

Etude cofinancée par :

**La Région
Provence-Alpes-Côte d'Azur**

**Le Ministère de l'Agriculture,
de la Pêche et de l'Alimentation - DERY**

Dans le cadre du GIS Incendie

Dynamique spatiale de la régénération des forêts après incendie en basse Provence calcaire

Cas particulier du pin d'Alep

Michel VENNETIER

Avec la collaboration de

**Roland ESTEVE, Rose-Marie GARCIN, Sylvain GRIOT,
Christian RIPERT, Bruno VILA**

Un projet commun IMEP - Cemagref

Département Gestion des territoires
Division Agriculture et Forêt Méditerranéennes

GROUPEMENT D'AIX EN PROVENCE

Le Tholonet - BP 31

13612 Aix-en-Provence Cedex 01

Tél.: 04.42.66.99.62 - Fax : 04.42.66.99.71

Novembre 2001

Résumé

Ce rapport fait le bilan des travaux réalisés par le Cemagref dans le programme commun IMEP - Cemagref "Dynamique spatiale et fonctionnelle de la végétation après incendie en basse Provence calcaire".

Une première partie traite des relevés stationnels et de la cartographie des placettes ayant servi pour l'étude des relations entre les caractéristiques spatiales des feux (forme et dimensions) et la réponse de la végétation. Cette partie a fait l'objet d'une thèse : BONNET Véronique, 2001. Analyse spatiale et fonctionnelle de la réponse des communautés végétales après incendie en basse Provence calcaire. Thèse de doctorat. IMEP , Université de droit, d'Economie et de Sciences d'Aix Marseille III. 197p.

La deuxième partie fait le bilan de l'étude spécifique de la régénération du pin d'Alep après incendie. Sont abordés la pluie de graines (durée, quantification, variabilité, prédation animale), la germination et la survie des semis pendant 2 ans, l'impact des travaux d'exploitation, et les conditions de température au sol.

Synthèse des résultats :

La pluie de graine est très courte (quelques jours) et généralement très intense (plusieurs dizaines de graines/m²) ; par contre la germination s'étale sur plusieurs saisons. L'absence ou la rareté de graines mûres au moment du feu pourraient expliquer en partie la non régénération de massifs entiers certaines années exceptionnelles. Les conditions extrêmes de température qui règnent au sol dans les mois d'été après incendie peuvent conduire à un faible taux de germination et de survie des semis. L'exploitation des peuplements brûlés à une période mal choisie où un exploitation mal conduite sont des causes majeures de l'échec de régénérations au départ bien établies. Le pâturage des parcelles au cours des premières années peut aussi être très destructeur.

Abstract

This is the final report for Cemagref participation to the research program "Spatial and functional response of vegetation after wild fire in Limestone based Provence".

Cemagref studied *Pinus halepensis* (mill) regeneration after fire. Seed rain appeared to be short but dense. Germination happened throughout 2 years. Lack of mature seeds could explain the lack of natural regeneration of pine some years. High temperature occurring for months in summer at ground level could lead to low germination and seedlings survival rates. Inappropriate period and method for logging caused extensive destruction of established regeneration. Grazing in the first two years was also destructive.

Financements

Ces travaux ont été financés conjointement par le Conseil Régional de la Région Provence Alpes Côte d'Azur et le Ministère de l'Agriculture, de la Pêche et de l'Alimentation, Direction de l'Espace Rural et de la Forêt (DERF), dans le cadre du GIS "Incendies".

Ils font partie d'un programme commun entre l'IMEP (Institut Méditerranéen d'Ecologie et de Paléoécologie) et le Cemagref d'Aix en Provence, UR Agriculture et Forêt Méditerranéennes.

Remerciements à :

- Sylvain Griot qui a participé au projet en effectuant une grande partie des relevés stationnels et de la cartographie sur les placettes incendiées pour le programme de l'IMEP, Christian Ripert qui a apporté son concours pour l'interprétation des fosses pédologiques,
- Rose-Marie Garcin, Roland Estève et Bruno Vila qui ont participé aux comptages de graines et de semis et aux relevés de température,
- Véronique Bonnet pour sa disponibilité. Les protocoles décrits dans le chapitre 2 de ce rapport -*Dynamique de la végétation post-incendie* - sont tirés de sa thèse.
- Thierry Taton pour la coordination du programme.

Table des matières

1	INTRODUCTION	4
2	DYNAMIQUE DE LA VÉGÉTATION POST-INCENDIE	4
2.1	SITES D'ÉTUDE.....	4
2.2	EVALUATION STATIONNELLE DES PLACETTES	5
2.3	CARTOGRAPHIE DES PLACETTES ET DES FEUX	5
2.3.1	<i>Cartes générales</i>	5
2.3.2	<i>Relevés cartographiques autour des placettes</i>	5
2.4	ANALYSE GLOBALE DES DONNÉES.....	6
3	RÉGÉNÉRATION DU PIN D'ALEP	6
3.1	PLUIE DE GRAINES DE PIN D'ALEP APRÈS INCENDIE	7
3.1.1	<i>Sites retenus</i>	7
3.1.2	<i>Protocoles de comptages de graines</i>	7
3.1.3	<i>Résultats du comptage de graines</i>	8
3.1.4	<i>Dissémination des graines</i>	12
3.1.5	<i>Prédation et déplacement par les animaux</i>	16
3.2	RÉGÉNÉRATION DU PIN D'ALEP.....	17
3.2.1	<i>Dispositif de recherche</i>	17
3.2.2	<i>germination</i>	17
3.2.3	<i>Survie et développement des semis</i>	21
3.2.4	<i>Impact des exploitations et broyage</i>	23
3.2.5	<i>Feux de 2001</i>	24
3.3	MESURES DE TEMPÉRATURE AU SOL.....	25
3.3.1	<i>Technique de mesure</i>	25
3.3.2	<i>Protocoles de terrain</i>	25
3.3.3	<i>Protocoles de laboratoire</i>	27
3.3.4	<i>Résultats</i>	27
3.4	CONCLUSION.....	32
4	BIBLIOGRAPHIE	32

1 Introduction

Les incendies sont une préoccupation majeure des gestionnaires de l'espace naturel en région méditerranéenne. Des grands incendies se sont développés ces dernières années à proximité des zones urbaines (Etoile, Estaque) ou dans des massifs touristiques (Alpilles), générant de vives préoccupations des populations et des collectivités, et un souci de reconstituer le cadre de vie ainsi affecté. L'augmentation des moyens de lutte et le reboisement ne peuvent être les seules réponses : ces grands incendies se développent généralement dans des périodes de mistral très violent qui interdit l'extinction rapide des incendies quels que soient les moyens de lutte engagés, et les milieux méditerranéens se prêtent généralement mal aux plantations.

Par ailleurs, le feu est parfois perçu comme un facteur écologique intégré par le fonctionnement des écosystèmes et dont l'impact peut être nuancé. La compréhension de la dynamique post-incendie des écosystèmes aide à optimiser les opérations de réhabilitation.

Les incendies de forêt et d'autres milieux naturels ont fait l'objet d'innombrables travaux dans tous les écosystèmes de la planète. Au regard de l'investigation bibliographique réalisée en amont de ce projet (1500 références), les processus écologiques post-incendie sont les moins bien connus, notamment :

- ❖ le rôle des caractéristiques spatiales des perturbations (c'est à dire la forme, la taille, ... des taches incendiées)
- ❖ pour la zone méditerranéenne, la régénération après incendie du pin d'Alep, espèce primordiale en basse Provence pour la reconstitution d'un écosystème boisé,

C'est à ces deux derniers points que s'est intéressé le projet décrit dans ce rapport.

2 Dynamique de la végétation post-incendie

Ce chapitre traite du premier point ci-dessus. L'objectif est de caractériser la dynamique de la végétation après incendie en fonction de la taille et de la forme des feux, en partant de l'idée que la distance aux limites du feu peut influencer cette dynamique par le biais :

- ❖ de la pluie de graines (toutes espèces) issue des zones non brûlées, que l'on suppose dépendante des distances,
- ❖ des modifications des comportements des animaux disséminateurs,
- ❖ des différences de degré de combustion entre les bordures, théoriquement soumises à des températures inférieures à celles subies par le cœur des feux.

2.1 Sites d'étude

(Carte en annexe n°1) On a distingué deux types de sites :

- Les sites étudiés pour la dynamique de la végétation, où des placettes ont été installées disséminées dans des stations représentatives du milieu concerné. Ont été retenus :
 - quatre incendies de 1997 de tailles et de formes différentes : Massif de l'Etoile 3450 ha, Petit Arbois 280 ha, Le Rove 465 ha, Callelongue 10 ha,
- Les sites où, en plus de la dynamique de la végétation, ont été étudiées la banque de graines du sol et la pluie de graines durant 2 années post incendie. Dans ces sites, les placettes ont été alignées sur des transects, perpendiculairement à une limite du feu et parallèlement à la plus grande dimension du feu.
 - trois incendies de 1998 : Peynier 260 ha, Chateauneuf le Rouge 15 ha, Le Rove 47 ha,
 - un incendie de 2000 : Belcodène 40 ha

2.2 Evaluation stationnelle des placettes

Pour comprendre la dynamique temporelle et spatiale de la végétation, on doit intégrer les différences entre placettes qui sont dues à des variations importantes du milieu. Des relevés écologiques ont donc été réalisés par le Cemagref sur toutes les placettes expérimentales, en deux étapes :

- Toutes les placettes (99) ont fait l'objet d'une description détaillée du milieu, sans ouverture de fosses pédologiques (variables géographiques, topographiques, climatiques, variables géologiques et pédologiques superficielles). Les relevés de végétation ont été réalisés par l'IMEP. Une première série d'analyses statistiques a permis d'établir une typologie des placettes sur la base de la flore et des variables de milieu. Un échantillon représentatif de ces placettes (36) a été sélectionné, et ces placettes pérennisées par bornes de géomètre.
- Les 36 placettes représentatives ont alors fait l'objet d'un suivi sur plusieurs années de la végétation par l'IMEP, et d'une étude détaillée du milieu par le Cemagref : toutes les variables des relevés sommaires plus une ou plusieurs fosses pédologiques, la description et une analyse très détaillée du sol, de la géologie, et des roches en place.
- Les 4 transects (Peynier, Chateauneuf le Rouge, Le Rove et Belcodène) ont fait l'objet de mesures détaillées comme les placettes représentatives.

Toutes ces mesures de milieu ont été saisies dans une base de données et pré-traitées statistiquement par le Cemagref, pour étudier la structuration écologique du milieu. Puis la base de données a été transmise à l'IMEP, pour être intégrée avec la base de données floristiques.

2.3 Cartographie des placettes et des feux

Un des objectifs principaux du projet étant d'étudier les relations entre les caractéristiques spatiales des feux et la dynamique de végétation, il était indispensable de disposer de cartes des sites incendiés pour installer le dispositif expérimental, puis du repérage des placettes sur des cartes.

Un SIG a donc été réalisé par le Cemagref pour recueillir et rassembler toutes les informations spatiales.

2.3.1 Cartes générales

Les limites de tous les feux ont été numérisées à partir des cartes ou informations fournies par les différents services de l'état et les collectivités (ONF, DDAF, Mairies, pompiers), et à partir de relevés des contours sur terrain par GPS.

Ces limites ont été reportées sur des fonds de cartes à différentes échelles et assemblées au niveau régional.

Puis l'ensemble des limites a été reporté sur les fonds scannés IGN au 1/25000^{ème}, qui ont été eux même assemblés pour fournir une carte de base générale.

2.3.2 Relevés cartographiques autour des placettes.

La distance des placettes aux limites du feu ne pouvait pas toujours être évaluée précisément sur les cartes générales, en raison de l'imprécision de certaines de ces limites relevées sommairement par diverses personnes.

Il fallait donc relever de façon précise l'environnement des placettes.

Ont donc été repérés au GPS avec une précision métrique :

- l'emplacement exact des placettes permanentes
- les contours du feu dans les environs de ces placettes sur une distance de quelques centaines de mètres,

- l'emplacement et le contour des « refuges », zones non brûlées ou partiellement survivantes pouvant servir de source de graines, là encore dans les quelques centaines de mètres autour des placettes.

Toutes ces informations géoréférencées ont été reportées sur les cartes précédentes ce qui a permis aussi de rectifier des limites de feu par rapport aux cartes les plus grossières réalisées précédemment (Carte en annexe n°2).

Puis ont été mis au point des outils de calcul automatique des distances entre les placettes et les limites non brûlées (contours de feux et refuges). Ils consistent à trouver, avec les fonctions intégrées du logiciel Arc-info de recherche d'intersection, dans toutes les directions et dans des directions privilégiées autour de la placette, les points les plus proches appartenant aux différentes limites de feux et de refuges.

L'ensemble du SIG a été fourni à l'IMEP, ces données étant utilisées pour l'analyse de la dynamique de la végétation.

2.4 Analyse globale des données

La réunion de toutes les données stationnelles, floristiques et cartographiques a permis d'analyser :

- l'importance relative des facteurs du milieu par rapport aux perturbation créées par le feu, et l'interaction entre perturbation et milieu,
- le rôle des distances aux limites dans la dynamique post incendie de la végétation : richesse en espèce, importance relative des groupes fonctionnels, indices de biodiversité, pluie de graines, richesse chimique du sol.

Ces travaux ont fait l'objet d'une thèse de doctorat (Véronique Bonnet), entièrement dédiée à ce projet, soutenue avec succès le 29 octobre 2001 à l'Université d'Aix Marseille III et qui est fournie en annexe.

