

Régénérer efficacement les peuplements de pin : des travaux souvent indispensables !

L'exemple des peuplements à pin d'Alep en zone méditerranéenne

par Bernard PRÉVOSTO, Louis AMANDIER, Thierry QUESNEY,
Gautier de BOISGELIN et Christian RIPERT

La régénération naturelle est souvent une phase critique de la vie des peuplements forestiers, notamment pour les peuplements anciens et les espèces pionnières. C'est ainsi le cas des vieilles pinèdes à pin d'Alep en zone méditerranéenne.

Dans cet article, les auteurs testent l'impact de diverses perturbations de la végétation et du sol qui peuvent influencer sur cette régénération.

Cette étude montre l'importance des travaux sylvicoles pour le renouvellement des peuplements.

Régénérer les peuplements : une phase délicate

La régénération naturelle d'un peuplement consiste à remplacer – plus ou moins rapidement – les individus âgés par des cohortes d'arbres plus jeunes. Il s'agit d'une phase clé dans la vie du peuplement, qui va déterminer sur le long terme sa composition et sa structure. Le forestier est souvent désireux d'obtenir une régénération qui soit suffisamment abondante. En effet, le stock initial de plantules sera soumis au cours du temps à des mortalités plus ou moins élevées liées à diverses perturbations ou aléas (attaques de pathogènes, prédation, mortalité suite à des sécheresses par exemple) et à la concurrence intraspécifique. Il faut donc que ce stock soit suffisant pour assurer au minimum la pérennité du couvert forestier. Obtenir une régénération la plus abondante possible est même souvent un objectif affiché. Sur un plan sylvicole d'abord, pour permettre au forestier d'assurer à la fois des récoltes et d'opérer une sélection des individus qui lui semblent le mieux correspondre à ses objectifs. Sur un plan génétique ensuite, car une forte densité de semis représente une multitude de génomes sou-

mise à la sélection naturelle ce qui favorise à terme l'adaptation du peuplement à de nouvelles conditions environnementales (LEFEVRE et COLIN, 2008).

Cependant, l'obtention d'une régénération est loin d'être une opération évidente : c'est notamment le cas lors du renouvellement des pinèdes âgées. Les pins (pin sylvestre, pin noir, pin d'Alep) sont des espèces pionnières, héliophiles, particulièrement aptes à coloniser les zones perturbées, mais dont la régénération sous leur propre couvert peut être problématique. Par exemple, en région Centre, la régénération du pin dans les peuplements mélangés de pin sylvestre et chêne sessile est difficile (GAUDIO 2010). C'est également le cas des peuplements de pin sylvestre dans le Massif Central (NGUYEN et LAFFONT, 2001). En région méditerranéenne aussi, on observe souvent une insuffisance de semis dans les pinèdes matures de pin d'Alep. Cette difficulté de régénération naturelle est attribuée à plusieurs facteurs sans que l'on puisse exactement déterminer leur poids respectif : éclairciment insuffisant sous couvert, obstacle de la litière, prédation, processus allélopathiques... Parmi ceux-ci, la végétation du sous-bois peut constituer un obstacle majeur, qui peut être physique et/ou fonctionnel, à l'installation d'une régénération (on parle encore de végétation « interférente »). C'est le cas des végétations herbacées, en particulier les graminées, souvent très compétitrices sur une large gamme de stations depuis les milieux humides (avec l'exemple de la molinie) jusqu'aux milieux secs (avec l'exemple de différents types de brachypode). C'est aussi le cas de certaines fougères (telle la fougère aigle), de plantes ligneuses ou semi-ligneuses (ronce, callune, myrtille, genêts, etc.) (FROCHOT *et al.*, 2002). Afin de lever ces obstacles, des perturbations du milieu sont nécessaires. Certaines sont non voulues et non contrôlées (chablis, incendie...) avec parfois des conséquences catastrophiques ; d'autres peuvent être mises en œuvre de façon raisonnée par le gestionnaire (coupes, travaux du sol, interventions sur la végétation).

Nous avons voulu tester l'impact de diverses perturbations pouvant être mises en œuvre en gestion forestière, sur la régénération de pinèdes âgées à pin d'Alep en zone méditerranéenne. Pour réaliser cet objectif, des travaux de différentes natures ont été réalisés dans trois peuplements ayant subi une coupe de régénération et disposés selon un gradient de fertilité stationnelle. Le suivi

de la régénération du pin a été effectué sur plusieurs années dans chaque peuplement. Nous avons cherché à déterminer quels sont les travaux les plus favorables au recrutement des semis et quels obstacles à leur installation ils permettent de lever.

