

Sensibilité du pin d'Alep à l'incendie

par Daniel ALEXANDRIAN* et Eric RIGOLOTT**

Les journées sur le pin d'Alep ont été l'occasion de faire le point sur la sensibilité au feu de cette essence. L'état actuel des connaissances sur son inflammabilité et sa combustibilité sera ainsi livré avec le souci d'être complet. Aussi, une fois ces notions précisément définies, les différentes

approches adoptées à ce jour pour l'évaluation de ces paramètres seront successivement présentées. Sur la base des résultats exposés, les interventions sylvicoles susceptibles de diminuer la sensibilité aux incendies des pinèdes de pin d'Alep seront finalement proposées.

I.1.2.- Méthode de mesure

Le principe de la méthode consiste à mesurer la durée d'exposition nécessaire à l'inflammation de l'échantillon végétal soumis à un rayonnement calorifique constant. La méthode a été décrite par Caramelle et Clément (1978), et Valette *et al.* (1979); Delaveaud (1981) et Layec (1989) l'ont perfectionnée.

Pour tenir compte de l'hétérogénéité liée à la structure de la matière, 50 lots de 1g sont constitués. Les résultats des 50 tests permettent de déterminer la fréquence d'inflammation et le délai moyen d'inflammation. Une note d'inflammabilité est ensuite attribuée selon le tableau I, en croisant ces deux grandeurs. L'inflammabilité est déclarée faible pour les notes 0 et 1, modérée pour la note 2, assez forte pour les notes 3 et 4, et forte pour la note 5.

I.- Approche physique : détermination expérimentale de l'inflammabilité et de la combustibilité

I.1.- Inflammabilité

I.1.1.- Définition

L'inflammabilité est la propriété qu'a un végétal ou une partie de végétal à s'enflammer lorsqu'il est soumis à un échauffement. Cette grandeur est à relier à la notion d'éclosion du feu.

L'analyse des variations de l'inflammabilité permet de hiérarchiser les espèces entre elles selon ce critère et de suivre l'évolution de l'indice du risque d'éclosion d'incendies que présentent les principales espèces en tenant compte de leur place respective dans les différentes formations forestières (Valette, 1990).

D.I.	F.I.	<50	50-79	80-84	85-89	90-94	>95
32,5		0	0	0	1	1	2
27,5		0	0	1	1	2	2
22,5		0	0	1	2	2	3
17,5		0	1	2	2	3	3
12,5		1	1	2	3	3	4
		1	2	3	3	4	5

Tab. I : Note d'inflammabilité

D.I. = Délai d'Inflammation (secondes)

F.I. = Fréquence d'Inflammation (pourcentage).

* Directeur de l'Agence MTDA
419, avenue Jean-Paul-Coste
13100 Aix en Provence

** Ingénieur d'Etude
INRA, Laboratoire de Recherches Forestières Méditerranéennes
avenue A. Vivaldi 84000 Avignon

I.1.3.- Classement des végétaux

Les principales espèces herbacées, arbustives et arborées ont été testées et leur sensibilité relative à ce paramètre est consignée dans le tableau II.

Il apparait que les aiguilles de pin d'Alep sont globalement fortement inflammables au même titre d'ailleurs que les feuilles des chênes méditerranéens.

L'indication du niveau moyen d'inflammabilité des sommités d'une espèce ne doit pas cacher les variations de ce paramètre avec la teneur en eau du matériel végétal. Or la teneur en eau changeant sensiblement avec le stade phénologique¹, il s'en suit une évolution saisonnière du paramètre d'inflammabilité.

I.1.4.- Evolution saisonnière de l'inflammabilité

La figure 1 présente l'évolution au cours de l'année végétale de l'inflammabilité des aiguilles de pin d'Alep, depuis la phase d'élongation de la jeune aiguille au printemps, jusqu'à l'acquisition de ses dimensions définitives à partir de la fin de l'été.

Si les aiguilles de rameaux en croissance présentent une faible inflammabilité, les aiguilles des rameaux aoûtés sont assez fortement inflammables et plus encore les aiguilles adultes qui ont en fait été choisies parmi celles de l'année précédente.

Quelques mesures réalisées sur des aiguilles sèches, qui demeurent une quinzaine de jours sur les arbres, confirment leur forte inflammabilité (note 5 systématique). Ce résultat donne une indication de la sensibilité de la litière sèche de pin d'Alep au paramètre d'inflammabilité.

I.2.- Combustibilité

I.2.1.- Définition

La combustibilité est la propriété qu'a un végétal ou un ensemble de végétaux à propager le feu. Cette notion intervient à une échelle plus

¹ N.d.e. **Phénologie**: Science qui étudie la répartition dans le temps des phénomènes périodiques caractéristiques du cycle vital des organismes dans la nature; spécialement de ceux qui sont influencés par les facteurs du milieu.



Photo 1 : Mesures d'inflammabilité sur arbousier et bruyère arborescente.

Photo E.R.

FORTE	<ul style="list-style-type: none"> - Chêne liège, Chêne vert, Pin d'Alep - Bruyère (arborescente, à balais), Ajonc épineux - Brachypode rameux
ASSEZ FORTE	<ul style="list-style-type: none"> - Chêne blanc, Pin maritime - Buis, Génévrier de Phénicie
MODEREE	<ul style="list-style-type: none"> - Ciste de Montpellier, Chêne kermès, Romarin
FAIBLE	<ul style="list-style-type: none"> - Cèdre, Sapin de Céphalonie - Arbousier

Tab. II : Inflammabilité des principaux végétaux méditerranéens.

Année végétale	Mai	Juin	Juil.	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Dec.	Jan.	Fév.	Mars	Avril
Notes	0	1	3	4	4	3	5	5	5	5	5	5
Phénologie	Elongation		Aoûte-ment		Aiguilles définitives							

Notes d'inflammabilité	0 : peu inflammable
	1 : faiblement inflammable
	2 : modérément inflammable
	3 : inflammable
	4 : hautement inflammable
	5 : extrêmement inflammable

Fig. 1 : Evolution saisonnière de l'inflammabilité des aiguilles de pin d'Alep.

grande que l'inflammabilité; en effet la combustibilité caractérise plutôt une formation végétale entière avec les différentes strates qui la composent.

Les paramètres souvent utilisés pour décrire la combustibilité sont de deux ordres:

- la puissance du front de flamme,
- la vitesse de propagation du front de flamme.

Ces grandeurs ne sont bien entendu pas indépendantes. En effet la puissance du front de flamme est ainsi définie par l'équation de Byram (1959):

$$P=M \times V \times C$$

où P est la puissance linéaire du front de flamme,

M est la masse de combustible effectivement brûlée,

V est la vitesse de propagation du front de flamme,

C est le pouvoir calorifique du combustible.

Mais la distinction entre puissance et vitesse de propagation permet de bien comprendre la notion de combustibilité. En effet un incendie peut être peu intense mais se propager rapidement (feu courant) ou au contraire progresser lentement et dégager un flux énergétique considérable. Dans les deux cas la formation végétale est dite très combustible, mais les forces de lutte sont confrontées à des incendies de natures très différentes.

Les deux paragraphes qui suivent apportent une illustration de chacun de ces paramètres.

1.2.2.- Le Pouvoir calorifique

Le pouvoir calorifique supérieur est la quantité de chaleur maximum dégagée lors de la combustion de 1 gramme de végétal (Doat & Valette, 1981). Cette grandeur intervient dans le calcul de la puissance du front de flamme (Byram, 1959).

La figure 2 montre l'évolution de ce paramètre au cours de l'année.

Les aiguilles de pin d'Alep ont un pouvoir calorifique supérieur moyen de 5300 cal/g. En cela cette essence se situe parmi celles dont le feuillage dégage beaucoup de chaleur en se consumant.

Les P.C.S. évoluent de 5100 cal/g en juillet à 5500 cal/g en février, mais deux populations d'aiguilles se distinguent:

- les aiguilles adultes dont le P.C.S. évolue entre 5300 et 5500 cal/g,

-les aiguilles en élancement dont le P.C.S. passe de Juin à Octobre de 5100 à 5500 cal/g.