3 Régénération du pin d'Alep

Le pin d'Alep est une des principales essences de la Provence, où elle joue un rôle particulier dans la reconquête des milieux dégradés par l'homme ou par le feu. Capable de s'installer dans des conditions climatiques et pédologiques très difficiles, en plein découvert, dans les sites les plus secs de Provence, elle peut reconstituer rapidement une ambiance forestière après les perturbations, favorisant le retour ultérieur d'espèces moins frugales et moins résistantes, comme les chênes. Pour jouer ce rôle, elle doit cependant disposer de semenciers dans les zones incendiées, ou à proximité immédiate. Et les graines qui sont disséminées doivent survivre, germer, puis les semis se développer dans des conditions particulièrement difficiles. Si la régénération du pin d'Alep se produit dans une majorité de cas, il arrive qu'elle fasse partiellement ou totalement défaut sur des grandes surfaces.

Comprendre les mécanismes de la régénération pourrait aider :

- à comprendre les échecs et éventuellement à les anticiper pour y remédier,
- à ne pas précipiter des travaux inutiles lorsque la régénération prend du temps,
- à optimiser les travaux d'exploitation et de nettoyage après incendie pour épargner la régénération lorsqu'elle s'est produite.

3.1 Pluie de graines de pin d'Alep après incendie

3.1.1 Sites retenus

Dix sept sites ont été retenus pour le suivi de la pluie de graines de pin d'Alep (Cartes en annexe n°3). Sur l'ensemble de ces sites, des placettes temporaires ont été suivies pendant 1 an pour évaluer le nombre de semis apparus, lorsque des graines étaient trouvées en nombre significatif.

- Feux de 98 : Peynier 260 ha (10 sites), Rousset 2 ha (1 site)
- Feux de 99 : Alpilles 1800 ha : (5 sites)

Feux de 2001 : une dizaine de feux des Bouches du Rhône et du Var ont été étudiés. Mais l'année 2001 a été caractérisée par la grande rareté (ou même par endroits l'absence totale) des graines tombant après incendie. Ce phénomène est discuté plus loin. Aucune placette permanente n'a pu être installée pour ces feux. Les comptages de graines ont donné des nombres trop faibles pour être interprétés. Ces feux devront faire l'objet d'un suivi extensif, pour savoir si une régénération de pin a fini par apparaître, c'est à dire si une pluie de graines ultérieure s'est produite, ou une régénération à partir de la banque de graines du sol.

Pour l'étude détaillée de la régénération, les placettes des 5 sites des Alpilles ont été pérennisées (piquets plastiques et repérage GPS) et sont suivis régulièrement (cf. chapitre 3.2).

3.1.2 Protocoles de comptages de graines

Le même protocole a été appliqué à l'ensemble des feux.

Nous ne nous sommes intéressés qu'à des peuplements brûlés adultes, c'est à dire présentant des houppiers bien développés et en pleine capacité reproductive (âges variant de 40 à 80 ans). Nous avons recherché des feux pouvant combiner deux critères :

- la densité du peuplement :
 - peuplement dense,
 - peuplement clairsemé,
 - arbres isolés
- la puissance du feu :
 - feu courant au sol, ne touchant pas les houppiers mais tuant la majorité des arbres,
 - feu fort, atteignant une partie des houppiers,
 - feu violent, détruisant intégralement les houppiers de tous les arbres.

Pour les comptages de graines, des transects sont balisés dans les peuplements incendiés répondant aux critères ci-dessus. Chaque site a de 1 à 4 transects. Les transects ont de 10 à 40 placettes. Le long des transects, des placettes de 1 m² sont installées de façon systématique tous les 5 à 10 m, à l'aide d'un topefil (schéma en annexe n°4). Les points de départ et d'arrivée des transects ainsi que le centre des placettes sont repérés par un piquet PVC enfoncé profondément dans le sol et dépassant d'environ 10 cm, et par GPS (précision métrique). Des petits cairns formés de quelques cailloux cachent le piquet (contre le vandalisme) et facilitent le repérage.

Le comptage des graines (et ultérieurement de semis) se fait à l'aide d'un cadre rigide carré de 1 m de coté (1 m²). Ce cadre est divisé par des cordes tendues sur les montants en 16 cadrats de 25 cm de coté (schéma en annexe). Le cadre est positionné pour que son centre (l'intersection des deux cordes centrales) corresponde au centre de la placette, et que deux de ses cotés soient orientés dans la direction Nord-Sud (orientation à la boussole). Ainsi les mesures sont effectuées strictement sur la même zone d'une fois sur l'autre.

D'autre part, pour étudier la distance de dissémination des graines, trois transects ont été installés perpendiculairement à la limite de peuplements incendiés, dans des zones dénudées, en partant

de l'intérieur du peuplement pour avoir une référence de la pluie de graines maximale. Sur ces transects en limites, le nombre de graines est compté de façon continue sur une quarantaine de mètres par placettes de 1 m² adjacentes. Le début et la fin du transect sont repérés comme les placettes, ainsi que quelques points intermédiaires. Le cadre rigide est déplacé de proche en proche. On mesure donc le nombre de graines ou de semis sur une bande de 1 m de large sur toute la longueur du transect.

Dans les feux de 99, un plan détaillé du peuplement arbre par arbre a été réalisé en notant les dimensions de chaque arbre, pour établir des relations précises entre la densité du peuplement, la proximité des semenciers et la densité de graines au sol.

3.1.3 Résultats du comptage de graines

3.1.3.1 problèmes méthodologiques

Pour obtenir des données parfaitement fiables sur la pluie de graines, il aurait fallu installer des pièges à graines sous les peuplements étudiés (filets fins sur cadres rigides, ou pièges à entonnoir). Mais au vu du nombre très important de placettes à installer en peu de temps, et à suivre pour obtenir des résultats significatifs, cette solution n'était pas réaliste. D'autant que ces installations voyantes doivent être mises en place avec l'accord des propriétaires et avec une surveillance contre le vandalisme. Or le délai de mise en place (dès le lendemain du feu) ne permet pas de telles négociations. Nous avons donc choisi d'installer des placettes de comptage au sol, qui sont moins précises mais ont le mérite d'être très rapides à installer, discrètes, et interchangeables. Etant donné le grand nombre de répétitions, la disparition de quelques placettes ne remet pas en cause la fiabilité de l'ensemble du dispositif. D'autre part le dispositif étant aléatoire, la disparition de toutes les placettes d'un site ne pose pas non plus de problème crucial : on peut réinstaller à l'identique le dispositif sur le site si le nombre de placette est suffisant pour la variabilité du phénomène observé. Cette réinstallation est facilitée par le repérage au GPS qui permet de retrouver les transects avec une précision métrique.

Le premier problème rencontré pour les comptages vient de la fragilité de la liaison entre la semence du pin d'Alep et l'aile qui la porte. Si la plupart des graines arrivent au sol encore ailées, les ailes se séparent très vite de la semence si elles sont remuées par le vent ou l'eau. Ainsi au cours des jours qui suivent le feu, la proportion de graines sans aile s'accroît très vite, ce qui augmente la difficulté des comptages. En effet, la graine est petite (2 à 5 mm) et d'une couleur brun-moucheté qui la rend très mimétique au sol. Les ailes débarrassées de la semence étant très mobiles peuvent se déplacer sur d'assez grandes distances, alors que les graines restent sur place dès leur libération. Dans les grands peuplements homogènes, on peut estimer que les ailes emportées par le vent hors d'un site donné sont remplacées par d'autres venant d'ailleurs. La moyenne des comptages à l'échelle du peuplement reste valide. Dans les petits peuplements, les ailes peuvent avoir été emportées sans être remplacées ; il est alors impossible, si on n'a pas suivi la pluie de graines en continu, de connaître le nombre de graines tombées. De même les ailes peuvent s'accumuler dans des «pièges» naturels :dépressions, restes de végétation dense au sol moins carbonisée faisant office de peigne, partie sous le vent de micro-relief. La répartition des ailes, très concentrée dans des situations particulières, ne reflète pas la dispersion des semences.

Nous avons donc opté pour un comptage journalier des graines sur les sites dans les premiers jours, ce qui permettait de limiter les imprécisions de comptages. Le comptage à différencié :

- 1 - les graines ailées,
- 2 - les semences sans ailes et,
- 3 - les ailes sans semences.

Le nombre retenu est la somme des graines ailées (1) plus la valeur la plus élevée parmi les deux autres : Nombre total de graines par placette = $1 + \text{Max}(2;3)$.

- Si les semences sans ailes sont les plus nombreuses (Nb graines = 1+2), c'est que les ailes qui ont libéré ces semences ont été emportées par le vent hors de la placette. Cette valeur est fiable, et forcément un peu biaisée par défaut, le seul risque étant de n'avoir pas trouvé toutes les graines présentes sur la placette,
- Si les ailes sans semence sont plus nombreuses, (Nb graines = 1+3), on estime qu'un nombre important de semences libérées par ces ailes se sont enfouies et n'ont pas été retrouvées. L'imprécision est plus grande. Si le peuplement est homogène et que le vent n'a pas accumulé des ailes dans des endroits privilégiés, on peut avoir un chiffre proche de la vérité. Dans le cas contraire, les valeurs par placette sont aléatoires, et seule la valeur moyenne pour l'ensemble du peuplement est statistiquement fiable.

Le comptage des graines se fait au départ, tout de suite après le feu, en comptant le nombre de graines ailées bien visibles à la surface du sol ou du tapis de cendre. Puis lorsque des ailes sans semences font leur apparition, on procède à une fouille minutieuse de la litière brûlée et des cendres, cadrat par cadrat dans la placette. Cette opération, outre sa difficulté, est aussi très pénible (voir le chapitre sur les températures au sol).

3.1.3.2 Durée de la pluie de graine

Les graines commencent à tomber dès les premières heures après le passage du feu. Nous avons pu noter dans le feu de Rousset et celui des Alpilles, pour lesquels nous nous sommes rendus sur les lieux avant extinction complète de l'incendie, qu'une pluie de graines avait commencé entre 2 et 4 heures après que les arbres aient été brûlés. Cette chute des premières 24 heures représente entre 5 et 10% du total de la pluie de graines.

L'optimum de la pluie de graine dure environ 48 heures, entre le 2^{ème} et le 4^{ème} jour après le feu. De 60 à 75% des graines tombent au cours de cette période.

La pluie de graines ralentit progressivement pour s'arrêter au bout de 6 à 8 jours après le feu. On peut ensuite observer des chutes de graines très sporadiques, représentant en un mois moins de 5% des graines tombées dans la première semaine.

Cependant, l'observation des cônes dans les arbres montre que toutes les graines n'ont pas été libérées, en particulier celles situées à la base du cône. Un autre phénomène participe à la dispersion des semences : la chute des cônes.

Les petites branches qui ont été presque totalement consommées sont très fragiles et peuvent céder à cause du vent. Les cônes portés par ces branches tombent au sol et libèrent souvent, à cause du choc, un nombre important de graines sur une faible surface. Si le terrain est en pente, ces cônes peuvent rouler et disperser leurs graines sur des surfaces plus importantes. Bien que ce phénomène se produise généralement dans les premiers jours après le feu, il peut libérer des graines restées coincées dans les cônes plusieurs semaines après le feu.

Enfin, à proximité des lisières ou lorsque le feu a épargné des refuges, les écureuils peuvent participer activement à la dispersion des graines pendant plusieurs semaines. Cette dispersion ne représente qu'un faible pourcentage du total mais a l'avantage de libérer des graines qui seraient restées prisonnières des cônes.

La figure n°1 montre la répartition moyenne de la pluie de graines dans le temps pour l'ensemble des placettes qui ont été suivies. Si le nombre de graines tombées varie beaucoup, la forme des courbes est très semblable. Le pic est décalé au maximum d'une journée. Le phénomène semble donc assez constant dans l'espace et dans le temps.

Les graines restées sur l'arbre au-delà d'un mois peuvent tomber ultérieurement sur une longue période. Les chutes très tardives n'ont pu être quantifiées, en raison de la très faible intensité du phénomène : quelques graines au m² par an dans le meilleur des cas, souvent beaucoup moins puisque, sur la majorité des sites, nous n'avons trouvé que quelques graines tardives sur l'ensemble des placettes et pour les 2 ans de suivi. Ces graines tardives proviennent de la base des cônes ouverts par le feu, mais aussi de cônes non matures au moment du feu, qui sont restés fermés ou se sont insuffisamment ouverts pour libérer les graines. Les graines finissent de mûrir à l'abri des cônes qui s'ouvrent plusieurs mois et jusqu'à un an après le feu. Nous avons ainsi pu observer des cônes avec des graines mûres qui s'ouvriraient au cours du printemps de l'année suivant le feu sur des arbres morts. Il faudrait cependant vérifier que ces graines, d'aspect normal, sont viables.

3.1.3.3 Nombre de graines

Le nombre de graines tombées au cours de la première semaine varie entre les sites, mais aussi à l'intérieur des sites. Si on exclut l'année 2000 pour laquelle quasiment aucune graine n'a été observée, ce nombre est considérable. Le tableau n°1 donne les valeurs obtenues sur l'ensemble des sites présentant des peuplements denses ou clairs. Les placettes situées autour d'arbres isolés ne sont pas prises en compte dans ce tableau.