Des dispositifs expérimentaux de terrain

Trois pinèdes représentatives des conditions de milieux

Les expérimentations sur le terrain ont été conduites dans des peuplements âgés de pin d'Alep. Ce pin, dominant en zone méso-méditerranéenne, présente des traits écologiques similaires à ceux du pin sylvestre ou du pin noir (présents dans l'arrière-pays méditerranéen). Il est exigeant en lumière, frugal, il possède une plasticité édaphique large : il est le plus répandu sur sols calcaires, mais il se trouve aussi sur sols acides (à la périphérie du Massif des Maures). Comme les autres pins, c'est un colonisateur efficace des milieux qui ont été soustraits au cours des dernières décennies à l'utilisation agricole : on estime son expansion de 130 000 ha au début des années cinquante (PARDÉ, 1957) à 240 000 ha environ actuellement (MAP, 2000). Il se différencie du pin noir et du pin sylvestre par la présence de cônes sérotineux en plus de cônes « normaux ». Les cônes sérotineux sont des cônes fermés, qui ne s'ouvrent et ne libèrent leurs graines qu'après avoir été soumis à la chaleur liée au passage d'un incendie, permettant ainsi à l'espèce de se régénérer massivement alors que le peuplement est détruit. En revanche, en l'absence d'incendie, les cônes sérotineux ne jouent aucun rôle dans la régénération. Nous avons sélectionné trois pinèdes représentatives des peuplements et conditions de milieu habituellement rencontrés en Provence calcaire : une pinède à buis et romarin sur sol superficiel, une pinède à chêne kermès sur sol moyennement épais et une pinède avec chêne pubescent sur sol plus profond. Les sites expérimentaux sont ainsi disposés selon un gradient croissant de fertilité.

Le premier site se situe dans la forêt communale de Barbentane (5 km au sud d'Avignon, altitude 105 m) dans une pinède de 90-100 ans présentant une strate arbus-

tive bien développée de buis, romarin, chêne vert, chêne kermès et une strate herbacée de brachypode rameux (Cf. Fig. 1). Le climat est typique de l'étage méso-méditerranéen avec une pluviométrie annuelle moyenne de 673 mm et une température annuelle moyenne de 14°C. Les sols sont carbonatés dès la surface, peu épais avec une forte pierrosité.

Le second site se situe sur la commune de Saint-Cannat (50 km au sud-est d'Avignon, altitude 245 m) dans la forêt privée des Barons. La pinède de 60-90 ans présente une strate arbustive avec un fort recouvrement de chêne kermès, ainsi qu'une strate herbacée moins abondante. Le climat est similaire au précédent. Les sols sont également carbonatés mais plus épais (environ 30 cm) et cette zone a autrefois été cultivée, ce qui confère à ce site une fertilité plus élevée que celle du site précédent.

Enfin, le dernier site est localisé dans la forêt communale indivise de Vaison-la-Romaine et Séguret (ci-après Vaison) dans une pinède de 70-90 ans présentant surtout du chêne pubescent, mais aussi du chêne vert en sous-étage et du brachypode de Phénicie dans la strate herbacée. De par sa localisation (à 40 km au nord d'Avignon, altitude 300 m), le climat est plus humide (pluviométrie de 761 mm/an) et moins chaud (température moyenne annuelle de 12,3°C). Les sols développés sur calcaire sont aussi plus épais (30-50 cm). Il s'agit du site présentant la meilleure fertilité. Les expérimentations ont été conduites par l'Irstea¹ pour le site de Barbentane, le CRPF² pour le site de Saint-Cannat et l'ONF³ pour le site de Vaison.

Les traitements des peuplements : coupe de régénération et travaux

Les peuplements ont été soumis à une coupe de régénération : enlèvement du sous-étage quand il était présent, éclaircie dans la strate de pin et évacuation des arbres. La coupe a eu lieu en 1991 pour Saint-Cannat, 2002 pour Vaison et 2003 pour Barbentane. La surface terrière restante se situait entre 9 et 12 m²/ha (Cf. Tab. I). Les rémanents, constitués par les branches des pins pour l'essentiel, ont simplement été laissés sur le parterre de la coupe pour Saint-Cannat, alors que pour les deux autres sites ils ont été, soit évacués, soit laissés sur place selon les traitements.