1.2.3.- Combustibilité des litières

L'étude sur banc thermique de la combustibilité des litières, et notamment de celle du pin d'Alep, permet d'illustrer la notion de vitesse de propagation du feu.

1.2.3.1.- Méthode de mesure

Un essai sur litière consiste à allumer une ligne de feu selon la largeur d'un rectangle de litière reconstituée et à mesurer les grandeurs caractéristiques de la propagation du feu (Dupuy, 1991). Le combustible est prélevé sur le terrain. Il s'agit d'une couche monospécifique de feuilles ou d'aiguilles.

1.2.3.2.- Résultats

a. Les facteurs de la combustibilité

Les principaux facteurs de la combustibilité de la litière de pin d'Alep sont:

- la charge: sur le terrain la quantité de litière par unité de surface peut atteindre 12 t/ha. Les essais sur banc thermique ont permis de déterminer une **masse critique de propagation**

de 1.8 t/ha en deçà de laquelle le front de flamme ne se propage plus de manière régulière. Cette information est intéressante dans la mesure où elle permet de raisonner les seuils d'entretien souhaitables sur les coupures de combustible établies sous couvert de pin d'Alep.

-la teneur en eau: il faut savoir qu'une litière sèche à l'air l'été a une teneur en eau par rapport à son poids sec d'environ 7 à 10 p. cent. Il existe de même un **seuil critique de propagation** d'environ 25 p. cent au dessus duquel le feu ne se propage plus en ligne continue, du fait de la trop forte humidité du combustible. Ce type de donnée est précieuse pour la réalisation de brûlages dirigés sous pinède de pin d'Alep.

-la structure de la particule: la particule combustible, en l'occurrence l'aiguille de pin, est caractérisée par son **rapport surface/volume** et sa **masse volumique**. Le tableau III (cf. page suivante) récapitule ces différentes caractéristiques structurelles en comparaison avec celles du pin pignon et du pin maritime.

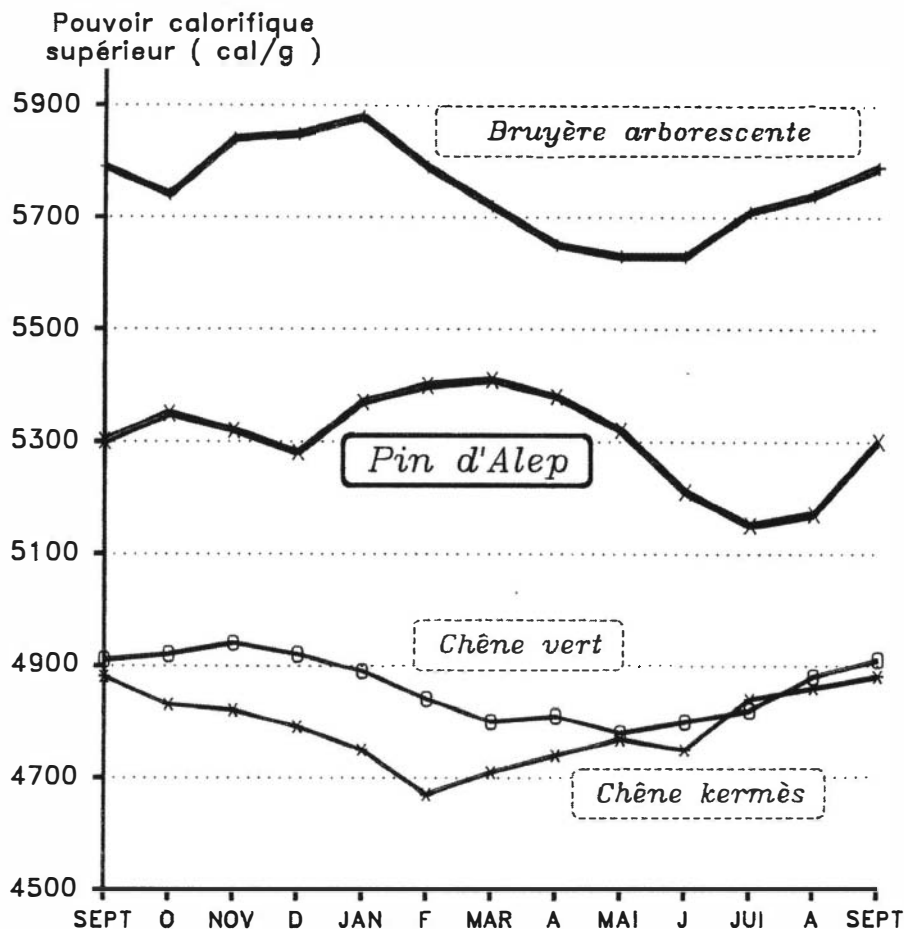


Fig. 2 : Pouvoir calorifique supérieur du pin d'Alep.

-la **structure de la couche**: la structure de la couche de litière est conditionnée par la forme des aiguilles qui la constituent. Elle est caractérisée par son **tassement** ou mieux sa **masse volumique**(cf. tableau IV).

b.- combustibilité comparée des litières

La figure 3 place sur un axe de combustibilité croissante les litières des principales essences arbustives et arborées méditerranéennes. Ce classement a été obtenu en ne prenant en compte que le terme cinétique de la combustibilité, à savoir la vitesse de progression du front de flamme.

Conformément à ses caractéristiques de structure, la litière de pin d'Alep occupe une position médiane sur cet axe.

Il est intéressant de noter que, contrairement à certaines idées reçues, l'une des litières les moins combustible est celle d'un résineux, le cèdre, et que la plus combustible est celle d'un feuillu, le chêne pubescent. Ceci s'explique par la forte compacité des litières de cèdre, au contraire de celles du chêne blanc particulièrement aérées.

A cet égard la manipulation suivante est particulièrement édifiante : la masse volumique d'une couverture morte d'aiguilles de pin d'Alep a été multipliée par 10 en coupant les aiguilles en quatre à la longueur de celles du cèdre (Delaveaud, 1981). Quelle que soit la masse du combustible ainsi constitué, le feu ne s'est pas développé, tandis que les aiguilles entières permettent une excellente propagation.

Il convient maintenant d'intégrer les autres strates de végétation qui constituent ensemble le peuplement de pin d'Alep.

I.2.4.- Combustibilité de la formation complète

La structure de la pinède de pin d'Alep est souvent complexe, car le **couvert** de cette essence est **clair** et permet le développement de strates basses puissantes et complètes. La continuité horizontale et verticale du combustible est souvent assurée par l'ensemble des espèces accompagnatrices du pin d'Alep: des herbacées, dont le Brachypode rameux particulièrement combustible complètent la litière d'aiguille dans la couverture du sol, des arbustes bas comme le thym ou le chêne kermès et des arbustes

Caractéristiques structurelles	Unités	Pin d'Alep	Pin pignon	Pin maritime
Masse linéique	mg/m	200	450	800
Masse surfacique	g/m ²	70	100	150
Masse volumique	kg/m ³	750	720	600
Rapport surface/volume	m ² /m ³	10 400	7 100	4 500

Tab.III : Structures des aiguilles

Espèce	Forme de l'aiguille	Structure de la litière	Masse volumique Kg/m ³
Pin laricio	longue et flexueuse	foisonnante	18
Pin d'Alep	très fine, courte et droite	moyennement tassée	32
Cèdre	très courte et droite	très tassée	330

Tableau IV : Structure des litières de pin.