Tableau n°1 : Nombre de graines tombées par m² au cours de la première semaine après le feu
Valeurs pour les 17 sites étudiés

Localisation			Nombre de graines		
Commune		N° site	Moyenne	Minimum	Maximum
Rousset	"le défens"	Site 1	36	14	61
Peynier	Zone n°1	Site 2	64	48	76
		Site 3	65	54	74
		Site 4	119	66	181
		Site 5	170	148	188
	Zone n°2	Site 6	58	51	71
		Site 7	26	9	45
		Site 8	51	38	68
		Site 9	90	71	108
	Zone n°3	Site 10	79	23	189
		Site 11	66	3	148
Mouries	Alpilles	Site 12	80	65	100
		Site 13	100	45	220
		Site 14	75	12	143
		Site 15	29	14	56
		Site 16	63	33	122
		Site 17	116	45	220
Moyenne tous sites confondus			76	43	122

On a une moyenne de 76 graines au m², soit 760 000 graines/ha. On peut noter d'après les minimas que aucune placette n'a été épargnée par la pluie de graines, ce qui signifie que la pluie de graine couvre l'intégralité de la surface. Les maximas dépassent 200 graines/ha sous les peuplements et les arbres les plus fructifères, soit plus de 2 millions de graines/ha.

Le nombre de graines semble s'accroître avec la densité du peuplement jusqu'à une limite à partir de laquelle il diminue. Mais les différences observées ne sont pas statistiquement significatives (tableau et figure n° 2 ci-contre). On ne peut donc pas conclure sur ce point. On note que dans les peuplements peu denses, les houppiers sont très développés et portent des cônes sur toute leur

Figure n°1 : Evolution du nombre de graines ailées et d'ailes en fonction du temps

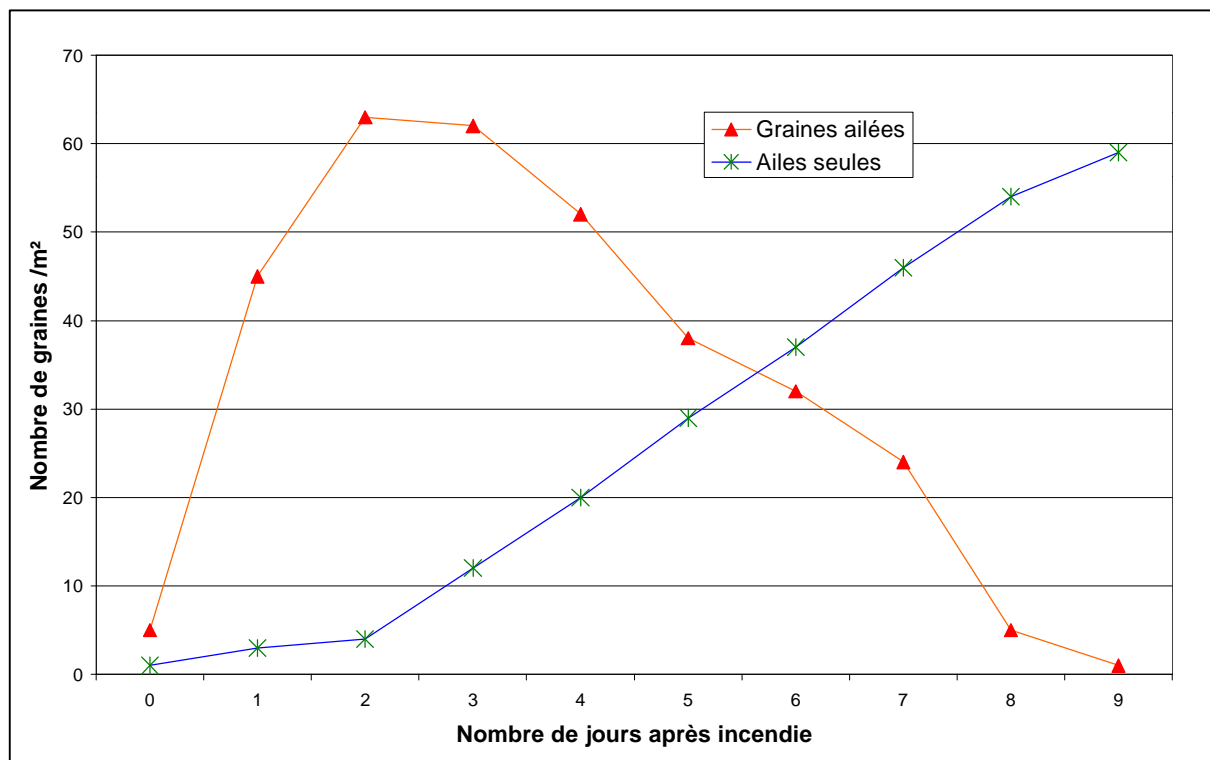


Figure n°2 :

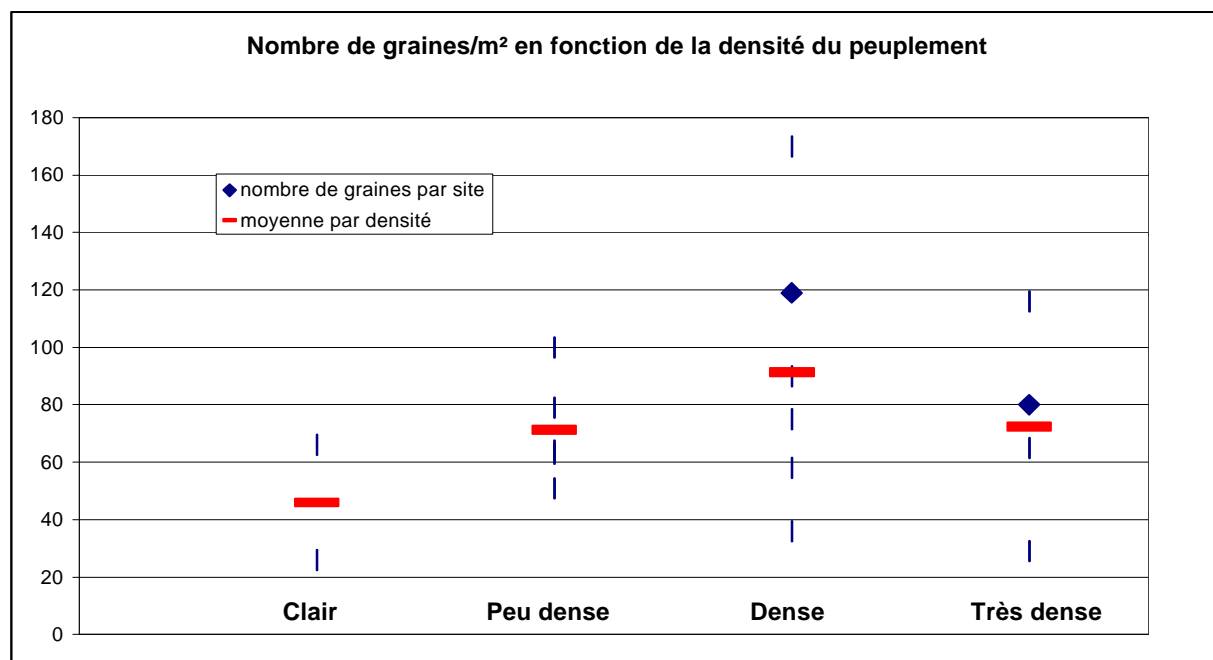


Tableau n°2 : Nombre de graines par m² en fonction de la densité du peuplement

Peuplement clair	46
Peuplement moyen	71
Peuplement dense	91
Peuplement très dense	73

hauteur, ce qui compense la faible densité. Dans les peuplements très denses, les houppiers sont étriqués et ne portent des cônes que dans la partie supérieure.

On peut aussi remarquer que la pente sauf si elle est forte n'a que peu d'importance étant donné le faible poids de la graine par rapport à la poussée exercée par le vent. Le relief a par contre de l'importance par les conditions aérologique qu'il crée.

Le pourcentage de graines ailées diminue beaucoup au cours de l'expérience, montrant qu'un vent fort contribue largement à détacher les ailes.

Le nombre de graine est indépendant de la violence du feu. Les cônes correctement développés résistent aux feux les plus violents. Leurs écailles peuvent être entièrement calcinées à l'extérieur sans que les graines soit touchées. Dans certains cas, nous avons observé que l'extrémité de l'aile des graines situées dans la partie supérieure la plus étroite du cône était brûlée, mais sans conséquence sur la semence, sinon une légère perte de mobilité.

Que les arbres aient été entièrement calcinés par un feu de cime, ou que le feu soit passé rapidement en sous-bois en desséchant les houppiers sans les brûler, les cônes s'ouvrent aussi vite et délivrent autant de graines.

3.1.4 Dissémination des graines

3.1.4.1 Distance de chute

Les observations réalisées pendant la pluie de graines, et sur les transects en limite de peuplement, montrent qu'en absence de vent fort les graines parcourent peu de distance en volant avant de toucher le sol. Une forte proportion des graines (>90%) tombe dans un rayon de 10 m autour de l'arbre mère. Ces résultats attendus confirment les mesures antérieures (figure 2 bis).

En période de vent fort (50-70 km/h), nous avons pu mesurer des distances de dissémination de 10 à 80 m à partir d'arbres isolés et dans un peuplement peu dense. La dissémination des graines a été provoquée artificiellement en frappant des cônes dans le houppier des arbres à l'aide de perches télescopiques et en suivant visuellement la trajectoire des graines. Le nombre de graines dépassant 50 m est faible (probablement <15%). Les phénomènes de turbulence derrière les houppiers sont forts et réduisent en moyenne la distance de dissémination, tout en accroissant la distance de dissémination d'un petit pourcentage de graines emportées plus en altitude par les tourbillons.

Dans un peuplement plus dense, la réduction de la vitesse moyenne, les turbulences et l'interception par les obstacles réduisent sans doute de façon significative la distance moyenne de dissémination par le vent.

3.1.4.2 Déplacements aux sol

Mais un autre phénomène intervient : le déplacement des graines au sol par vent fort. Les ailes offrent une prise au vent suffisante pour permettre ce déplacement. Nous avons observé ces déplacements à chaque comptage de graines par vent fort.

3.1.4.2.1 Protocoles

Nous avons donc étudié le déplacement des graines au sol sur trois transects de 100 m de longueur en limite d'un peuplement peu dense par vent fort (50-70km/h), sur la station n°3 de Peynier. Ces transects différaient par la rugosité du sol :

- ❖ sol "lisse", dans une zone caillouteuse avec peu de végétation herbacée préexistante, et un tapis de cendre assez épais en provenance d'un fort taillis de chêne kermès presque entièrement carbonisé,

- ❖ sol partiellement rugueux, présentant des aspérités naturelles dues à un fort taux de gros cailloux en surface et des restes de végétation semi-herbacée carbonisée, et un tapis de cendre peu épais,
- ❖ sol rugueux, dans un secteur de feu courant peu intense, ayant brûlé superficiellement la litière mais conservé en partie la structure et la porosité de celle-ci, et présentant les restes de la base d'un tapis herbacé faisant un peigne, lâche par endroits et plus denses à d'autres.

En amont de chacun de ces transects par rapport au vent, les graines tombées au sol ont été marquées à la peinture aérosol, dans un secteur à forte densité de graines ($\geq 50/m^2$) sur une bande $5 m^2$ ($1m \times 5m$) disposée perpendiculairement au vent, et protégée du vent pendant quelques minutes le temps du séchage de la peinture (≈ 800 graines). Puis le paravent a été enlevé et le déplacement de graines au sol a été suivi à l'aide d'un topofil tendu au milieu du transect sur lequel des rubans colorés marquaient les distances tous les 5 m. Toutes les 15 mn au départ pendant 1 heure, puis toutes les heures, nous avons relevé le nombre de graines restées dans la bande de départ, et apprécié visuellement le déplacement des graines visibles. Toutes les heures, un parcours du transect a été effectué pour retrouver les graines ou ailes marquées. A la fin de la journée, après environ 6 heures d'expérience, un relevé détaillé du transect a été effectué.

3.1.4.2.2 Difficultés méthodologiques

Le comptage des graines disséminées pose différents problèmes :

- les graines se disséminent sur une grande longueur et se mélangent avec des graines non marquées. Elles sont difficiles à retrouver,
- les graines ne sont marquées que sur une face, et c'est surtout l'aile qui est reconnaissable ce qui divise par 2 le nombre de graines comptables directement dès qu'elle se sont déplacées, les ailes se trouvant le plus souvent à plat et ayant une chance sur 2 de cacher la face marquée,
- de nombreuses graines perdent leur aile en cours d'expérience et celle-ci devient alors très mobile. La position de l'aile ne permet plus, quelque minutes après la séparation avec la semence, de déterminer où la semence a été déposée.
- les graines ne restent pas toujours dans l'axe du transect, les tourbillons de vent pouvant les déplacer latéralement.

Nous avons limité ces difficultés en nous plaçant à la lisière d'un peuplement, ce qui limitait le nombre de graines au-delà de la bande de marquage, le vent ne s'étant levé que le matin de l'expérience. D'autre part le terrain au niveau des transects était parfaitement dégagé, les restes de végétation carbonisée ne gênant pas la vue. Enfin les graines piégées de façon définitive ont été comptées et enlevées au fur et à mesure pour ne pas les perdre par la suite.

