permet de réduire progressivement les strates basses, tout en atteignant le taux d'éclaircie désiré.

La seconde étude a été réalisée à l'occasion d'un feu expérimental d'été dans une plantation de pin maritime âgée de 28 ans. La biomasse combustible en sous-bois était dépendante de la longueur de la période d'accumulation, avec 4 situations ; 3 traitées avec brûlage dirigé à différentes anciennetés, respectivement 2, 3, et 13 ans avant l'étude, et une jamais traitée. La partie du peuplement traitée 13 ans auparavant et celle non traitée ont connu un feu d'une intensité élevée, qui a touché partiellement ou totalement le couvert arboré et tué tous les arbres. En revanche, dans les parcelles traitées récemment par le brûlage dirigé, l'intensité du feu de surface, le taux de passage du feu en cime et la mortalité des arbres ont été fortement réduits. Les conséquences en terme de gestion du combustible et d'utilisation du brûlage dirigé sont discutées.

Summary

The ecology of the maritime pine in relation to wildfire and stand management within the framework of wildfire protection schemes

The maritime pine is one of the main forest species in South-West Europe, both geographically and economically. Maritime pine stands are highly inflammable despite the species possessing ecological characteristics that confer advantages in relation to fire.

The opening part of the article presents the main fire-resisting features of the maritime pine. Its thick bark ensures that the vascular layers even of saplings benefit from relatively good protection against heat. The needles and buds are less sensitive to heat than those of many other resinous Mediterranean species, thus limiting leaf damage from low-intensity wildfire. The species' natural tendency to shed dead branches, the moderate inflammability of its needles as well as their low density throughout the canopy limit the likelihood of crown fires in maritime pine stands.

The maritime pine's capacity for regeneration after wildfire is quite good because the species produces seed early so that stands quickly build up reserves of seeds naturally stocked on the branches in large cones, some of which are serotinous.

Paradoxically, some of the ecological characteristics that confer heightened resistance to the individual tree increase inflammability across a whole stand of maritime pine. Thus, the very long needles, when they fall to the ground, build up into a thick, well-aired litter that facilitates the spread of ground fires. The species's aptitude for post-wildfire regeneration leads to the rapid establishment of dense young stands that are highly inflammable. The fairly sparse canopy of an adult stand favours the emergence of abundant undergrowth which feeds wildfire to produce intense heat that even very old specimens cannot resist.

The argument in this paper recommends turning this paradox on its head in order to favour preventive proactive management of maritime pine stands. The forestry manager in the Mediterranean region can count on the relatively good resistance of the species to low-intensity wildfire as the underpinning for the emergence in the stands of a self-protective profile through the rational use of periodic controlled burning. Two studies back up this approach, one carried out in South-East France in the Maures mountains, the second in North-East Portugal.

The first study in a young very densely regenerated stand had recourse to a series of controlled burns, first to open conditions up, then to maintain them. This study has demonstrated the feasibility and efficacy of the interventions. The choice of the conditions, working methods and frequency of the interventions enabled the undergrowth to be gradually cleared out at the same time as thinning was done to the desired level. The second study was carried out at the time of an experimental summer fire in a 28-year-old maritime pine stand. The amount of flammable biomass in the undergrowth depended on the length of time it had been allowed to accumulate. There were four situations : three had been treated with controlled burning at varying periods of 2, 3 and 13 years prior to the study, the fourth had never been burned. The part of the stand treated 13 years previously as well as the untreated part experienced very intense heat which affected the tree cover in part or totally, killing all the trees. On the other hand, in the areas recently treated by controlled burning the intensity of the fire, the degree to which the fire went to the crown and the number of trees killed were all greatly reduced. The consequences for managing the inflammable fuel reserve and the use of controlled burning are discussed.

Riassunto

Ecologia del pino marittimo in relazione col fuoco e gestione dei popolamenti nel quadro della protezione delle foreste contro l'incendio

Il pino marittimo è una tra le principali specie forestali dell'Europa del sud-ovest tanto geograficamente quanto economicamente. I popolamenti di pino marittimo sono fortemente combustibili, anche se questa specie ha caratteristiche ecologiche conferendole certe carte di fronte al fuoco.

In una prima parte, le principali caratteristiche di resistenza del pino marittimo al fuoco sono presentate. La sua corteccia spessa gli assicura, pure giovane, una relativa protezione termica dei tessuti sotto corticali. Gli aghi e le gemme di questa specie sono meno sensibili allo scaldare di molte specie di resinosi mediterranei limitando i danni fogliari durante i fuochi di debole intensità. La diramatura naturale del pino marittimo, l'infiammabilità media dei suoi aghi e la debole densità del suo fogliame moderano la suscettibilità dei popolamenti di pino marittimo a trattenere fuochi di cime generalizzati.

Le capacità di ricostituzione del pino marittimo dopo incendio sono piuttosto buone perché la specie fruttifica da giovane, e il popolamento costituisce rapidamente una banca di semi aerei protetti in grosse pigne di cui una certa proporzione è serotinosi.

Alcuni tra i caratteri ecologici che favoriscono una sensibilità individuale minore del pino marittimo al fuoco partecipano paradossalmente alla forte combustibilità delle pinete di questa specie. Così gli aghi di grande dimensione formano, una volta caduti al suolo, lettiere spesse e aerate favorevolissimi alla propagazione dei fuochi di superficie. Le buone capacità di rigenerazione dopo incendio del pino marittimo conducono rapidamente allo sviluppo di giovani popolamenti fitti fortemente combustibili. Il fogliame chiaro degli alberi adulti favorisce lo sviluppo di un sottobosco abbondante che alimenta fuochi di forte intensità, spesso superiore alle capacità di resistenza degli individui pure anziani.

La tesi sviluppata in questo intervento propone di rivolgere questo paradosso in favore di una gestione preventiva attiva dei popolamenti di pino marittimo. Il gestore mediterraneo può appoggiarsi sulla tenuta relativamente buona del pino marittimo ai fuochi di debole intensità, per sviluppare un programma di messa in autoprotezione di queste pinete dall'applicazione ragionata di abbrustire diretto periodici. Due studi sono presentati per appoggiare questa tesi, l'una condotta in Francia nel massiccio dei Maures e l'altro al Portogallo nella regione nord-est.

Il primo studio a messo in opera una serie di abbrustiri diretti di appertura poi di mantenimento in una giovane rigenerazione molto fitta di pino marittimo. Questo studio ha mostrato la fattibilità e l'efficacia di questi interventi. La scelta delle condizioni, delle modalità e della frequenza degli interventi permette di ridurre progressivamente gli strati bassi pure raggiungendo il tasso di radura desiderato.

Il secondo studio è stato realizzato all'occasione di un fuoco sperimentale d'estate in una piantagione di pino marittimo di 28 anni. La biomassa combustibile in sottobosco era dipendente della lunghezza del periodo di accumulazione, con 4 situazioni ; 3 trattate con abbrustire diretto a diverse anzianità, rispettivamente 2, 3, e 13 anni prima dello studio, e una mai trattata. La parte del popolamento trattata 13 anni prima e quella non trattata hanno conosciuto un fuoco di alta intensità, che ha toccato parzialmente o totalmente il coperto inalberato e ucciso tutti gli alberi. Invece, nelle particelle trattate recentemente coll'abbrustire diretto, l'intensità del fuoco di superficie, il tasso di passaggio del fuoco di cima e la mortalità degli alberi sono stati fortemente ridotti. Le conseguenze in termine di gestione del combustibile e di utilizzazione dell'abbrustire diretto sono discusse.