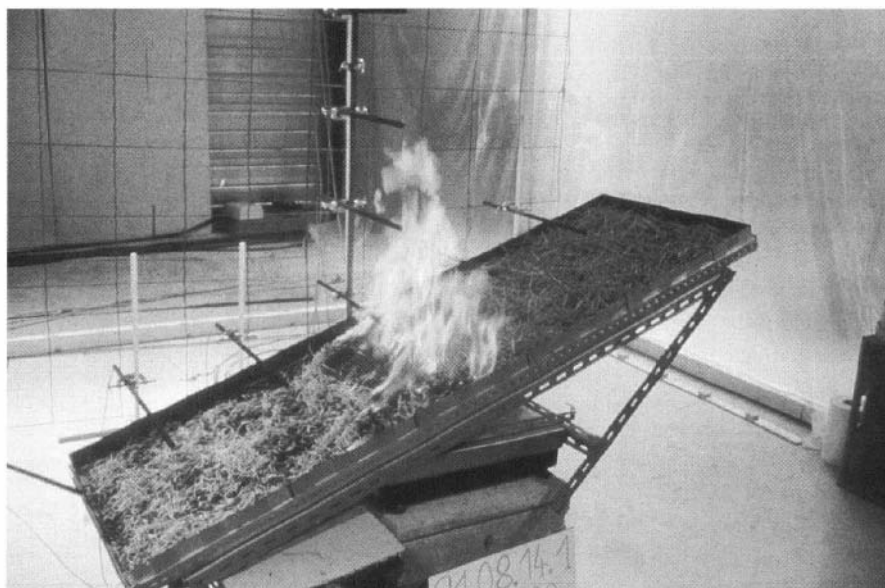


Photo 2 : Banc litière - Vue d'ensemble.

Photo E.R.

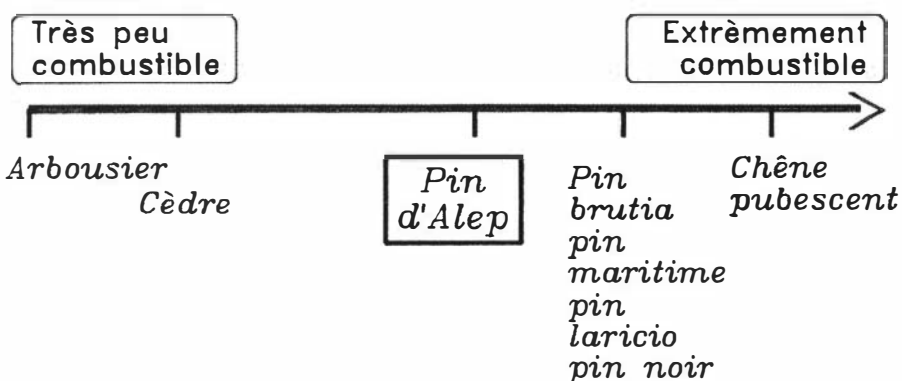


Fig. 3 : Combustibilité des litières.

hauts tels que le Filaria ou le Chêne vert établissent le lien entre le sol et le houppier des pins (Valette, 1990).

A cela s'ajoutent deux autres facteurs qui contribuent à augmenter la combustibilité de ces formations:

-le pin d'Alep s'élague mal naturellement et le continuum de combus-

tible entre les arbustes hauts et les houppiers est alors assuré par les verticilles secs,

-les aiguilles sèches sont piégées par les branches basses et par les arbustes. Elles constituent ainsi une litière suspendue très aérée et donc particulièrement inflammable.

résineux englobent tout, depuis les pinèdes de pin d'Alep jusqu'au mélézin).

-les résultats de l'Inventaire Forestier National correspondent à une photographie instantanée, alors que les statistiques sur les feux couvrent une période de 15 ans.

Les résultats de ce rapprochement sont évidemment comparés aux surfaces réellement occupées par chaque type de formation végétale.

Pour l'ensemble de la région P.A.C.A. (figure 4), il apparaît que les formations les moins inflammables sont les taillis et les futaies de feuillus, les plus inflammables les landes et les jeunes peuplements (reboisements ou régénérations naturelles). Par contre, les formations les moins combustibles sont les landes, les plus combustibles les peuplements mélangés (feuillus + résineux) et les jeunes boisements.

Les peuplements de pin d'Alep, qui constituent l'essentiel des peuplements résineux en région méditerranéenne, sont au regard de cette étude, particulièrement favorables à la propagation des incendies lorsqu'ils sont mélangés avec des feuillus.

II.- L'approche statistique : incendies et végétation en région Provence Alpes Côte d'Azur

Dans les deux premières parties, les notions d'inflammabilité et de combustibilité ont été définies de façon physique et déterministe, et l'évaluation de ces paramètres est essentiellement expérimentale. Il est aussi possible d'utiliser les correspondances pratiques de ces notions et d'adopter une approche statistique pour qualifier les différentes formations végétales sur ces critères. Ainsi la zone de départ du feu est prise comme révélateur d'inflammabilité, la surface parcourue par le feu comme critère de combustibilité.

Le rapprochement des statistiques

sur les formations végétales incendiées avec les résultats de l'Inventaire Forestier National permet donc aussi de comparer la sensibilité relative des différents types de peuplements.

Le rapprochement effectué n'est cependant pas parfait car:

-les définitions ne sont pas les mêmes dans les deux cas. Une simplification et une ventilation des données de l'Inventaire Forestier National sont nécessaires.

-les types peuvent recouvrir un éventail de cas très disparates dans certains cas (par exemple les futaies de

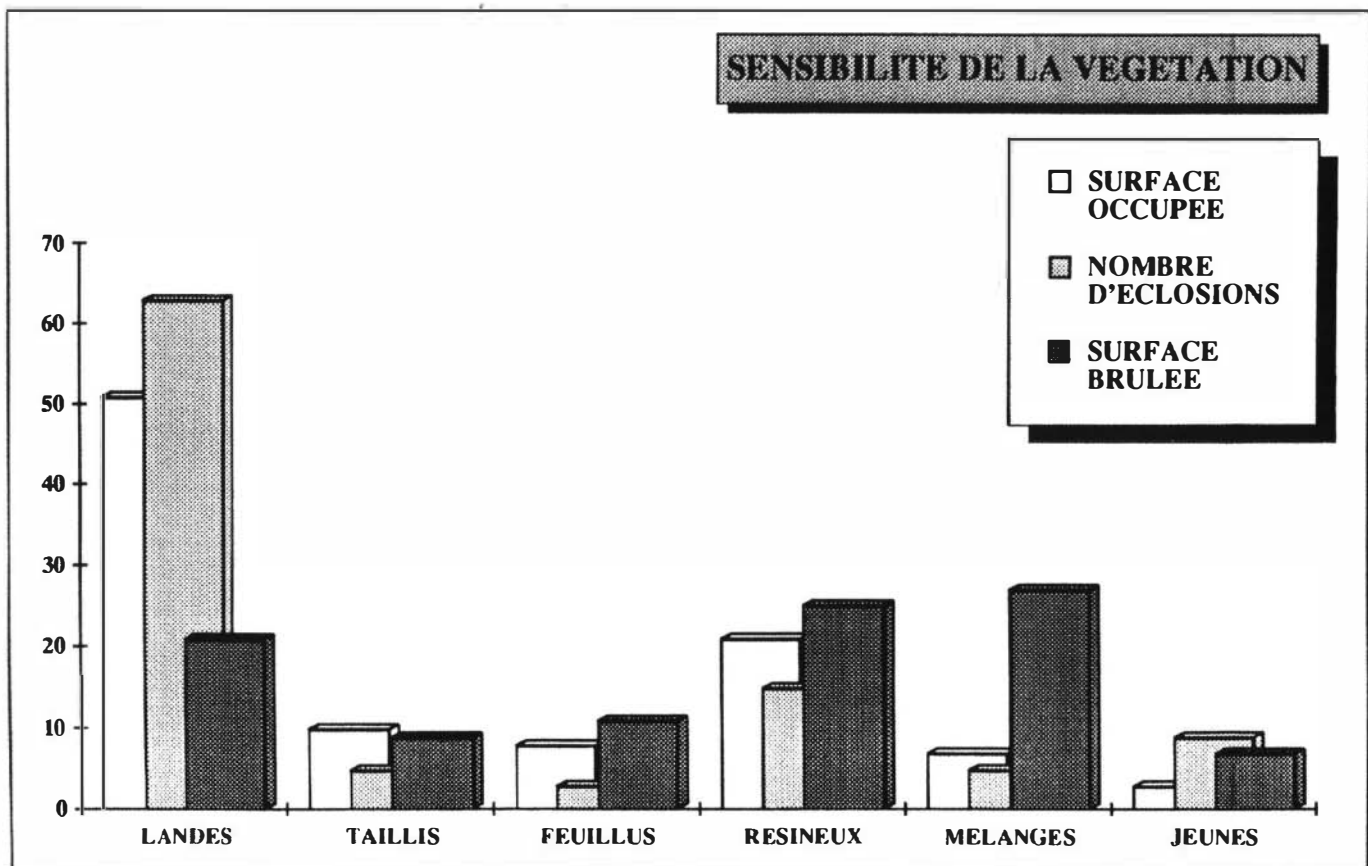


Fig.4 : Dans la région P.A.C.A., les taillis et les futaies de feuillus sont les moins inflammables, les landes et les jeunes peuplements les plus inflammables. Les landes sont les moins combustibles, les peuplements mélangés sont les plus combustibles.