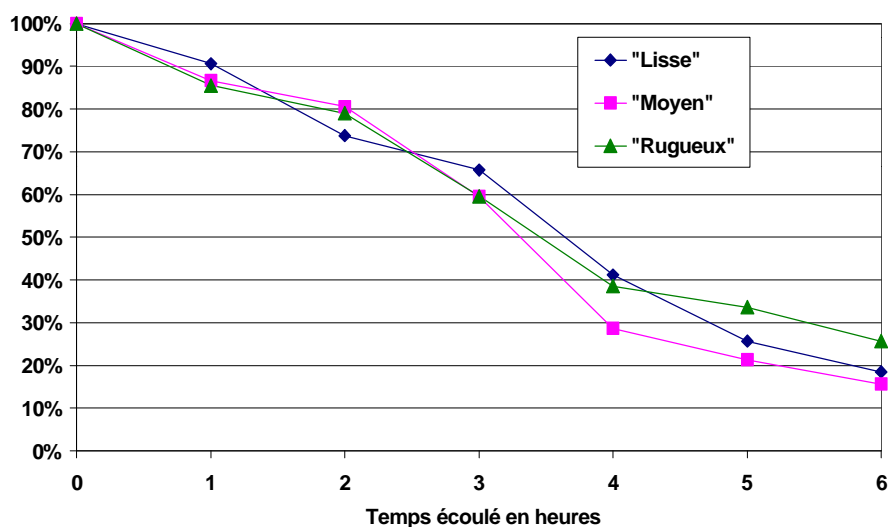
Nous n'avons pas retrouvé, en fin d'expérience, toutes les graines qui avaient quitté la zone de marquage. Certaines ont été repérées avant que l'aile ne s'en détache au cours du suivi horaire, alors qu'elles étaient définitivement bloquées (semence enfoncée dans la litière ou une aspérité ou un trou). Le pourcentage de graines retrouvées varie de 55% pour le transect "rugueux" où les graines n'ont parcouru que de faibles distances, à 32% dans le transect "lisse". Cependant, le grand nombre de graines marquées permet de tirer des premières conclusions qu'il faudrait confirmer par une expérimentation plus contrôlée (notamment en délimitant par des parois basses les limites des transects pour empêcher les graines de se déplacer latéralement, en limitant à 1 ou 2 m la largeur de la bande de marquage, en marquant préalablement des graines sur les deux faces et en accroissant la densité de graines par m^2 dans la bande de comptage initial. Ce nouveau protocole pose d'autres problèmes (interférence des parois avec le vent) mais permettrait de mieux apprécier en continu le déplacement des graines et la distance que des graines peuvent parcourir avant de perdre leur aile.

3.1.4.2.3 Résultats

Certains résultats sont communs aux trois transects.

Figure n°3 : Pourcentage de graines restées sur la bande de marquage en fonction du temps

Environ 80% des graines se sont déplacées hors de la bande de marquage (74-84%). Ces bandes de marquage étaient assez lisses et couvertes de cendres, avec peu d'aspérités. Les courbes de décroissance des graines restées sur la bande de marquage sont très similaires entre les trois transects et traduisent cette homogénéité de départ (voir figure n°3)



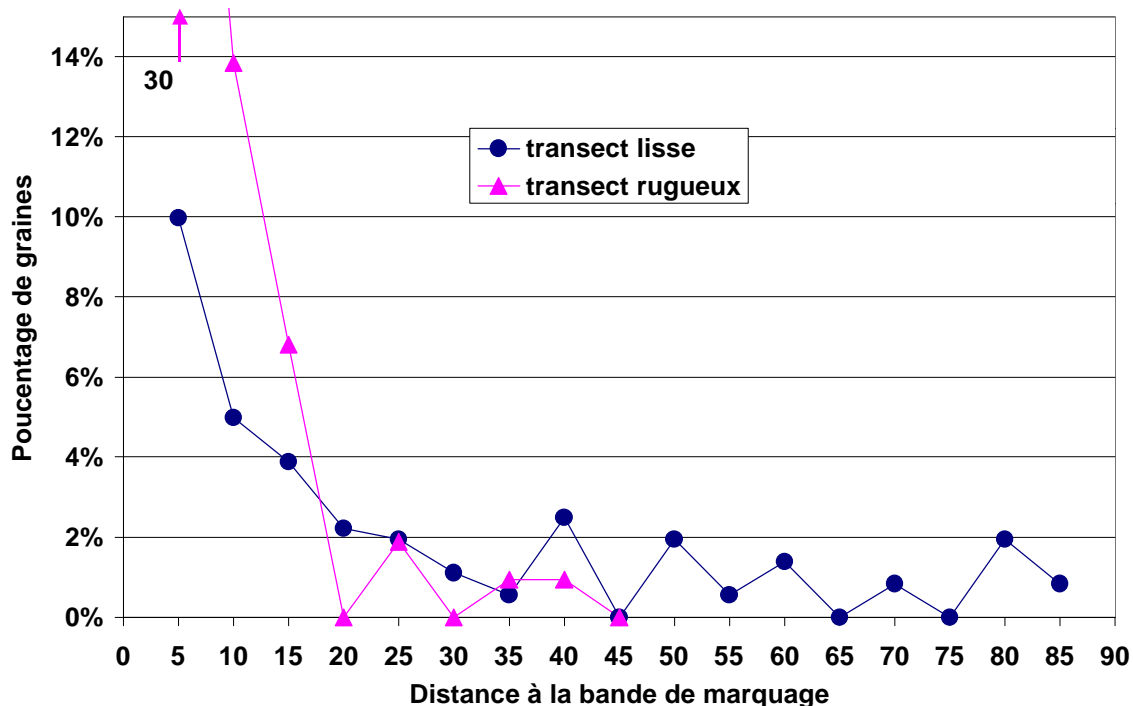
Les graines ailées se déplacent par bonds successifs de quelques centimètres à quelques décimètres de longueur, à l'occasion de rafales de vent, sans s'élever au-dessus du sol de plus de quelques millimètres. La distance qu'elles peuvent parcourir dépend la rugosité du substrat et de la résistance de la liaison entre la semence et l'aile. Les ailes détachées de la semence sont très mobiles et parcourent rapidement des distances beaucoup plus importantes que les graines ailées. Sur les bandes de marquage et sur les transects, une proportion importante de graines (15%) est piégée dans les trous que laisse la combustion des souches mortes. Ces trous de toutes tailles (3 à 30 cm de diamètre) sont plus ou moins profonds suivant l'espèce et de degré de décomposition des souches concernées. Ils peuvent représenter de véritables galeries souterraines de 50 cm à 1 m de long. Dans les secteurs à forte densité de graines, on peut trouver couramment 30 et jusqu'à 50 graines piégées dans un seul trou de souche de 25 cm de diamètre.

Les graines sont aussi arrêtées par les souches, cailloux et rochers dépassant du sol. Mais cet arrêt peut être provisoire en fonction des tourbillons qui les remobilisent.

- Dans le transect de sol lisse, en présence d'un tapis de cendres qui gomme les aspérités du sol, certaines graines parcourent des distances importantes avant de perdre leur aile. On note que le tapis de cendre subit un déplacement très important et permanent, et va s'accumuler dans les dépressions ou sur le flanc sous le vent des micro-reliefs. Les graines peuvent être momentanément enfouies sous une couche protectrice de cendre avant d'être à nouveau dégagées par le vent. Le suivi en continu des graines nous a permis d'observer, sans le quantifier précisément, un transport rapide des graines sur plusieurs dizaines de mètres, et jusqu'au-delà de 80 m. Ces transports à longue distance impliquent en général un ou plusieurs déplacements en volant dans des tourbillons. On ne sait pas localiser les graines non retrouvées à la fin de l'expérience, probablement enfouies dans le tapis de cendre et dans des aspérités. Mais l'observation en continu et la fouille très minutieuse des 10 premiers mètres nous permet de penser que peu de graines nous ont échappé dans cette zone, et qu'elles sont parties au-delà. On trouve par ailleurs à l'extrémité du transect, dans une zone rugueuse (végétation herbacée peu brûlée), des centaines d'ailes sans semence qui se sont accumulées en provenance de l'ensemble du peuplement.

- Dans la zone de sol "rugueux", une part importante des graines est piégée rapidement dans les aspérités du sol, notamment dans la litière là où celle-ci n'a pas été profondément brûlée et conserve une partie de sa structure poreuse. La semence, plus lourde que l'aile et possédant une extrémité assez pointue, se fiche de biais ou verticalement dans l'aspérité et l'aile se trouve plus ou moins relevée, offrant d'autant plus de prise au vent. Le mouvement de rotation et de vibration de l'aile dans le vent détache rapidement l'aile de la semence si celle-ci n'est pas extraite de l'aspérité. Ces mouvements violents de l'aile dans le vent ont par ailleurs pour résultat de favoriser l'enfoncement de la semence dans le trou qui la retient ou dans la couche superficielle tendre du sol, et celle-ci se retrouve alors entièrement enfouie dans le sol au lieu d'être simplement posée en surface. On verra au chapitre 3.2 que ce détail peut avoir de l'importance. Les restes de végétation herbacée dense, brûlée mais pas totalement réduite en cendre, forment les pièges les plus efficaces pour les graines et les ailes, formant de véritables peignes au ras du sol où les graines et les ailes s'accumulent.
- Le transect moyen présente des caractéristiques intermédiaires. Dans ce transect, ce sont surtout les trous liés aux anciennes souches pourries et les aspérités liées à des cailloux émergeant du sol qui ont piégé un grand nombre de graines. Sur la base des observations en cours d'expérience qui se situaient à mi-chemin entre les deux transects extrêmes, nous n'avons pas relevé les graines en fin d'expérience pour mieux traiter les deux extrêmes.

Figure n°4 : Pourcentage de graines retrouvées en fonction de la distance à la bande de marquage.



On voit que la rugosité du substrat a une importance capitale pour la dissémination des graines par le vent.

Cette rugosité dépend de nombreux facteurs :

- ❖ l'irrégularité initiale du sol, et notamment les affleurements de cailloux et roches, le micro relief qui peut être très marqué par endroits, ...
- ❖ la nature et la densité de la végétation initiale, et des souches mortes pourrissantes,

- ❖ l'épaisseur de la couche de cendres lissant la surface du sol, qui dépend de la densité initiale de la végétation.
- ❖ la violence du feu : plus le feu a été violent, moins on trouve de restes de végétation susceptibles de former des obstacles bas à la progression des graines, et plus le tapis de cendre est épais. De plus les feux violents consomment entièrement la litière et même les horizons organiques superficiels du sol, sans conserver la structure poreuse de ces horizons qui deviennent pulvérulents. Les feux violents diminuent donc globalement la rugosité. Par contre les feux violents sont aussi ceux qui provoquent la formation du plus grand nombre de trous par brûlage profond des souches. Ils participent donc à la création de pièges à graines, proportionnellement au nombre de souches mortes et plus ou moins décomposées en place avant le feu.

On peut aussi remarquer que la pente, sauf si elle est forte, n'a que peu d'importance étant donné le faible poids de la graine par rapport à la poussée exercée par le vent. Le relief a par contre de l'importance par les conditions aérologiques qu'il crée.

Le pourcentage de graines ailées diminue beaucoup au cours de l'expérience, montrant qu'un vent fort contribue largement à détacher les ailes. Au delà des transects, on trouve de nombreuses ailes détachées jusqu'à plus de 100 m du peuplement, y compris bien qu'en nombre inférieur après les parties rugueuses : les ailes seules très légères sont mobilisées par le vent et notamment par les tourbillons qui les font facilement voler contrairement aux graines ailées plus lourdes.

3.1.5 Prédation et déplacement par les animaux

Au cours de l'ensemble des mesures sur les graines, nous avons eu l'occasion d'observer (sans aucune quantification) les comportements animaux après le feu.

Nous avons pu remarquer que les feux courants ou peu violents, et les feux passant sur des sols mouillés par des pluies récentes, épargnaient une partie de la faune du sol. Fourmis, araignées, myriapodes, ... reprennent une activité aérienne dès les premières heures après le feu.

Par contre, les feux violents passant sur des sols desséchés en profondeur épargnent très peu d'animaux. Ainsi sur le feu des Alpilles, nous n'avons vu quasiment aucun animal ressortir ou se déplacer dans les heures et les jours qui ont suivi le feu, à l'exception de quelques rares fourmis.

Certaines espèces de fourmis recherchent activement les graines de pin d'Alep après incendie. Nous avons ainsi observé des colonnes de fourmis rentrant des graines dans la fourmilière sur les feux de Peynier, Rousset, Chateauneuf-le-Rouge et des Alpilles. Sur le site n°14 des Alpilles, une seule fourmilière active a été repérée. Elle se situait à la lisière du peuplement dans une zone à forte densité de graines. Bien que les fourmis soient peu nombreuses (au mieux quelques dizaines en surface simultanément), elles avaient trouvé quasiment toutes les graines sur un rayon de plusieurs mètres et les avaient rentré dans leur fourmilière après les avoir débarrassé de leur aile par les mouvements de traînage au sol ou de traction pour les faire pénétrer dans les trous d'entrée trop étroits de la fourmilière. Ce nid de fourmis a disparu au bout de quelques jours, les fourmis étant mortes ou s'étant déplacées faute de nourriture suffisante dans la zone brûlée.

Malgré la prédation, ces fourmis contribuent donc à l'enfouissement direct d'un nombre important de semences qui pourront éventuellement germer si elles ne sont pas stockées trop profondément. En déplaçant les graines ailées, elles participent à l'enfouissement superficiel d'un certain nombre de semences qui sont perdues en cours de route.

Les écureuils venant des lisières non brûlées sont aussi des actifs prédateurs et disséminateurs de graines. Nous les avons observés décortiquant des cônes brûlés, dans les arbres et au sol, participant à la libération de graines de ces cônes, mais mangeant les graines libres au sol, même quand celles-ci sont très nombreuses. Ces graines libres ne rentrent peut-être pas dans les formes habituellement reconnues de nourriture. Cette remarque demande cependant à être vérifiée par des observations plus systématiques et plus nombreuses.