Les traitements expérimentaux de la végétation et du sol ont été les suivants :

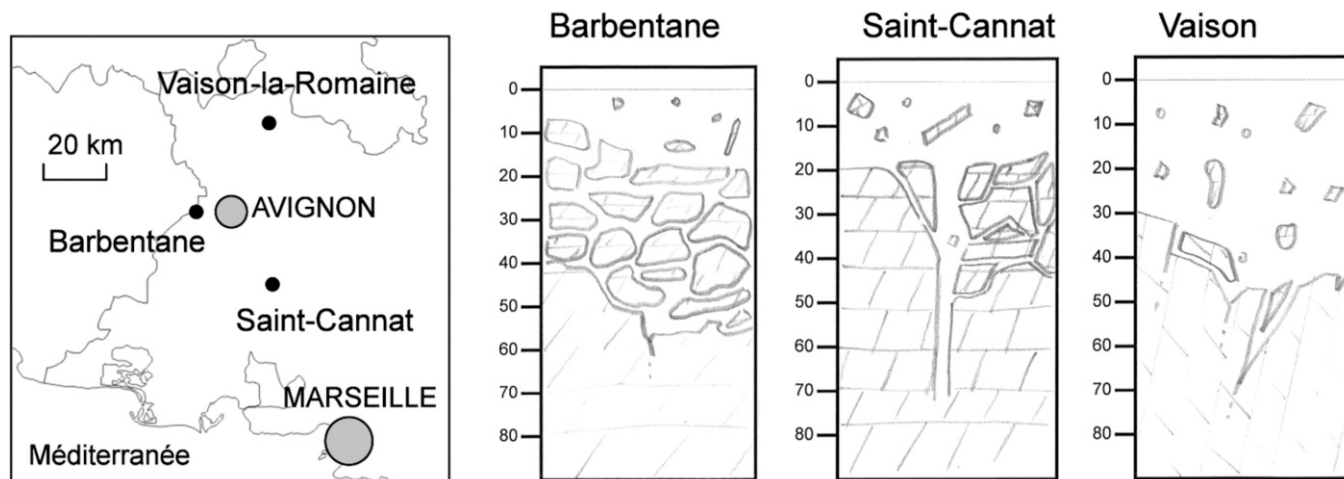
- broyage mécanique de la végétation avec les rémanents sur tous les sites ;
- broyage suivi d'un crochelage superficiel simple du sol avec les rémanents sur tous les sites ;
- broyage suivi d'un crochelage superficiel simple du sol après évacuation des rémanents pour les sites de Barbentane et Vaison ;
- broyage suivi d'un crochelage superficiel double du sol (selon deux directions perpendiculaires) avec les rémanents, sites de Barbentane et Vaison ;
- brûlage dirigé de faible intensité avec peu ou sans rémanents, sites de Saint-Cannat et Barbentane. La végétation a été brûlée sur place par une équipe spécialisée de l'ONF. Le brûlage dirigé est utilisé en

1 - Irstea : Institut national de recherche en sciences et technologies pour l'environnement et l'agriculture (ex Cemagref)

2 - CRPF : Centre régional de la propriété forestière

3 - ONF : Office national des forêts

Fig. 1 :
Carte schématique de positionnement des trois sites expérimentaux et schémas des profils moyens des sols sur substrat calcaire.



forêt méditerranéenne pour réduire la masse de combustible formée par le sous-bois sans causer de dégâts aux gros arbres. A notre connaissance, il s'agit de la première fois qu'on teste cette technique pour étudier son impact sur la régénération ;

– brûlage dirigé de forte intensité avec rémanents. La présence d'une couche de rémanents sur la surface du sol a permis au feu d'être plus intense. Contrairement au brûlage précédent, où la surface à traiter n'a été que partiellement brûlée, la combustion de la végétation au sol et de la litière a été totale. Ce traitement n'a été appliqué que sur le site de Barbentane ;

– témoin sur tous les sites : aucun travaux après la coupe, les rémanents sont absents ou en faible quantité.

Pour chaque site, les traitements ont été appliqués dans l'année suivant la coupe et ont été répliqués dans 4 blocs distincts. La surface élémentaire d'application du traitement variait de 200 à 2000 m² selon les sites (Cf. Tab. I).

Le coût des travaux (en dehors de cette expérimentation qui présente des conditions très spécifiques) est bien sûr variable selon les conditions d'accès aux sites, les surfaces traitées, la topographie. On peut néanmoins avancer les estimations suivantes (source ONF Méditerranée) : broyage en plein 1200

à 1800 euros/ha, crochitage superficiel du sol 700 à 1200 euros/ha et brûlage dirigé 1000 à 1500 euros/ha, mais certains chantiers peuvent dépasser 2000 euros/ha.