III.- L'approche empirique : sensibilité de la végétation des Bouches du Rhône

Après avoir abordé les approches physique et statistique, une approche empirique est enfin proposée pour évaluer l'inflammabilité et la combustibilité des formations végétales

III.1.- Principe de l'étude

Cette étude s'appuie sur les données de l'Inventaire Forestier National : 1141 relevés effectués dans le département des Bouches-du-Rhône en 88-89. A partir du fichier des relevés écologiques, sont calculés pour chaque type de peuplement un indice moyen d'inflammabilité et un indice moyen de combustibilité. Puis, à partir du fichier des types de peuplement, ces mêmes indices moyens sont calculés pour chaque commune, en tenant compte de la surface relative qu'y occupe chaque type de peuplement.

La méthode utilisée pour évaluer ces deux indices à partir des relevés écologiques de l'I.F.N., est celle mise au point par le CEMAGREF dans le

méditerranéennes. Cette méthode est ainsi nommée car elle s'appuie avant tout sur les données de l'expérience personnelle d'un collègue d'experts

département de l'Hérault, avec l'appui scientifique du C.N.R.S.. Sans entrer dans les détails techniques que l'on trouvera dans les publications spécialisées, on peut résumer le procédé employé de la façon suivante: l'expérience des sapeurs-pompiers locaux a été utilisée pour caler des modèles mathématiques basés sur une description normalisée de la végétation.

Ces modèles sont les suivants:

$$I = 0,4 + 2,5 (E2) + 5 (E3) + 0,3 (BV \times F) - 4,47 (NS)$$

$$C = 39 + 0,23 BV (E'1 + E'2 - 7,18)$$

où:

- I est l'indice d'inflammabilité,
- C est l'indice de combustibilité,

-E2 et E3 sont les indices d'inflammabilité des deux espèces dominantes (d'après une cotation relative),

-E'1 et E'2 sont les indices de combustibilité des deux espèces dominantes (d'après une cotation relative),

-BV est le biovolume, ici pris égal au nombre de plantes abondantes,

-F l'inflammabilité du type de formation végétale, selon une classification du C.N.R.S. (d'après une cotation relative),

-NS est le nombre de strates de végétation.

L'essence la plus répandue dans les Bouches-du-Rhône est le pin d'Alep (50% des relevés), suivi du chêne vert et du chêne pubescent (tableauV). Certains relevés (21%) n'ont pas d'essence dominante: il s'agit des landes et garrigues. Les plantes (espèces, plus quelques genres) jugées abondantes sur les relevés sont au nombre de 127. Cette flore contribue à des titres divers à la vulnérabilité de la végétation. Le tableauVI précise les indices d'inflammabilité et de combustibilité des 27 plus fréquentes d'entre elles.

III.2.- Résultats

A partir des compositions floristiques et de la description de la structure de chaque type de peuplement, on peut sans difficulté calculer un indice moyen d'inflammabilité et de combustibilité (tableau VII, page 192 et figure 5, ci-contre). Les peuplements à la fois les moins inflammables et les moins combustibles sont de loin les forêts ripicoles² de feuillus ou de résineux. Les garrigues (et les reboisements) sont très inflammables, alors que les futaies de pins, pures ou en mélange avec le taillis, sont très combustibles. Les taillis de chênes sont en position intermédiaire, ceux de chênes pubescents étant nettement moins sensibles.

Près de 90 % des communes ont une inflammabilité élevée ou très élevée, les communes les moins inflammables étant surtout des communes agricoles peu boisées. Les

2 N.d.e. **Ripicole**: Qualifie la végétation des bords de cours d'eau, de lacs, de marais, de sources, et dont l'existence tient ou non à ce que les racines peuvent ou non atteindre l'eau.

Essence dominante	Nombre de relevés
Aucune	243
Cupressus sp.	2
Fraxinus oxyphylla	6
Picea excelsa (?)	1
Pinus halepensis	565
Pinus pinaster	2
Pinus pinea	8
Pinus silvestris	2
Populus alba	4
Populus nigra	4
Populus tremula	2
Quercus ilex	181
Quercus lanuginosa	114
Robinia pseudacacia	1
Cedrus atlantica	3
Pinus nigricans	1
Pinus lariciosalzman	1
Indéterminée	4
Total	1144

Tab.V : Dans les Bouches-du-Rhône, l'essence dominante est le pin d'Alep (50% des relevés), suivi du chêne vert et du chêne pubescent.

communes les plus inflammables font partie des communes statistiquement sensibles, sans être les plus exposées (tableau VIII, page 193).

Plus de 90% des communes ont également une combustibilité élevée ou très élevée, les communes les moins combustibles étant encore des communes peu boisées, généralement agricoles. Les communes les plus combustibles (tableau IX, page 193) font aussi partie des communes statistiquement sensibles, sans être non plus les plus exposées (ce ne sont pas non plus les plus inflammables).

Finalement, les communes soit très (ou très peu) inflammables, soit très (ou très peu) combustibles, sont peu nombreuses (figure 6, page 193). Elles ne sont donc pas cartographiées, compte tenu du faible intérêt pratique des résultats à cette échelle. Par contre, l'utilisation de la méthode employée au niveau de chaque unité menacée (lors de l'élaboration de P.I.D.A.F., par exemple), peut s'avérer plus pertinente.

A l'issue de l'analyse fine de l'inflammabilité et de la combustibilité du pin d'Alep apparait clairement la grande sensibilité au risque d'incendie de ces formations. Il convient d'étudier à présent les interventions susceptibles à la fois de diminuer ce risque et d'améliorer la résistance au feu de ces peuplements.

Espèce	Nombre de relevés	Inflammabilité	Combustibilité
Rubia peregrina	20	4	1
Teucrium chamaedrys	24	4	1
Aphyllanthes monspeliensis	33	8	1
Brachypodium phoenicoides	61	9	1
Brachypodium pinnatum	37	9	1
Brachypodium ramosum	366	9	1
Festuca ovina	46	9	1
Hedera helix	32	2	3
Dorycnium suffruticosum	35	6	4
Genista hispanica	27	7	4
Thymus vulgaris	168	7	4
Cornus sanguinea	21	4	5
Quercus lanuginosa	165	4	5
Viburnum tinus	27	4	5
Bupleurum fruticosum	29	5	5
Buxus sempervirens	78	5	5
Phillyrea angustifolia	40	6	5
Rosmarinus officinalis	320	7	5
Cistus albidus	101	5	6
Rubus	46	5	6
Smilax aspera	28	7	6
Quercus ilex	339	6	7
Juniperus oxycedrus	49	7	7
Genista scorpius	25	7	8
Quercus coccifera	573	7	8
Ulex parviflorus	191	7	8
Pinus halepensis	600	8	8

Tab.VI : Ont été rencontrées 127 plantes suffisamment abondantes pour être prises en compte dans le calcul des indices. Les 27 plantes suivantes sont les plus fréquentes (rencontrées au moins 20 fois).