Les oiseaux participent aussi à la prédation sur les graines, mais dans les grands feux, ils sont peu nombreux, et le taux de prédation ne peut être que faible vu l'énorme quantité de graines libérées. Dans les petits feux entourés de milieux naturels, le taux de prédation pourrait être plus fort mais nous n'avons observé qu'un cas (Alpilles site n° 15) où des oiseaux en provenance des limites proches du feu mangeaient des quantités importantes de graines. Nous n'avons pas pu quantifier cette prédation.

3.2 Régénération du pin d'Alep

3.2.1 Dispositif de recherche

La régénération naturelle du pin d'Alep après incendie a été suivie sur les feux de 98 pendant plusieurs mois et sur le feu des Alpilles (99) depuis 2 ans.

Le dispositif de mesure est parfaitement superposé aux placettes de mesure des graines pour pouvoir mettre en relation le nombre de semis avec la densité des graines et les conditions de feu. Dans certains cas, les placettes initiales ont été détruites par des travaux d'exploitation, de débardage et de nettoyage. Elles ont été repositionnées avec précision grâce aux plans détaillés qui avaient été établis et aux positionnements GPS. Dans les zones de faible densité de semis, nous avons parfois réalisé des transects complémentaires sur le même principe que les placettes initiales (une placette tous les 5 m en suivant une direction précise) afin d'avoir des résultats statistiquement plus fiables.

Sur les Alpilles les comptages de semis ont été effectués en novembre et décembre 99, janvier, février, avril, et août 2000, avril et juillet 2001. Une mesure est prévue fin 2001 pour évaluer l'impact de l'été 2001. Des observations sans comptage ont été effectuées régulièrement tous les 2 mois dans les intervalles entre les comptages à partir de l'été 2000 pour s'assurer qu'il n'y avait pas de germinations nouvelles ou de disparition en masse qui aurait justifié un comptage non programmé.

3.2.2 germination

La germination des graines s'étale dans le temps sur plus d'un an, et se produit par vagues successives.

3.2.2.1 Germination précoce

Une levée de semis se produit rapidement en automne après les premières pluies. Les premières graines à germer sont celles qui ont été accumulées dans des petites dépressions formant des flaques après les pluies (traces évidentes d'eau ayant stagné au moins quelques heures ou quelques jours). Ces graines ont bénéficié d'un "trempage" qui a accéléré leur humidification et donc leur germination. Les premiers semis sont ainsi apparus en septembre 1999 dans les Alpilles, soit moins de 2 mois après le feu et moins d'un mois après les premières pluies significatives.

La levée en masse de semis se produit ensuite lorsque le sol a été mouillé de façon prolongée par les pluies d'automne, entre septembre et début novembre, suivant les conditions météorologiques de l'année.

En novembre et décembre les températures trop basses arrêtent la germination.

Nous avons donc effectué un premier comptage sur l'ensemble des sites au mois de novembre de l'année d'incendie.

Les résultats sont donnés dans le tableau n°3.

Toutes les stations sans exceptions ont bénéficié d'une levée de semis, mais ce nombre varie considérablement d'un site à l'autre (1-66). Les minimas et maximas par placette montrent que le semis n'est pas homogène partout.

Les semis germent souvent en masse dans des sites où les graines se sont accumulées : dépressions, trous de souches, zones rugueuses, limites d'obstacles (rochers, branches). Quelques groupes de semis ne semblent pas liés à de telles accumulations par le vent ou l'eau et peuvent provenir du travail des animaux, ou de la chute de cônes ayant déversé un grand nombre de graines sur la zone d'impact. Les groupes de semis peuvent comporter plus de 30 individus sur 1 dm². L'avenir de ces groupes est incertain, la concurrence exagérée affaiblissant l'ensemble des individus.

Dans certains sites, la levée des semis est relativement homogène sur l'ensemble de la surface, avec des variations à l'échelle des placettes (1m²) mais une assez bonne homogénéité à l'échelle de plusieurs m². Dans d'autres sites, la répartition est plus irrégulière, certaines parties du peuplement pouvant être dépourvues de semis sur plusieurs ares tandis que les semis se concentrent sur d'autres secteurs. Nous n'avons pas trouvé d'explication évidente à ces répartitions irrégulières. Elles peuvent être liées aux conditions qui ont régné après le feu, notamment au déplacement des graines par le vent ou l'eau, ou à la prédation par des animaux.

La figure n°5 montre qu'il n'existe pas de relation forte entre le nombre de graines tombées et le nombre de semis apparus. Une tendance est visible, mais elle n'est pas statistiquement significative au seuil de 5% (probabilité = 12% cf. dans tableau n°4 ci-dessous le résultat de la régression avec le logiciel S+)

Tableau n°4 : table de la régression linéaire "nombre de semis = f(nombre de graines)"

	Valeur	Ecart-type	valeur du t	Probabilité
constante	0.3011	9.9502	0.0303	0.9763
pente	0.1918	0.1193	1.6083	0.1286

Le taux de "réussite" du semis par site figure dans les tableaux n° 5 et 6 et la figure n°6.

Les grands nombres de semis ne sont obtenus qu'avec des grands nombres de graines, mais six sites ayant reçu plus de 60 graines/m² ont peu ou très peu de semis. Par ailleurs, le site 15 a vu germer 23 semis/m² pour 29 graines/m² tombées soit un taux de 80%. Globalement, le feu des Alpilles a un taux de réussite supérieur aux autres feux (tableau n°6) mais aussi le plus faible taux sur l'un de ses sites. Le manque de relation entre pluie de graines et semis, le taux élevé de réussite des Alpilles (année différente des autres feux) et le faible taux de réussite dans certains sites permet de s'interroger sur les rôles possibles :

- d'apports de semis par la banque de graine du sol, le site 15 n'ayant pas de caractéristique particulière qui pourraient expliquer le taux élevé de réussite des graines,
- des conditions pluviométriques et thermiques après le feu (cf. chapitre 3.3),
- de la prédation,
- du degré de maturité des graines au moment du feu. Cette variable a cependant peu de chances de différer entre les sites très proches au sein d'un même feu.

Tableau n°3 : Nombre de semis par m²
Valeurs pour les 17 sites étudiés 3-4 mois après le feu (novembre).

Localisation			Nombre de semis		
Commune		N° site	Moyenne	Minimum	Maximum
Rousset	"le défens"	Site 1	3	0	9
Peynier	Zone n°1	Site 2	1	0	3
		Site 3	10	0	35
		Site 4	39	26	48
		Site 5	27	8	87
		Site 6	7	0	11
	Zone n°2	Site 7	4	1	15
		Site 8	6	1	11
		Site 9	2	0	9
		Site 10	1	0	3
	Zone n°3	Site 11	1	0	3
Mouries	Alpilles	Site 12	34	7	61
		Site 13	66	25	110
		Site 14	7	2	23
		Site 15	23	4	35
		Site 16	20	10	49
		Site 17	1	0	7
Moyenne tous sites confondus			15	5	31

Figure n°5 :

Nombre de semis 3 à 4 mois après le feu en fonction du nb de graines

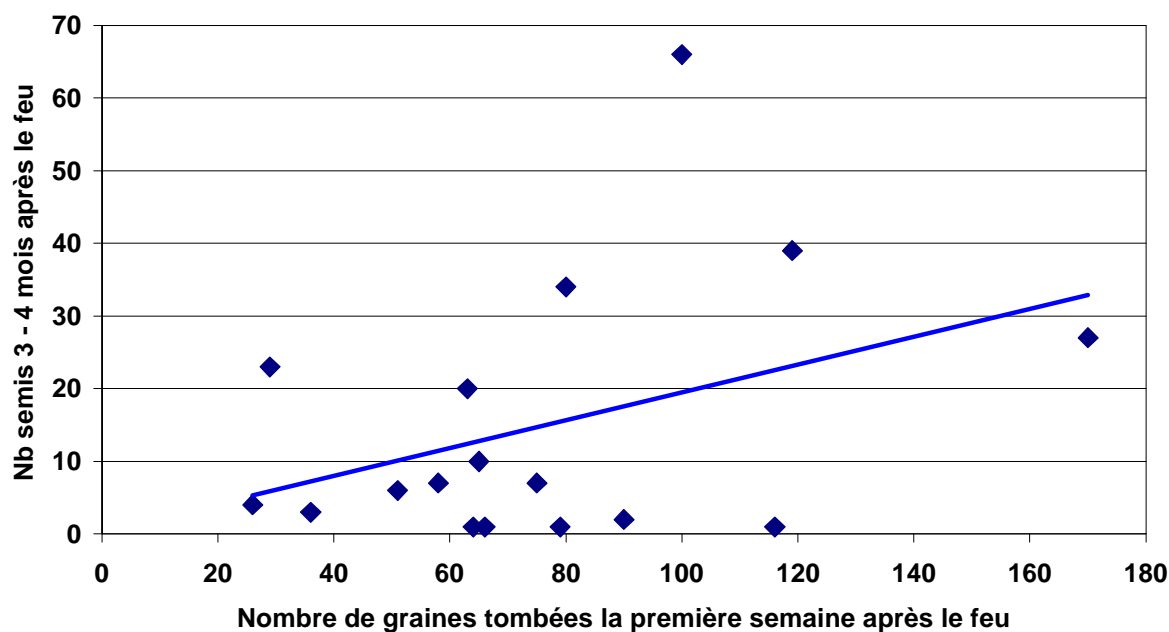
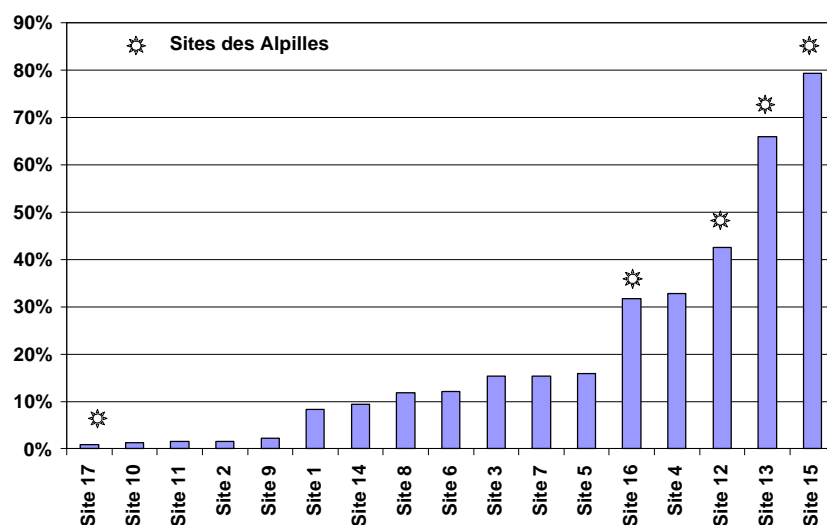


Tableau n°5 : taux apparent de réussite du semis de pin d'Alep 3 - 4 mois après le feu.

Localisation			Nb graines	Nb semis	% germination
Commune	Station	N° site			
Rousset	"le défens"	Site 1	36	3	8.3%
Peynier	Zone n°1	Site 2	64	1	1.6%
		Site 3	65	10	15.4%
		Site 4	119	39	32.8%
		Site 5	170	27	15.9%
		Site 6	58	7	12.1%
	Zone n°2	Site 7	26	4	15.4%
		Site 8	51	6	11.8%
		Site 9	90	2	2.2%
		Site 10	79	1	1.3%
	Zone n°3	Site 11	66	1	1.5%
		Site 12	80	34	42.5%
Mouries	Alpilles	Site 13	100	66	66.0%
		Site 14	75	7	9.3%
		Site 15	29	23	79.3%
		Site 16	63	20	31.7%
		Site 17	116	1	0.9%
		Moyenne tous sites confondus			76

Figure n°6 : taux de réussite de la pluie de graine en fonction des sites



En moyenne, une graine tombée sur 5 donne un semis, mais ce taux varie de 1% à 80% avec tous les intermédiaires.

Tableau n°6 : taux apparent de réussite des graines tombées

Commune	% "réussite"
Rousset	8.3%
<i>Peynier 1</i>	16.4%
<i>Peynier 2</i>	10.4%
<i>Peynier 3</i>	1.4%
<i>Peynier tout</i>	11.0%
Alpilles	38.3%

Si on rapporte le nombre de semis à l'hectare, on obtient dans tous les cas des valeurs suffisantes pour espérer une régénération naturelle satisfaisante, même en admettant un taux de mortalité élevé dans les semis. Les valeurs les plus faibles (de l'ordre d'1 semis/m²), représentent 10 000 semis/ha. La valeur moyenne (15 semis/m² représente 150 000 semis/ha soit beaucoup plus qu'il n'en faut pour assurer la réussite de la régénération, même avec un taux de mortalité de 95% dans les premières années. La survie des semis est commentée au chapitre 3.2.2.3

3.2.2.2 Germination tardive

Nous avons suivi les placettes pendant 2 ans après le feu, les comptages n'étant intervenus que dans les Alpilles. Au cours des comptages, nous avons vu apparaître de nouvelles vagues de germination à plusieurs reprises.

La deuxième se déroule entre le début du printemps (mars-avril) et le début d'été (jusque début août) de l'année suivant le feu. Elle représente en moyenne quelques semis par m², quelques sites n'en ayant vu apparaître aucun. Il est surprenant de voir apparaître des semis en début d'été en pleine chaleur, et pourtant le phénomène a été assez généralisé dans le feu des Alpilles entre début juillet et début août 2000, favorisé il est vrai par quelques pluies éparses.