Un inventaire de la régénération et des conditions de surface sur plusieurs années

Dans chaque site, plusieurs centaines de quadrats de 1 m² permanents ont été disposés le long de transects installés dans tous les traitements. Sur ces quadrats et à différentes dates, le nombre de semis de pin a été déterminé et les recouvrements en sol nu, herbacées, ligneux bas (buissons), mousse, litière, cailloux estimés visuellement en classes : 1= présent ; 2 ≤ 5 % ; 3 = [5-25%] ; 4 = [25-50%] ; 5 = [50-75%] et 6 = [75-100%]. Les comptages ont été faits en fin de saison de végétation, des années 1 à 6 après la fin des travaux à Barbentane, aux années 1, 3, 9 et 16 à Saint-Cannat et aux années 1, 2, 3 et 6 à Vaison.

La régénération est plus abondante quand il y a eu une scarification du sol ou un brûlage dirigé intense

La densité des plantules varie avec le temps et le type de traitement du sol et de la végétation (Cf. Fig. 2, voir également les résultats statistiques de ce travail dans PRÉVOSTO *et al.*, 2012). Au bout de 6 ans (Barbentane, Vaison) ou 9 ans (Saint-Cannat) les densités mesurées sont respectivement de 1,06 ; 0,70 ; et 0,57 plantules/m², chiffres qui sont dans la gamme de variation des densités enregistrées après feu dans les peuplements de pin d'Alep. La densité présente un pic vers 2-3 ans et décline ensuite de façon modérée pour les sites de Barbentane et Vaison, mais beaucoup plus brutalement à Saint-Cannat où elle chute de 2,10 semis/m² à 3 ans à 0,58 semis/m² à 9 ans. Cette baisse spectaculaire s'explique par une attaque d'un champignon pathogène : le chancre du pin d'Alep (*Crumenulopsis sororia*) qui a éliminé un grand nombre d'individus en particulier ceux déjà soumis à une forte compétition intraspécifique (les dominés).

Tab. I :

Caractéristiques des peuplements après coupe sur chaque site, types de traitements appliqués et surface d'application du traitement, nombre de quadrats pour le comptage de la régénération

	Barbentane	Saint-Cannat	Vaison
Le peuplement			
Date de la coupe (année)	2003	1991	2002
Surface terrière (m ² /ha)	12	10	9
Densité (tiges/ha)	180	60	92
Hauteur dom. (m)	13	15	16
Age moyen (an)	90	90	80
L'expérimentation			
Traitements	Broyage, R	Broyage, R	Broyage, R
R =	Broy. + crochitage	Broy. + crochitage, R	Broy. + crochitage
avec	Broy. + crochitage, R	Broy. + crochitage, R	Broy. + crochitage, R
rémanents	Broy. + crochitage×2, R Feu de faible intensité Feu de forte intensité, R Témoin	Broy. + crochitage×2, R Feu de faible intensité Témoin	Broy. + crochitage×2, R Témoin
Surface placette (m ²)	200	200	600-2000
Nombre total de quadrats (1m ²) inventoriés/an	400	576	369



Pour chacun des trois sites, le broyage suivi par une scarification simple du sol apparaît comme le traitement le plus favorable. Cependant, la présence des rémanents dans ce traitement a un effet opposé dans les deux sites concernés : positif à Barbentane mais négatif à Vaison. Le rôle des rémanents dans la régénération est complexe et encore imparfaitement connu : il semble dépendre de la nature des rémanents, de leur quantité et des conditions écologiques. Ce rôle peut être favorable car les rémanents, constitués par les branches des pins portant des cônes, peuvent apporter une source de graines supplémentaires et limiter la concurrence de la végétation au sol et l'évaporation par effet de paillage (JOHANSSON *et al.*, 2006). En région méditerranéenne ils peuvent également offrir aux jeunes plantules un abri favorisant un microclimat favorable (CASTRO *et al.*, 2011). Mais cet effet peut être un handicap dans les régions tempérées où une température plus faible du sol limite généralement la croissance (DEVINE et HARRINGTON, 2007). Parmi les effets défavorables potentiels, on peut aussi citer une gêne pour le travail du sol si les rémanents sont abondants (LANDHAÜSSER 2009), une structure « soufflée » du sol liée au mélange de terre et

de broyat, de possibles effets allélopathiques (BONIN *et al.*, 2007).