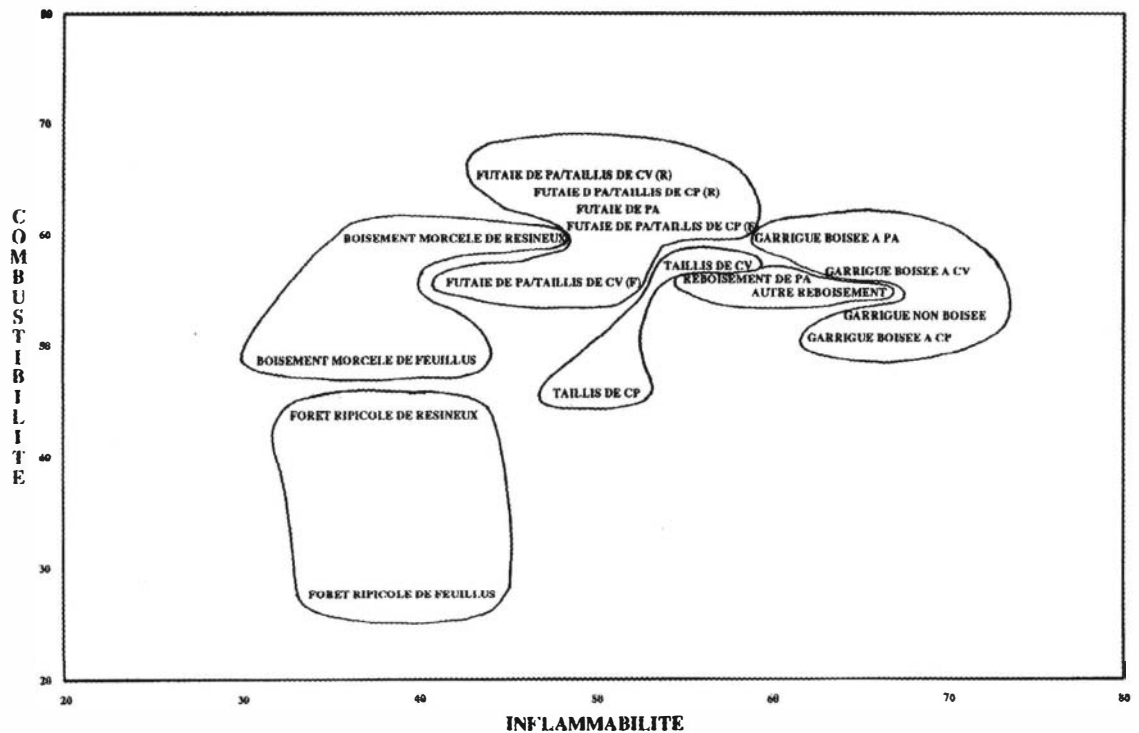


Fig. 5: Inflammabilité et combustibilité des types de peuplements des Bouches-du-Rhône

Principaux types de peuplements	Nombre de relevés	Nombre de strates	Nombre de plantes représentées	Nombre de plantes abondantes	Indice moyen d'inflammabilité	Indice moyen de combustibilité
Forêt ripicole de feuillus	6	3	15	4	39	27
Forêt ripicole de résineux	3	3	5	1	38	43
Taillis de chêne pubescent	49	3	20	3	50	45
Boisement morcelé de feuillus	16	4	13	4	37	48
Garrigue boisée à chêne pubescent	22	3	20	3	66	50
Garrigue non boisée	134	2	12	3	68	52
Futaie de pin d'Alep et taillis de chêne vert (F)	16	5	15	3	47	55
Reboisement d'autres conifères	31	4	13	3	62	55
Taillis de chêne vert	78	3	17	2	56	56
Reboisement de pin d'Alep	34	4	14	5	58	56
Garrigue boisée à chêne vert	83	3	16	4	67	56
Boisement morcelé de pin d'Alep ou d'autres conifères	33	5	15	4	42	59
Garrigue boisée à pin d'Alep	127	4	16	3	63	59
Futaie de pin d'Alep	377	4	16	4	51	61
Futaie de pin d'Alep et taillis de chêne pubescent (F)	16	5	22	3	53	61
Futaie de pin d'Alep et taillis de chêne vert (R)	20	5	18	4	48	64
Futaie de pin d'Alep et taillis de chêne pubescent (R)	38	5	22	4	51	64

Tab.VII : Les peuplements à la fois les moins inflammables et les moins combustibles sont de loin les forêts ripicoles de feuillus ou de résineux. Les garrigues (et les reboisements) sont très inflammables, alors que les futaies de pins, pures ou en mélange avec le taillis, sont très combustibles. Les taillis de chênes sont en position intermédiaire, ceux de chênes pubescents étant nettement moins sensibles.

(F)=Feuillus prépondérants

(R)=Résineux prépondérants

IV.- Interventions sylvicoles propres à diminuer la sensibilité au feu des peuplements de pin d'Alep

Dans les futaies de pin d'Alep, deux types de mesures susceptibles de diminuer l'intensité du feu et d'altérer la continuité du combustible vont être abordées successivement: l'élagage et le débroussaillage localisés.

Dans les peuplements mélangés (pin d'Alep et feuillus), où le risque d'incendie est le plus fort, une opération de conversion en taillis de feuillus peut être proposée.

Dans un deuxième temps les capacités de résistance et de reconstitution naturelles des peuplements de pin d'Alep seront étudiées, sachant que,

même une fois protégés, ils peuvent toujours subir le passage d'un incendie.

IV.1.- L'élagage localisé

IV.1.1.- Le niveau d'élagage

A titre d'exemple, les résultats d'une expérimentation comparant la sensibilité au feu de quatre espèces forestières méditerranéennes en fonction de la hauteur d'élagage et de la charge en combustible sont retranscrits ici dans leurs grandes lignes (Valette, 1986).

a. matériel et méthode

Les essences testées ont été le pin d'Alep, le pin d'Eldar, le cèdre de l'Atlas et le cyprès de l'Arizona âgés de 5 à 8 ans. L'étude a consisté en la reconstitution sur banc d'essai de lignes de plantation à partir d'arbres coupés, au pied desquelles un front de flamme régulier se propage selon cinq niveaux d'intensité. Ces niveaux d'intensité sont contrôlés par les charges du lit de combustible simulant la litière: 250, 500, 1000, 1500, et 2000 g/m².

Les arbres sont élagués selon 3 niveaux: non élagués, élagués sur 1/3 de la hauteur et élagués sur 2/3 de la hauteur.

L'observation des dégâts directs sur les houppiers (combustion et dessèchement foliaires) permettent de comparer les sensibilités relatives de ces espèces.

b. résultats

La figure 7, (cf. page 194) fait état des dégâts apparents après le passage du feu.

Des quatre essences, le pin d'Alep est celui dont le **feuillage est le plus sensible à l'échauffement**. Les arbres doivent être fortement élagués pour supporter sans trop de dommages le passage du feu. Malgré cela, les aiguilles des verticilles de la base du houppier ont brûlé dès 1500 g/m².

Il a été noté plus haut la forte inflammabilité des aiguilles de pin d'Alep. Cette propriété explique la combustion vive d'une partie du houppier. Les dessèchements foliaires correspondent à une zone du houppier non brûlée mais où, néanmoins, le dégagement calorifique a tué les aiguilles.

IV.1.2.- Sensibilité des aiguilles vivantes à l'échauffement

La température létale des tissus vivants est couramment indiquée comme étant de l'ordre de 60°C, avec des variations de quelques degrés qui dépendent du temps d'exposition (Kayll, 1963). Il convient donc d'estimer le couple "température-durée d'exposition", qui est en relation avec la quantité de chaleur létale pour les aiguilles de pin.

a. méthode

Expérimentalement la méthode de

Communes les moins inflammables	Communes les plus inflammables
Port-Saint-Louis-du-Rhône Saintes-Maries-de-la-Mer Cabannes Eyragues Plan-d'Orgon Noves Châteaurenard La Roque-d'Antheron	Boulbon Graveson Lançon-Provence Le Rove Roquevaire Gignac-La-Nerthe

Tab.VIII : Les communes les moins inflammables sont surtout des communes agricoles peu boisées (la présence de la Roque-d'Anthéron est à noter). Les communes les plus inflammables font partie des communes statistiquement sensibles, sans être les plus exposées.

Communes les moins combustibles	Communes les plus combustibles
Cabannes Port-Saint-Louis-du-Rhône Saintes-Maries-de-la-Mer Châteaurenard Plan-d'Orgon Nove Saint-Estève-Janson Arles Rognonas Berre-l'Etang Sénas	Eyragues Rognes Gardanne Beaurecueil Saint-Antonin-sur-Bayon Châteauneuf-les-Martigues Carnoux-en-Provence Greasque Venelles Mas-Blanc-des-Alpilles

Tab.IX : Les communes les moins combustibles sont encore des communes peu boisées, généralement agricoles. Les communes les plus combustibles font aussi partie des communes statistiquement sensibles, sans être les plus exposées (ce ne sont pas non plus les plus inflammables).