Peu de semis sont apparus à l'automne n+1. Ils étaient très dispersés, et seuls quelques sites en ont bénéficié.

La troisième vague de germination a été plus importante et s'est déroulée au printemps de l'année n+2, soit un an et demi après le feu. Dans les Alpilles, elle a représenté suivant les sites entre 5 et 50% des semis vivants au comptage d'avril 2001, atteignant régulièrement plus de 5 et parfois plus de 10 nouveaux semis par m². L'apport de ces nouveaux semis est donc important pour la réussite de la régénération, en complétant des endroits d'où la majorité des semis de l'année précédente avaient disparus à cause de l'été très sec ou en l'hiver. Toutefois, cette germination n'atteint jamais le niveau de la première.

Nous n'avons pas observé de germination au début de l'été 2001 dans les Alpilles.

On retiendra que la régénération après incendie d'été se joue en plusieurs phases. La plus importante se déroule à l'automne suivant l'incendie. Mais de nouveaux semis apparaissent pendant plus d'un an. Ces germinations tardives peuvent provenir :

- de graines tombées juste après le feu et restées dormantes dans le sol,
- de la banque de graines du sol, où des semences auraient été stockées avant le feu,
- de graines tombées tardivement des cônes ayant fini leur maturation après l'incendie. Nous avons effectivement observé des cônes s'ouvrant au cours de l'année suivant le feu, même sur des arbres morts depuis l'incendie mais n'avons pas pu vérifier la viabilité de ces graines tardives. Certains arbres restés vivants (houppier en partie détruit) ont pu facilement donner des graines. Ils sont rares sur nos sites d'étude.

3.2.3 Survie et développement des semis

3.2.3.1 Courbes de mortalité

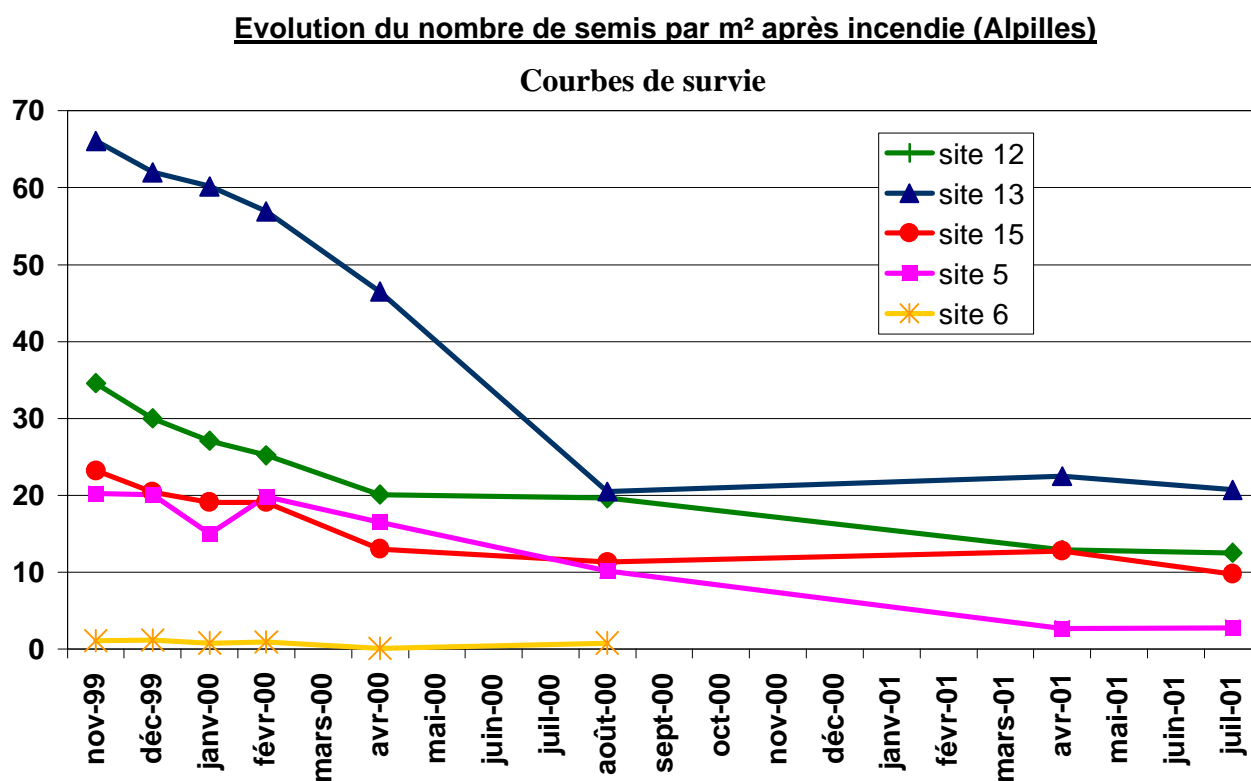
Les comptages nous ont permis de suivre l'évolution du nombre de semis sur les placettes des Alpilles.

La figure n°7 montre le résultat de ces suivis.

On observe une décroissance régulière du nombre de semis dans tous les sites. La mortalité intervient à toutes les saisons, par sécheresse l'été, par gel l'hiver, par abrutissement (pâturage de moutons dans les zones incendiées pour profiter de l'herbe nouvelle).

Sans les germinations tardives au cours de l'été et des deux printemps suivant le feu, certains sites auraient un nombre de semis très réduit par rapport à ce qui est observé en juillet 2001.

Figure n°7 :



En moyenne, le nombre de semis serait largement suffisant 2 ans après le feu pour assurer la régénération, si le pâturage n'est pas intensif, mais ce dernier peut être très destructeur.

3.2.3.2 Croissance en hauteur

La taille des semis varie beaucoup d'un site à l'autre en fonction de la fertilité, et au sein des sites en fonction de leur âge.

Dans les sites fertiles, les semis les plus vigoureux atteignent 20 à 25 cm de hauteur au bout d'un an, la moyenne se situant autour de 15 cm, et 40 à 55 cm à 2 ans, la moyenne se situant autour de 30 cm.

Dans les sites peu fertiles, à sol superficiel et caillouteux, les semis les plus vigoureux atteignent 8 à 12 cm de hauteur au bout d'un an, la moyenne se situant autour de 4 cm, et 12 à 15 cm à 2 ans, la moyenne se situant autour de 8 cm.

On voit que la différence est importante. Simultanément, la végétation est généralement beaucoup plus vigoureuse dans les sites fertiles où les rejets de souche de chênes, phyllaires, asperges, clématites, etc. ... peuvent dépasser 50 cm en 1 an, et où la végétation herbacée peut envahir rapidement le sol, faisant aux semis une redoutable concurrence. Dans les sites pauvres, la végétation reste assez clairsemée au cours des 2 premières années s'il n'y avait pas initialement un taillis dense de chêne chermès.

Dans les touffes denses de semis, la concurrence commence à jouer au bout de quelques mois, et il ne reste généralement que 1/10 des concurrents au bout de 2 ans. Cependant, ces semis serrés sont toujours moins vigoureux que les semis isolés.

Sur l'ensemble des placettes, au bout de deux ans, la concurrence par la végétation adventice et les rejets n'a pas été le facteur déterminant de la mortalité des semis, en dehors des plus faibles. Par contre elle pourrait le devenir dans les années à venir, où seuls les semis les plus vigoureux parviendront à se maintenir au dessus de la concurrence.

3.2.4 Impact des exploitations et broyage.

Le suivi de l'impact des travaux d'exploitation et de nettoyage des parcelles incendiées sur la survie des semis n'était pas prévu dans le projet. Mais la plupart des parcelles où nous avons travaillé ont fait l'objet de tels travaux. Nous en avons donc profité pour réaliser des observations et comptages complémentaires. Deux modalités ont été suivies :

- exploitation et nettoyage au 1^{er} printemps, 8-10 mois après le feu.
- exploitation et nettoyage en hiver ou au 2^{ème} printemps, 17-22 mois après le feu.

Ces travaux sont intervenus sur ou à proximité de tous les sites des Alpilles.

Ils comprennent l'exploitation des arbres morts ou mourants, le débardage des grumes, le broyage total ou partiel des rémanents avec ou sans mise en andains.

La différence entre les deux dates d'exploitation est très significative. Le tableau n°7 ci-dessous résume les résultats de ces comptages qui sont discuté ensuite.

Tableau n° 7 : nombre et taille des semis en fonction de la date des travaux d'exploitation

	Nombre de semis (nb/m ²)		Taille moyenne des semis (cm)	
	initial	après travaux	initiale	après travaux
Témoin non touché	43 (28-62)	34 (21-49)	7 cm	11 cm
Travaux précoces	51 (29-76)	25 (11-37)	9 cm	11 cm
Travaux tardifs	32 (15-40)	0,6 (0,1-1)	21 cm	7 cm

3.2.4.1 Exploitation précoce

L'exploitation au premier printemps sur des semis encore très jeunes et souples ne cause que des dégâts limités, y compris le gyrobroyage en plein des rémanents lorsque le broyeur est réglé assez haut pour que les lames ne touchent pas le sol. La moitié des semis a survécu à ces travaux. Ceux qui sont morts ont été soit étouffés sous la couche de débris végétaux, qui forme par endroits un paillage continu du sol épais de plusieurs centimètres, soit coupés par les lames du broyeur passant trop bas et décapant la superficie du sol, soit écrasés par les engins ou les grumes. Ce broyage détruit une partie des semis mais aussi une bonne partie de la végétation adventice. Le paillage de débris a un effet très bénéfique pour les semis survivants : il limite l'évaporation en période sèche, et limite fortement le développement de la végétation concurrente. C'est ainsi qu'au cours de l'été suivant le feu, et plus de 5 mois après l'exploitation, le sol des parcelles ainsi traitées était encore presque entièrement dépourvu de végétation en dehors des pins. Au bout de 2 ans, la végétation couvrait en moyenne encore que moins de 30% de la surface, le paillage de débris étant encore assez dense et efficace.

3.2.4.2 Exploitation tardive

L'exploitation au cours du deuxième hiver ou du deuxième printemps, avec des techniques identiques, conduit à des dégâts considérables sur les semis. Ceux-ci ont en effet atteint une taille plus importante et une plus grande rigidité. Beaucoup d'entre eux subissent des blessures graves lors de l'exploitation, et ceux qui survivent sont détruits par le broyage, souvent coupés à quelques centimètres du sol. Certains arrivent par la suite à se redresser et à reconstituer leur tige détruite mais la plupart meurent rapidement. Le taux de perte est de plus de 95%. La perte est d'autant plus grave que ce sont les plus vigoureux qui souffrent le plus et sont majoritairement détruits. Dans les 3 parcelles où nous avons fait des comptages, la régénération qui était initialement acquise peut être considérée, après les travaux, comme insuffisante pour assurer le renouvellement complet du peuplement. Sur l'une d'entre elle, il ne reste plus qu'un semis tous les 5 à 10 m², contre 15/m² initialement. Les semis restants sont blessés ou très petits.

Nous concluons donc que si l'exploitation doit intervenir dans les conditions et avec les techniques actuelles, notamment le broyage de rémanents, il est préférable qu'elle intervienne très rapidement après le feu.

L'exploitation mal conduite de certains peuplements peut être une des causes importantes des échecs de régénération.

Mais il paraît aussi possible d'améliorer les techniques d'exploitation pour limiter les dégâts quand l'exploitation doit être tardive, comme cela se pratique dans de nombreuses autres régions sur des régénérations hautes de diverses espèces :

- abattage directionnel orientant les grumes dans le sens du débardage, pour éviter que ces grumes ne décapent de grandes surfaces en tournant lors du débusquage,
- limitation de la circulation des engins lourds dans la parcelle, la qualité de l'abattage favorisant cette mesure,
- gyrobroyage à une hauteur suffisante (20 cm) pour épargner la majorité des semis, et ne couper les plus vigoureux qu'au niveau de la cime, et non au pied. Il est probable que le passage des lames à cette hauteur où la cime des semis est souple leur permettra même d'échapper totalement à la destruction.

3.2.5 Feux de 2001

Nous n'avons pas d'explication certaine à l'absence quasi-totale de graines en 2001 sur l'ensemble du Var occidental et des Bouches du Rhône.

La fructification des pins dépend de 3 années, durée qui sépare la floraison de la maturité des graines. Il peut donc s'agir de phénomènes climatiques ayant agité sur une des phases de la reproduction : la formation des boutons floraux, la fécondation des fleurs (pluies au moment de la dissémination du pollen), le développement des graines (grande chaleur et sécheresse de l'été 2000), ou la maturation des graines (chutes de neige exceptionnelles de fin 2000 et début 2001). Mais ce peut être aussi la conjonction de facteurs climatiques cumulés sur plusieurs années.

Il serait nécessaire de suivre pendant quelques temps (2 automnes et 2 printemps) des zones incendiées en 2001 où des arbres morts sont restés debout pour voir si des graines sont tombées plus tard après avoir fini leur maturation où si l'année était vraiment sans graine. Il y avait de toute façon peu de cônes par rapport aux autres années.

L'étude qui se termine a montré qu'il peut y avoir une banque de graine de pin d'Alep dans le sol, d'une rémanence d'au moins 1 an comme semblent le suggérer les semis apparus au cours des 1^{er} et 2^{ème} printemps dans les placettes des Alpilles. Cette banque de graines pourrait assurer la régénération des parcelles incendiées en 2001, mais il faut s'en assurer en suivant des parcelles où les arbres ont été exploités très rapidement après le feu.

3.3 Mesures de température au sol

Une des causes de l'échec de certaines régénérations, ou de la faible réussite du semis dans certains sites, pourrait être la température excessive qui règne au sol en été après incendie. Cette température excessive n'est pas due à la chaleur rémanente de l'incendie, qui ne joue que quelques heures avant que les graines tombent, mais à l'échauffement par le rayonnement solaire de la couche superficielle de cendres et du sol noirci. Cette température est très élevée puisque nous avons observé qu'elle peut faire fondre des objets plastiques, mais elle n'avait pas été mesurée jusqu'à présent de façon précise et systématique. Suivant les conditions météo post-incendie (vent, pluie) et la date du feu, elles sont susceptibles de se maintenir plusieurs heures par jour, durant plusieurs semaines consécutives, ou même plusieurs mois.

Les mesures de température qui sont données dans ce rapport ont été effectuées fin août - début septembre 2001, à une époque où les températures ambiantes ne sont plus maximales, et où le soleil est déjà redescendu sur l'horizon par rapport à la période fin juin - juillet - début août où se produisent la majorité des feux et où ont été faits nos comptages de graines. Les valeurs données ne peuvent donc être que sous-estimées. Elles seront vérifiées par des répétitions des expériences en 2002.

3.3.1 Technique de mesure

Les mesures sont prises à l'aide de deux sondes thermiques d'une précision de 0,5°C et couvrant la plage -50°C à +70°C. Ces sondes mesurent 1 mm de diamètre sur 1 cm de long. Elles peuvent être positionnées avec précision sur le sol ou en profondeur. Elles sont reliées à un boîtier électronique qui affiche la température courante au niveau de la sonde, les températures minimale et maximale atteintes depuis la dernière réinitialisation (donnant donc l'amplitude de variation), le degré d'humidité et la température de l'air ambiant au niveau du boîtier.

Le temps de mesure (stabilisation au niveau de la sonde), en partant d'une température ambiante de l'ordre de 25 à 30 °C, est de l'ordre de 3 à 5 mn pour les températures entre 45 et 50°C et de 7 à 12 mn pour les températures plus élevées.

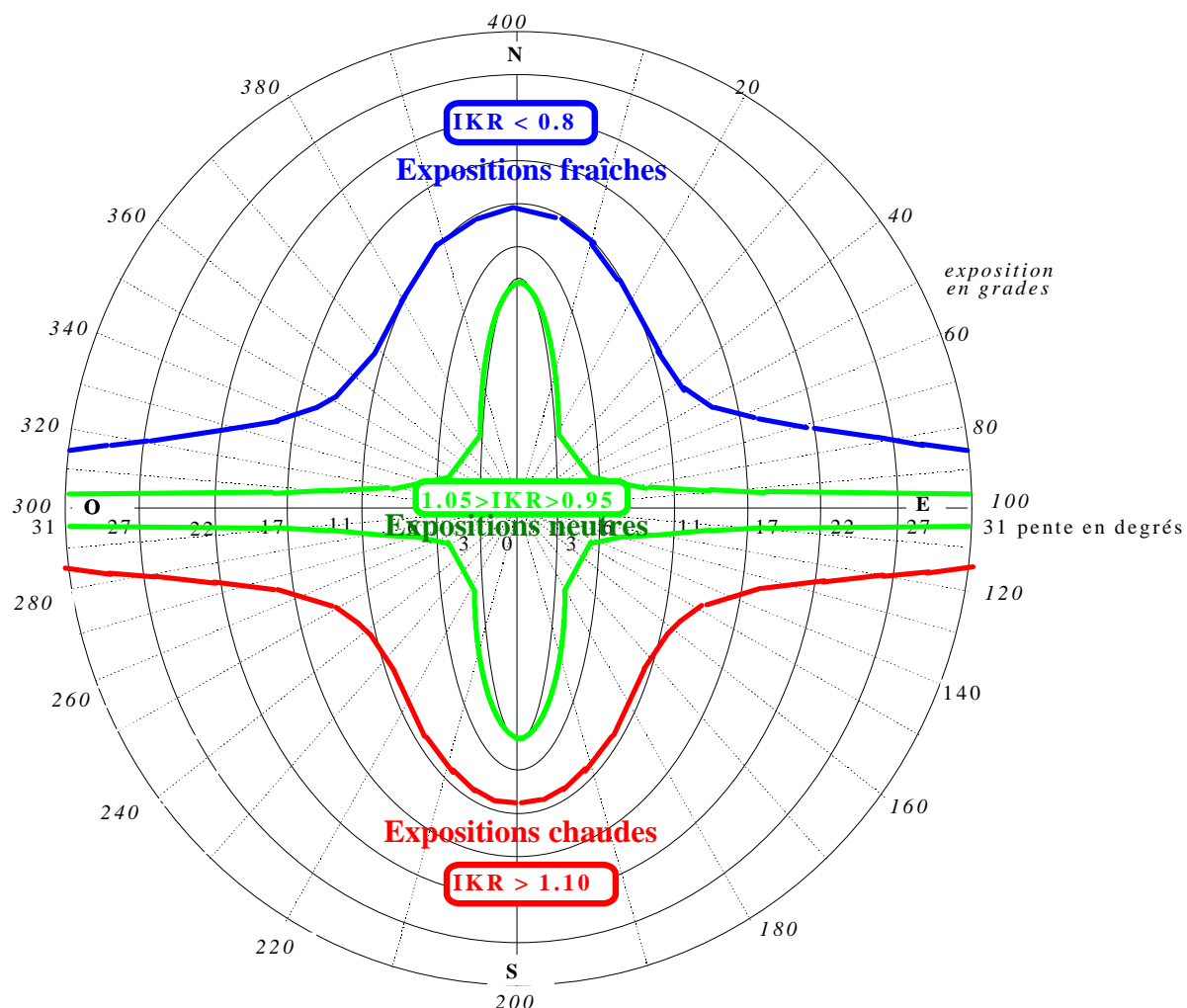
3.3.2 Protocoles de terrain

L'échauffement des couches superficielles étant lié au rayonnement solaire, nous nous sommes intéressés en premier à ce facteur de variation.

L'intensité du rayonnement solaire reçu en un point donné du terrain dépend de l'orientation du plan récepteur par rapport au soleil et de la pente de ce plan. Le soleil changeant de position au cours de la journée, les intensités reçues en un point fixe varient elles aussi.

Ces deux variables orientation et pente peuvent être synthétisées avec l'indice de Becker qui donne au pas annuel l'intensité relative du rayonnement solaire reçu sur une surface donnée par rapport à la même surface de pente nulle. Les pentes exposées au sud reçoivent plus d'énergie que celles exposées au Nord (c'est l'opposition adret-ubac). Les situations horizontales (d'indice de Becker égal à 1 puisqu'elles servent de référence) se situent en fait au-dessus de la moyenne des indices possibles qui vont de 1,32 pour les expositions les plus chaudes (versant plein sud en pente forte recevant perpendiculairement les rayons du soleil à l'équinoxe de printemps) à moins de 0,2 pour les expositions les plus fraîches qui ne reçoivent presque plus aucun rayonnement direct du soleil (versants plein nord en pente très forte). Ces situations horizontales constituent de fait des expositions assez chaudes. Notre protocole a différencié les situations de mesure en premier lieu sur les indices de Becker (cf. figure n°8).

Figure n° 8 : délimitations des classes d'indice de Becker (IKR)



Dans notre protocole, nous nous sommes intéressés aux classes d'IKR franchement chaudes ($IKR > 1.10$) ou fraîches ($IKR < 0.8$), et neutres ($0.95 < IKR < 1.05$) en évitant les situations intermédiaires pour obtenir des résultats tranchés. Les classes intermédiaires peuvent être approchées en faisant la moyenne entre la classe neutre et la classe fraîche ou chaude.

La température a été relevée dans les couches de cendres ou de sol où des graines avaient été trouvées dans les jours et les semaines suivant le feu, au cours des essais de comptage.

Sur les sols compacts et très caillouteux, pour lesquels la litière était très mince, ou sur lesquels la couche de cendre a été emportée par le vent, il est fréquent que les graines se trouvent directement au contact de cailloux noircis.

Le cas où la litière n'a été que superficiellement détruite et où subsiste une certaine structure de litière qui permet aux graines de s'enfouir plus ou moins profondément dans un milieu poreux n'a pas été étudié, car la température de ce substrat ne s'élève pas suffisamment pour être potentiellement létale pour les graines.

Notre protocole a donc pris en compte :

- trois classes de l'indice de Becker, représentant des expositions chaudes, neutres et fraîches.
- la surface et les premiers mm de la couche de cendre (où se retrouvent les graines ailées),
- les premiers cm de cendre (où se retrouvent les semences non-ailées),
- la surface et les petites anfractuosités et craquelures du sol lorsque les cendres sont absentes et que la litière a été détruite,
- la surface du sol au contact de cailloux, sachant que tous les incendies étudiés étaient en zones calcaires,
- différentes intensités de vent.
- la présence ou non d'ombre portée à certains moments de la journée par la végétation résiduelle.

3.3.3 Protocoles de laboratoire

Il était difficile de trouver sur le terrain des conditions idéales pour les mesures. Notamment parce que les différentes classes des variables prises en compte ne sont pas systématiquement présentes. Ensuite parce que le vent qui influence fortement les résultats est irrégulier et plus ou moins imprévisible.

Nous avons donc cherché à reproduire les conditions de terrain en laboratoire, à l'aide de caisses de 0,25 m² remplies de matériaux naturels (sol, pierres, cendres) récoltés sur le terrain et agencés pour reproduire au mieux les conditions de terrain. Ces caisses peuvent être orientées à volonté, comparées deux à deux dans des orientations différentes mais dans des conditions par ailleurs strictement égales, soumises à un vent parfaitement régulier de durée maîtrisée. Il était de plus facile et moins coûteux en déplacements de faire des suivis journaliers de longue durée au laboratoire que sur le terrain où les conditions peuvent changer et obliger à recommencer des essais plusieurs fois.

Nous avons donc testé la méthode dans des conditions de terrain, puis comparé sur le terrain les conditions réelles (sol naturel) avec celles que nous souhaitions utiliser en laboratoire (caisses), puis nous étant assuré que le protocole de laboratoire n'induisait pas de biais important reproduit l'ensemble des essais en laboratoire.

Le protocole de laboratoire comprend les mêmes essais que le terrain, avec des mesures ponctuelles et des suivis journaliers.

3.3.4 Résultats

3.3.4.1 Rôle de l'exposition

L'exposition est le facteur dominant pour le niveau de température. Les pentes exposées au sud atteignent en surface et dans les premiers millimètres de cendre des températures extrêmes à priori incompatibles avec la survie des graines, surtout si elles sont répétées régulièrement.

Le tableau n° 8 donne les résultats obtenus sur le terrain.

Tableau n° 8 : températures extrêmes atteintes à différents niveaux de profondeur et sur différentes surfaces en fonction de l'orientation.

	Type de substrat					
	Couche de cendre			Sol caillouteux noirci		
	Exposition			Exposition		
	Chaude	Neutre	Fraîche	Chaude	Neutre	Fraîche
Surface	68	63	55	65	58	43
2-5 mm	>70	68	52	55	48	43
5-10 mm	63	58	43	46	///	31
25 mm	41	37	32	41	34	24

En sol caillouteux, la température en profondeur dépend beaucoup de la position de la sonde par rapport aux cailloux. Au contact d'un caillou, qui transmet la chaleur de surface, la température peut monter assez haut jusqu'à plusieurs centimètres de profondeur. Sans contact avec les cailloux, la température tombe très vite avec la profondeur, la terre ne transmettant que peu la chaleur.

- ❖ En expositions sud et sud-ouest, les sondes se sont à plusieurs reprises bloquées en clignotant sur leur température maximale (70°C), montrant que cette température était dépassée. Elle peut rester à ces niveaux pendant 3 à 4 heures d'affilée.
- ❖ En exposition sud-est, les maxima sont atteints plus tôt dans la journée mais ne sont jamais aussi élevés (63°C) que pour les expositions précédentes, tout en étant encore au-delà de la limite supportable par la plupart des être vivants. Cette réduction des maxima vient de la forte diminution du rayonnement en exposition sud-est l'après-midi alors que l'échauffement a été limité le matin par la fraîcheur latente du sol emmagasinée la nuit.
- ❖ En expositions fraîches, les températures maximales ne dépassent pas 55°C et se situent le plus souvent autour de 50°C. Lorsque la pente est forte, elles ne dépassent pas 45°C.
- ❖ En exposition neutre (pas de pente), la température peut dépasser 65°C et est souvent au-dessus de 60°C. Bien que recevant moins d'énergie solaire que les expositions sud-est et sud-ouest à certains moments de la journée, les zones sans pentes sont soumises toute la journée en été à un flux élevé de chaleur. La température maximale y est atteinte assez tôt et se maintient longtemps. Seule l'exposition plein sud reçoit en fait une quantité d'énergie très supérieure aux expositions neutres.

Il faut noter que l'exposition joue à des échelles très petites. Des reliefs d'ordre décimétrique à métrique sont suffisants pour induire des différences de température de surface de l'ordre de 10 à 20°C. C'est bien l'énergie solaire reçue très localement qui réchauffe les couches superficielles. Le sol et les cendres ne sont pas de bons conducteurs de chaleur, et ne peuvent donc pas transférer l'énergie reçue localement au-delà de quelques cm en absence de cailloux. C'est pourquoi la surface du sol montre des variations importantes de température à l'échelle décimétrique.