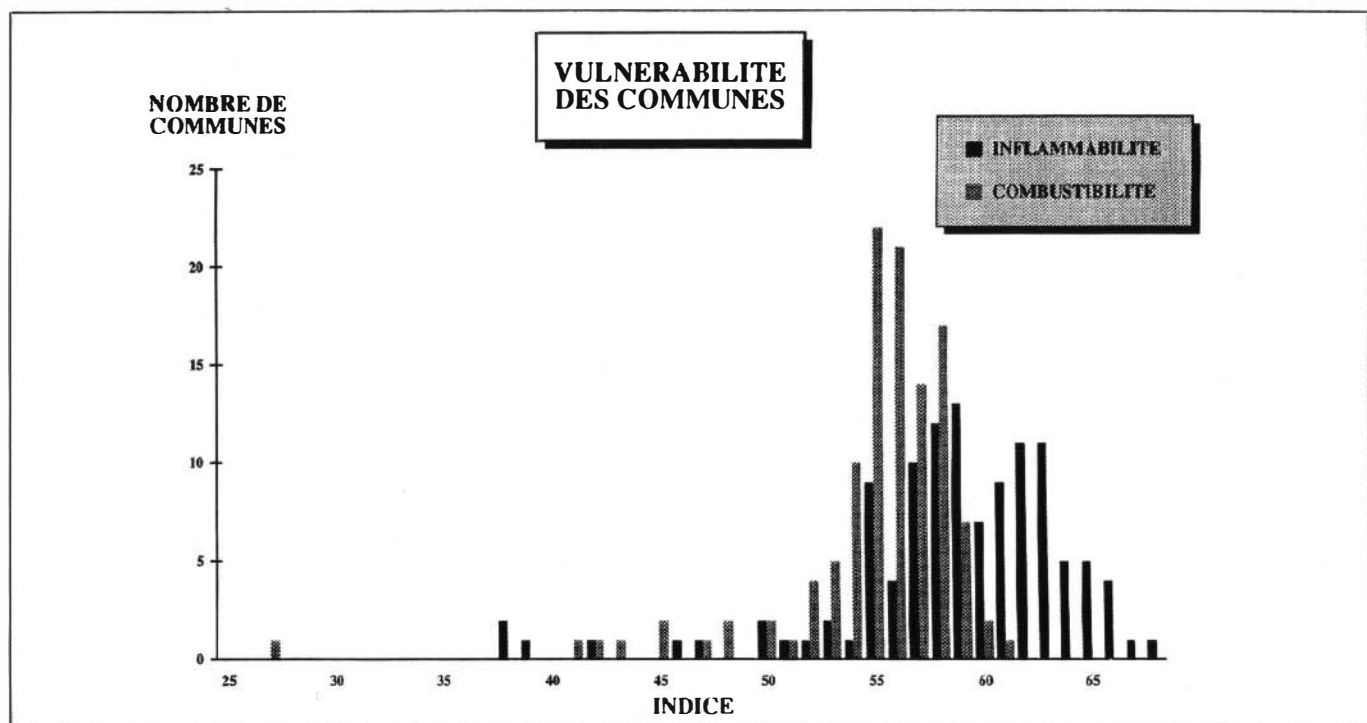


Fig.6: Les communes soit très (ou très peu) inflammables, soit très (ou très peu) combustibles, sont peu nombreuses.

mesure utilisée consiste à immerger des pousses terminales de branches dans un bain marie thermostaté pendant une durée déterminée et à une température fixée.

Les sensibilités à l'échauffement des aiguilles de pin d'Alep et de pins pignons ont été ainsi comparées (Pageaud, 1991).

b. Résultats

Les résultats sont présentés dans le tableau X.

Les aiguilles de pin d'Alep sont particulièrement **peu résistantes à l'échauffement**. Pour chaque durée d'application testée, les températures létales pour les aiguilles de pin pignon sont supérieures d'environ 5°C.

Cette différence de sensibilité s'explique par les caractéristiques structurales spécifiques des aiguilles: la plus faible masse surfacique des aiguilles de pin d'Alep (tableau III), signifie une plus grande surface d'exposition à la chaleur par unité de poids.

Le temps de stabilisation des dessèchements a été dans les conditions expérimentales décrites par Pageaud (1991) de trois semaines pour le pin d'Alep et d'un mois pour le pin pignon.

IV.2.- Le débroussaillage localisé

Outre les techniques très répandues de débroussaillage telles que les procédés manuels et mécaniques dont on connaît l'efficacité mais aussi le coût, il est intéressant de signaler que les coupures de combustibles établies sous pinèdes de pin d'Alep se prêtent bien à l'entretien par le brûlage dirigé.

IV.2.1.- Aptitude au brûlage dirigé

En effet les expérimentations menées notamment à la Roque d'Anthéron dans les Bouches-du-Rhône ont montré la **faisabilité et l'efficacité** de cette technique pour réduire le combustible bas, tout en préservant les couches superficielles du sol et la strate arborée (Maréchal & Valette, 1988).

De bonnes conditions micro-climatiques et un mode de conduite du feu approprié, permettent effectivement de réaliser ce double objectif à moindre coût.

La préservation des pins d'Alep passe en premier lieu, par la protec-

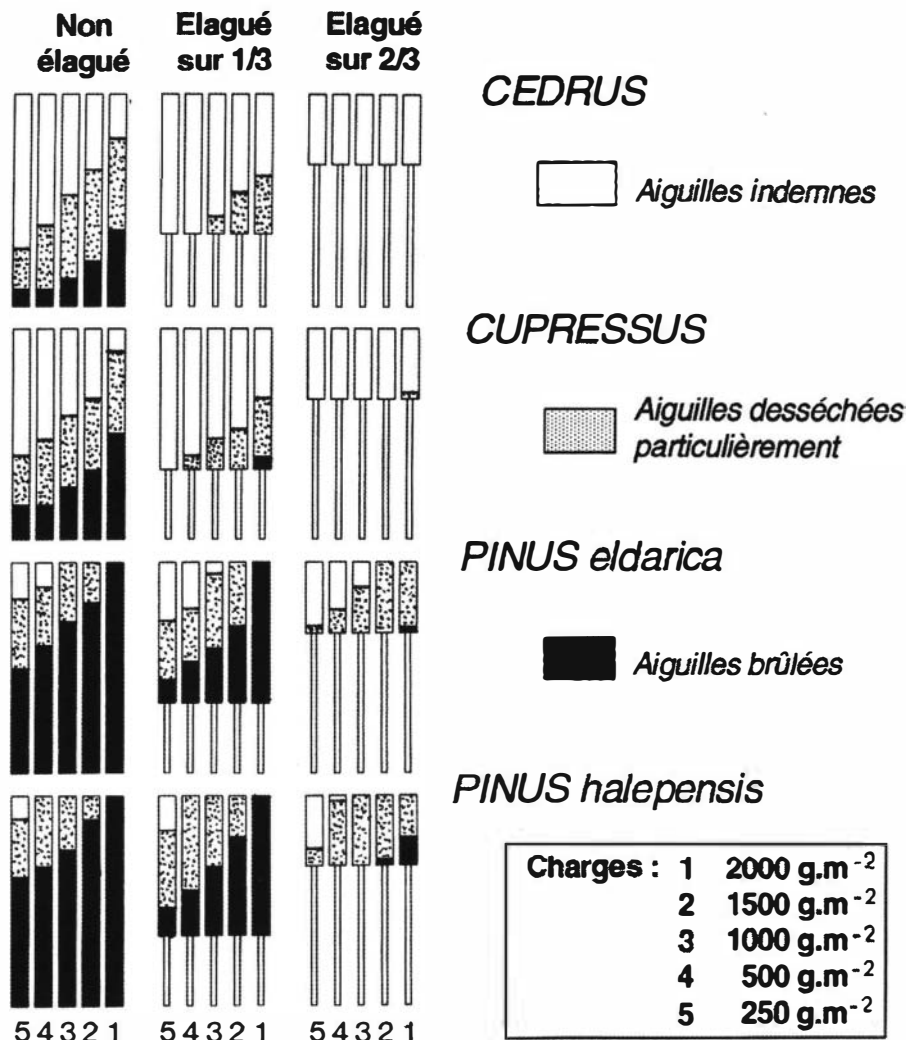


Fig. 7 : Dégâts apparents.