C'est parce que l'exposition joue à cette échelle inférieure au mètre que l'on peut reproduire les essais en laboratoire avec des caisses de petites taille.

Il existe pour l'air ambiant des effets de versants à toutes les échelles, qui peuvent donner des différences de température ambiante en absence de vent : différences qui atteignent habituellement quelques degrés pour des versants d'échelle hectométrique à kilométrique. Mais

ces différences ne sont pas du même ordre de grandeur que les températures de surface du sol (qui montrent des écarts de plusieurs dizaines de degré) et ne peuvent avoir qu'une faible influence sur elles. On peut cependant admettre que la température de l'air ambiant dans le premier mètre au-dessus du sol, qui peut dépasser largement 40°C, participe significativement à l'atteinte de températures très élevées au sol les quelques jours les plus chauds de l'année.

3.3.4.2 Rôles de la profondeur et de la nature du sol

Le tableau n°8 montre que la température est maximale en surface ou à très faible profondeur (5 mm), reste élevée dans le premier centimètre puis décroît très vite au delà du centimètre. Dans les sols caillouteux, ces valeurs sont données pour une position en contact avec un cailloux. Dans la terre, la température décroît plus vite avec la profondeur, les graines enfouies dans plus de ½ cm ne risquant plus rien (températures ne dépassant pas 45° au-delà de 5 mm).

La couche de cendre est très variable en épaisseur, à l'échelle décimétrique, dès le départ et encore plus après un épisode de vent. Cette cendre a un rôle négatif en faible épaisseur en provoquant les températures les plus extrêmes de la surface à quelques millimètres de profondeur, et au contraire un rôle isolant protecteur dès qu'elle est en plus grande épaisseur.

Il faut rapporter ces températures à la position des graines qui tombent au sol. Tant qu'elles sont ailées, et en absence de vent, elles restent en surface ou dans les premiers mm de cendre. En absence d'ombrage, elles sont alors soumises à des températures rapidement létales. Au cours du temps, avec le vent, elles peuvent être enfouies dans quelques millimètres à quelques centimètres de cendres. On verra au 3.3.4.3 que le vent diminue la température dès qu'il souffle. Mais il peut y avoir des périodes de calme après les coups de vent, les graines enfouies à moins d'un centimètres restant soumises à des températures potentiellement létales à moyen terme.

Sur les sols durs et caillouteux, noircis par le feu et par une mince couche de cendre qui est rarement absente, les graines ne peuvent pas s'enfouir et restent très longtemps soumises à des températures extrêmes en surface ou sub-surface.

Sur les humus incomplètement brûlés, la température de surface et des premiers millimètres a les mêmes valeurs que dans la cendre, mais les graines remuées par le vent peuvent facilement trouver des passages pour s'enfouir plus profondément dans la structure poreuse du substrat (cf. paragraphe 3.1.4.2.3). La température descend très vite avec la profondeur dans ce milieu poreux qui transmet mal la chaleur. Mais il est difficile de la mesurer, le positionnement de la sonde détruisant localement la structure du matériau.

3.3.4.3 Rôle du vent

Le vent abaisse très sensiblement la température de surface et en profondeur du sol (tableau n°9). Il agit de plusieurs façons :

- par le renouvellement permanent de la couche d'air chaud qui se forme au contact de la surface du sol,
- par le renouvellement de la couche de cendre superficielle. Ce mouvement des cendres est permanent : une sonde positionnée à quelques millimètres de profondeur dans une couche de cendre est généralement découverte en moins d'une minute par vent moyen. Ce mouvement empêche une couche superficielle de chauffer, les cendres brassées par l'air étant constamment refroidies,
- par évaporation de l'humidité du sol lorsqu'il y en a, cette évaporation consommant de l'énergie thermique,
- dans la zone d'étude, le vent dominant est le mistral dont la température est inférieure, même en été, à la température locale.

Tableau n°9 : Abaissement de la température lié au vent. Essais de terrain et de laboratoire.

		Type de substrat							
		Couche de cendre				Sol caillouteux noirci			
		Sans vent		Avec vent		Sans vent		Avec vent	
		Exposition		Exposition		Exposition		Exposition	
		Chaude	Neutre	Chaude	Neutre	Chaude	Neutre	Chaude	Neutre
Profondeur	Surface	68	61	46	43	63	57	54	43
	2-5 mm	68	66	45	40	56	46	49	43
	5-10 mm	60	57	40	36	44	///	38	31
	25 mm	44	37	///	///	40	34	27	24

Les résultats des essais sur le terrain et en laboratoire concordent sur l'effet d'un vent fort qui abaisse la température superficielle de plus de 20°C pour les extrêmes et de 5 à 10°C pour les températures plus modérées au départ. La diminution est plus importante sur les couches de cendre, sans doute à cause du brassage continu de la couche superficielle de cendres, alors que pour les sols durs et caillouteux noircis, la couche superficielle accumule la chaleur même si elle est refroidie par le vent.

Les températures obtenues en laboratoire en absence de vent sont très proches de celles obtenues sur le terrain ce qui valide la démarche expérimentale.

Ces expériences demandent cependant à être précisées et confirmées par des répétitions plus nombreuses (2 à 5 répétitions actuellement par modalité), réalisées en plein été (résultats actuels de fin été) avec des thermomètres permettant de dépasser 70°C, et avec un vent de vitesse parfaitement contrôlé.

Ainsi, le vent qui est un facteur de dissémination des graines a aussi un effet bénéfique sur leur survie potentielle.

3.3.4.4 Rôle de l'ombrage

Les peuplements ne sont pas forcément entièrement détruits au cours d'un incendie. Certains feux courants préservent un pourcentage important des arbres. L'abri partiel procuré par ces arbres rémanents permet d'atténuer fortement la température au sol, ou de limiter l'échauffement extrême à des périodes beaucoup plus courtes. Même si les arbres sont tous morts, lorsque le feu n'est pas passé en cime, les aiguilles de pins tombent progressivement sur le sol. Avant leur chute, qui dure de 1 à 3 semaines, les houppiers procurent au sol un abri relatif. Les feuilles de chêne séchées par un feu courant peuvent rester sur les branches beaucoup plus longtemps.

Lorsque les aiguilles tombent en masse dans les peuplements denses, elles peuvent former au sol un paillage qui limite l'élévation de la température.

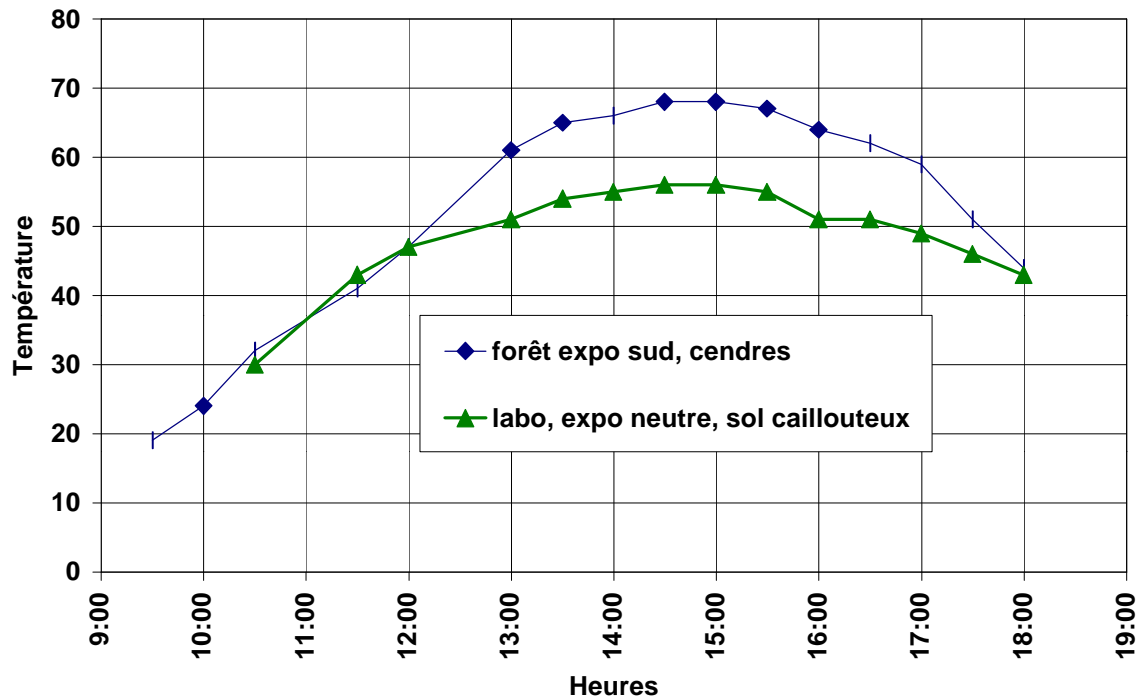
Nous avons noté que l'abaissement de température en surface du sol était très rapide lors du passage à l'ombre : pertes de 15 à 20°C en quelques minutes pour les températures les plus élevées, ce qui confirme le rôle primordial du rayonnement solaire direct. Nous n'avons cependant pas mis en place de dispositif systématique pour préciser ces résultats.

3.3.4.5 Courbes journalières

En absence de vent, des températures très élevées peuvent être atteintes dès la fin de la matinée dans les expositions chaudes. Les maxima sont atteints dès le début d'après midi et se

maintiennent plusieurs heures (figure n°9). La température tombe progressivement 2 heures avant le coucher du soleil en exposition sud, plus tard en exposition ouest qui est soumise au soleil couchant. Mais une température assez élevée peut se maintenir plus longtemps sur les sols caillouteux qui ont accumulé une grande quantité de chaleur en profondeur.

Figure n°9 : courbes représentatives enregistrées sur le terrain et en laboratoire.



La chute plus brutale de température sur le terrain s'explique à la fois par la nature cendreuse du substrat, qui conserve moins la chaleur que les cailloux, et d'autre part par le vent, qui tout en étant faible n'est jamais nul en forêt.

Pour les expositions chaudes, les maxima sont atteints un peu plus tôt en exposition sud-est, bénéficiant du soleil du matin, mais ne sont jamais aussi élevés qu'en exposition sud ou sud-est (maxima 63°C). En effet, le réchauffement par le soleil intervient plus tôt au sud-est mais est freiné par la fraîcheur accumulée dans la nuit et les températures clémentes de l'air ambiant le matin.

Les expositions sud et sud-ouest sont équivalentes pour les maxima (>70°C), ceux-ci étant atteints un peu plus tôt en exposition sud, où la température commence à chuter un peu plus tôt qu'en exposition sud-ouest. Ceci est logiquement corrélé à la course du soleil dans le ciel.

3.4 Conclusion

Notre étude a permis de préciser différents aspects de la régénération du pin d'Alep après incendie, et de rechercher les causes possibles des échecs observés de temps en temps.

Parmi ces facteurs d'échec, quatre peuvent être soulignés :

- l'exploitation des parcelles à des époques ou avec des techniques inappropriées, pouvant aboutir à la disparition de plus de 95% des semis,
- les températures extrêmes atteintes à la surface du sol et dans la couche superficielle de cendres, qui peuvent dépasser 60 et même 70°C pendant plusieurs heures par jour et plusieurs mois d'affilée, et qui sont donc susceptibles de tuer les graines au sol.
- l'absence de graines mûres au moment de l'incendie, interdisant la régénération immédiate derrière le feu.
- Le passage de troupeaux sur les jeunes régénérations peut aussi être très destructeur.

On remarquera que les températures extrêmes et prolongées peuvent avoir une influence sur les semences de nombreuses espèces, et pas seulement celles du pin d'Alep. La réponse de la végétation à la pluie de graines venant de l'extérieur de la zone incendiée et se déposant à la surface du sol, au cours des mois suivant l'incendie, doit tenir compte de ces conditions.

Ces températures peuvent influencer aussi sur la survie des semis précoces issus de la banque de graines du sol.

Des travaux complémentaires sont nécessaires pour approfondir plusieurs voies de recherche qui sont prometteuses et méritent d'être poursuivies, notamment l'étude des températures pour laquelle les expériences n'ont pu être répétées un nombre suffisant de fois, et le suivi des parcelles incendiées en 2001, pour lesquelles l'absence de graines tombées juste derrière le feu pourrait donner des renseignements intéressants sur la banque de graines du sol et la capacité des graines à terminer leur maturation sur des arbres morts.

L'impact des températures extrêmes répétées et prolongées sur la viabilité des graines n'a pu être testé. Cette expérience pourrait être conduite en laboratoire après complément de relevé de températures sur le terrain et en laboratoire, pour appliquer à ces graines de conditions journalières correspondant à la réalité. On pourrait aussi tester en laboratoire les limites de température, de durée journalière et de nombre de répétition des extrêmes conduisant à la mortalité des graines. Ces essais n'ont pu être conduits en 2001 faute de graines.

4 Bibliographie

Ce projet a fait l'objet d'une étude bibliographique très étendue (plusieurs centaines de références), qui est annexée au rapport, et à laquelle on pourra se référer.

S'ajoutent à ces références la thèse de Véronique Bonnet réalisée pour ce programme de recherche.

BONNET Véronique, 2001. Analyse spatiale et fonctionnelle de la réponse des communautés végétales après incendie en basse Provence calcaire. Thèse de doctorat. IMEP , Université de droit, d'Economie et de Sciences d'Aix Marseille III. 197p.