Durée d'application	Fourchette des températures létales (°C)	
	Pin d'Alep	Pin pignon
1 seconde	60-65	65-70
15 secondes	non mesurées	60-65
1 minute	50-55	55-60
5 minutes	47, 5-50	50-55

Tab. X : "Chaleurs létales" pour les aiguilles de pin

tion des houppiers au moyen d'un élagage préalable, généralement réalisé sur la coupure de combustible, et, en second lieu, par la protection naturelle des tissus vivants du tronc par une écorce épaisse.

IV.2.2.- Distribution de l'écorce autour du tronc

La figure 8 montre en effet la répartition de l'épaisseur de l'écorce du pin d'Alep à la base du tronc et

selon les classes de diamètre.

En plus de la décroissance normale de l'épaisseur d'écorce le long de la tige, il apparait que la base de la tige bénéficie d'une couche d'écorce d'épaisseur plus que proportionnelle à son diamètre. Elle assure ainsi une **bonne protection thermique** des assises cambiales et des tissus conducteurs dont dépend la survie de l'arbre.



Photo 3 : Echauffement d'aiguilles de pin pignon. Photo E.R.

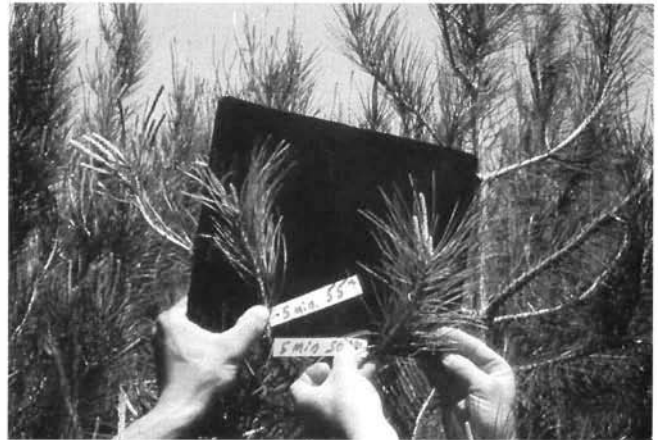


Photo 4 : Température létale du pin d'Alep. Photo E.R.

Photo E.R.

En effet, les températures enregistrées sous écorce au niveau du collet lors du brûlage dirigé, sont nettement atténuées par la couche d'écorce isolante et bien plus faibles que celles enregistrées à la surface de l'écorce (figure 9, page 196). Ryan *et al.*, (1989) soulignent à ce propos que la durée létale d'application d'une température sur le tronc est proportionnelle au carré de l'épaisseur de l'écorce.

Cette caractéristique explique que le collet du pin d'Alep supporte bien le passage de brûlages dirigés, pourtant parfois très lents (brûlage à contre vent ou à contre pente).

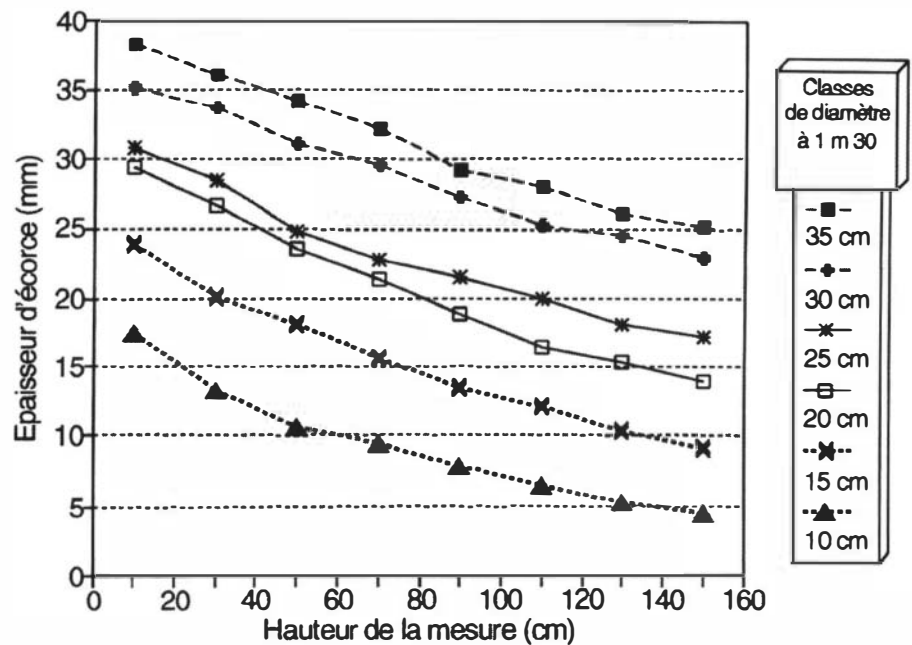
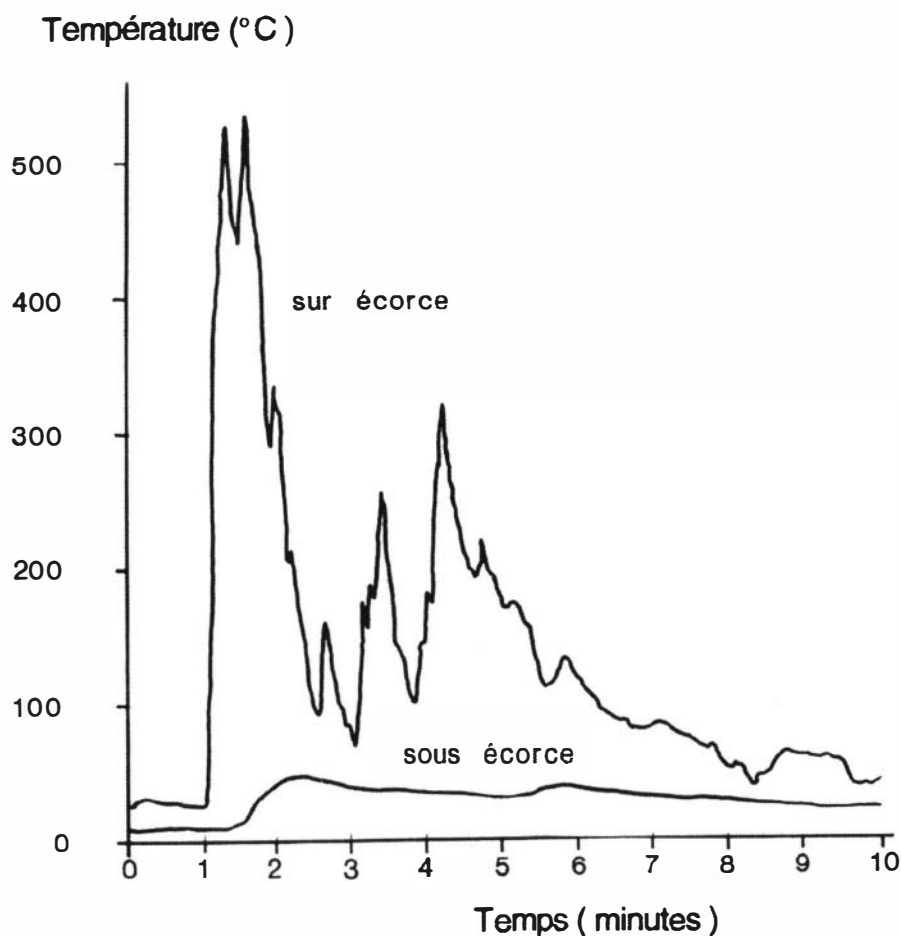


Fig. 8 : Epaisseur de l'écorce des pins d'Alep selon les classes de diamètre.



Photo 5 : Brûlage dirigé à la Roque d'Anthéron.

Photo E.R.



◀ Fig. 9 : Températures enregistrées sur et sous écorce au collet d'un pin d'Alep lors d'un brûlage dirigé.

IV.3.- Conversion du peuplement mixte feuillus-résineux en taillis de feuillus

On peut également mesurer tout l'intérêt de certaines opérations sylvicoles bien conduites visant à diminuer la sensibilité des peuplements et donc des massifs. La plus notable d'entre elles est sans doute la **coupe de pins d'Alep** dans les futaies de pins sur taillis de chêne pubescent comportant un nombre de tiges suffisant. Cette opération ne fait qu'accélérer le processus naturel de domination progressive des pins par les feuillus, qui ne se déroule que rarement jusqu'à son

terme compte tenu de la fréquence des incendies.

Cette conversion se traduit par une réduction spectaculaire à la fois de l'inflammabilité et de la combustibilité (tableau VII). Si elle n'est pas sans poser des problèmes pratiques (extraction des bois) ou psychologiques (modification du paysage), elle présente l'immense intérêt d'être une opération financièrement rentable pour le propriétaire ou la collectivité, au contraire du traditionnel débroussaillage, coûteux et répétitif.

IV.4.- La reconstitution naturelle après incendie

Dans des peuplements bien entretenus comme il a été décrit plus haut, les incendies sont de moindre intensité, et le taux de mortalité des arbres est faible et ne remet pas en cause leur pérennité.

IV.4.1.- Survie des arbres après incendie

Des travaux sont actuellement

menés au Laboratoire de Recherches Forestières Méditerranéennes afin de modéliser la survie des pins après incendie. L'objectif est de donner à terme au gestionnaire forestier un outil de **prédiction de la mortalité** afin qu'il puisse mener, dans les semaines qui suivent le feu et en toute connaissance de cause, les travaux d'exploitation et de reconstitution qui

s'imposent. L'étude consiste à décrire les dommages thermiques sur le feuillage et sur le tronc des arbres, puis de suivre les placettes jusqu'à stabilisation de la mortalité. Par retour aux données après feu, les meilleurs prédicteurs de la mortalité sont alors identifiés, et les seuils létaux sont déterminés.

Ces recherches sont aussi destinées à étayer une sylviculture ayant pour objectif de constituer des plantations qui supportent le passage du feu. Les lourds travaux d'entretien que cela suppose se justifient conjointement par:

- le coût d'installation de la plantation,
- sa valeur paysagère ou patrimoniale,
- la part laissée délibérément au feu en concentrant les efforts sur des espaces d'extension limitée,
- l'intérêt des foyers de régénération constitués par ces arbres survivants.

IV.4.2.- Régénération naturelle après incendie

Le pin d'Alep est en effet une **espèce colonisatrice** qui se régénère



Photo 6 : Semis de pin d'Alep , 1 an après incendie à Eygalières.

Photo E.R.

naturellement bien après incendie, les semis ayant besoin de lumière. C'est là l'un de ces principaux atouts, qui explique que cette essence soit actuellement en pleine extension.

Les jeunes arbres issus de régénération naturelle sont en général mieux adaptés aux conditions de milieu que ceux issus de reboisement à partir de

graines dont la provenance n'est actuellement pas souvent maîtrisée.

Finalement le pin d'Alep est une essence très sensible aux incendies, mais peu vulnérable à l'échelle de l'espèce car elle tire partie du passage du feu pour accroître son emprise, à condition que les incendies ne soient

pas trop fréquents.

Des interventions sylvicoles énergiques sont de nature à rendre ces peuplements moins sensibles aux incendies, et à faciliter la survie des arbres et notamment de semenciers après le passage du feu.

D.A., E.R.

Bibliographie

Agence MTDA, 1990-Etude des données contenues dans le fichier Prométhée-Région Provence-Alpes Côte d'Azur. DRAF PACA, 95p.

Agence MTDA, 1991-Schéma Départemental de Prévention des Incendies de Forêts. Evolution du risque. DDAF des Bouches du Rhône, 68p.

Alexandrian D. 1982-Estimation de l'inflammabilité et de la combustibilité de la végétation. Bulletin d'Information du CEMAGREF N°228, pp.31-39.

Byram G.M., 1959-Combustion of forest fuels, in forest fire: control and use. K.P. Davis, Ed. Mac Gran-Hill Book C°, New York, pp61-89.

Caramelle P., Clément, A., 1978-

Inflammabilité et combustibilité de la végétation méditerranéenne. Mémoire de 3ème année ENITEF-INRA, Station de Sylviculture méditerranéenne, Avignon, 168p.

Delaveaud P., 1981- Le feu, outil sylvicole ? Utilisation pratique des données de combustibilité. Mémoire de 3ème année ENITEF-INRA, Station de Sylviculture méditerranéenne, Avignon, 92p.

Doat J., Valette J.C., 1981-Le pouvoir calorifique supérieur d'espèces forestières méditerranéennes. *Ann. Sci. forest.*, 38(4):469-486.

Dupuy J.L., 1991-Modélisation prédictive de la propagation des incendies de forêts. Rapport technique. DEA Université Claude Bernard Lyon 1-INRA, Station de

Sylviculture méditerranéenne, Avignon, 26p.+annexes.

Kayll A.J., 1963-A technique for studying the fire tolerance of living tree trunks. Department of Forestry, Publication 1012, Canada, 21p.

Layec S., 1989-Des paramètres biologiques susceptibles d'améliorer l'indice de risques d'incendies de forêts. Mémoire de 3ème année ENSA Rennes-INRA, Station de Sylviculture méditerranéenne, Avignon, 32p.

Maréchal J., Valette J.C., 1988-Les dispositifs de La Roque d'Anthéron. Com. Atelier International sur le brûlage dirigé. INRA, Station de Sylviculture méditerranéenne, Avignon, pp189-206.

Pageaud D., 1991-Reconstitution natu-

relle de peuplements résineux après incendie (*Pinus pinea* L. & *Pinus halepensis* MILL.). Mémoire de 3ème année ENITEF-INRA, Station de Sylviculture méditerranéenne, Avignon, 51p.

Ryan K.C., Steele B.M., 1989-Cambium mortality resulting from broadcast burning in mixed conifer shelterwoods. Proceedings of the 10th Conference on fire and forest meteorology, 17-21/04/89, Ottawa, Canada, pp.108-116.

Valette J.C. 1986-Sensibilité au feu de quatre espèces forestières méditerranéennes en fonction de la hauteur d'élagage et de la charge de litière. Com. 18^{ème} Congrès IUFRO, Ljubljana, Sept. 1986, S1.09-00, 10p.

Valette J.C. 1990-Inflammabilité des espèces forestières méditerranéennes. Conséquences sur la combustibilité des formations forestières. *Rev. For. Fr.* XLII-n° sp.:76-92.

Valette J.C., Clément A., Delabre, P., 1979-Inflammabilité d'espèces méditerranéennes. Tests rapides. Campagne été 1978. INRA, Station de Sylviculture méditerranéenne, Avignon, 29p.

Résumé

Partant du triple constat selon lequel les aiguilles de pin d'Alep sont fortement inflammables, qu'elles constituent une litière très combustible une fois tombées au sol et que les caractéristiques structurales des peuplements (couvert clair permettant le développement de strates basses puissantes, élagage naturel difficile) sont favorables à la montée en puissance et au développement du feu, il est

conclu que les formations à pin d'Alep sont parmi les plus sensibles à l'éclosion et à la propagation des incendies en région méditerranéenne française.

En contre partie les capacités de résistance de cette essence à certains niveaux d'échauffements (distribution de l'écorce le long du tronc), son abondante régénération naturelle après incendie et son aptitude physiologique à limiter ses pertes transpiratoires (fermeture progressive des stomates) et à s'accomoder des conditions

édaphiques difficiles du milieu méditerranéen, en font une espèce susceptible de survivre dans certaines conditions mais surtout de se reconstituer dans la plupart des cas, après les agressions thermiques qu'elle subit.

Des interventions sylvicoles préventives en terme de choix des essences associées, de conduite des peuplements et des opérations localisées de contrôle du combustible bas sont proposées pour améliorer la résistance au feu de ces peuplements.