De façon surprenante, le crochetage double est moins bénéfique que le crochetage simple sans que l'on puisse l'expliquer facilement. Il est possible que le crochetage double impacte plus fortement le développement des buissons qui, en région méditerranéenne, peuvent servir d'abri aux plantules et favoriser leur survie (GÓMEZ-APARICIO *et al.*, 2005).

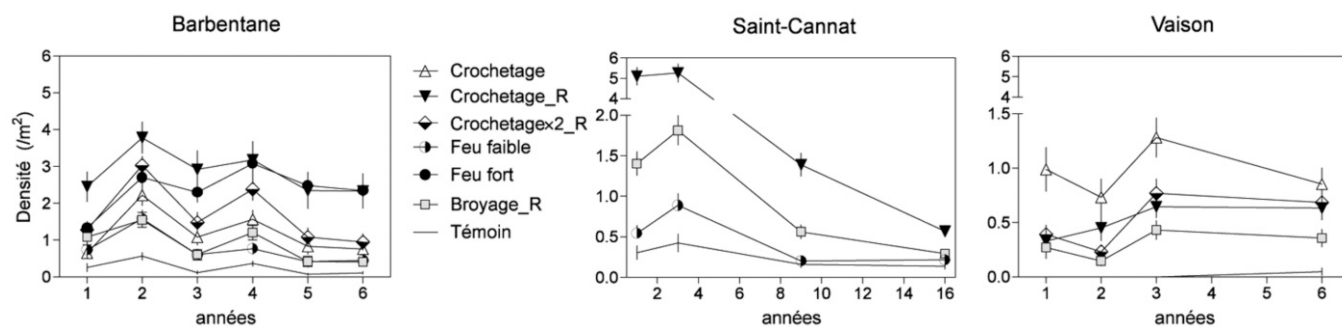
Le brûlage dirigé donne des résultats contrastés selon son intensité. Lorsqu'il y a des rémanents qui couvrent le sol, la masse de combustible étant plus élevée, l'intensité du feu est forte et dans ce cas la régénération est favorisée (traitement « feu fort » à Barbentane). A l'inverse, quand le brûlage est de faible intensité, la régénération est beaucoup moins fournie (traitement « feu faible » à Barbentane et Saint-Cannat). Le broyage seul ne donne qu'une régénération peu abondante. Dans les témoins, la régénération est très faible voire inexistante.

Dans la partie suivante nous expliquons comment ces différents traitements agissent sur les conditions de surface du sol qui, à leur tour, influent sur la régénération.

Photo 1 (à gauche) :
Brûlage dirigé intense effectué par une équipe spécialisée de l'ONF (Barbentane)

Photo 2 (à droite) :
Brûlage intense au premier plan résultant en une combustion totale de la végétation au sol et de la litière et brûlage peu intense à l'arrière plan avec une combustion partielle (Barbentane)

Fig. 2 :
Evolution de la densité de semis de pin (moyenne \pm erreur standard) pour chacun des trois sites en fonction du temps et du type de traitement



Les travaux offrent des conditions favorables mais limitées dans le temps pour l'installation de la régénération

Les divers traitements du sol et de la végétation impactent le recouvrement en sol nu, herbacées, buissons, mousse, cailloux et litière. Après analyse, il s'avère que seuls les trois premiers éléments ont une influence sur la régénération. Ainsi le recouvrement en sol nu est corrélé positivement avec la densité de semis de pin alors que pour les herbacées la corrélation est négative (Cf. Fig. 3). Le seuil à partir duquel les herbacées exercent une influence négative est variable selon les sites. Dans le site de Barbentane, avec le sol le plus superficiel, la compétition par les herbacées apparaît rapidement dès un faible recouvrement et augmente avec ce dernier. Elle apparaît cependant pour un recouvrement supérieur à 25%, dans le site de Saint-Cannat avec une fertilité intermédiaire, et à 50% dans le site plus fertile et plus pluvieux de Vaison. En revanche, le recouvrement par les buissons est bénéfique pour la régénération dans les sites de Barbentane et Saint-Cannat (sauf pour les recouvrements de plus de 75%) mais n'a pas d'influence à Vaison.

Le sol nu est un facteur favorable pour la régénération car aucune barrière physique ou fonctionnelle n'entrave la levée des graines. En revanche, les herbacées et plus particulièrement les graminées, limitent à la fois l'émergence et la survie des plantules de pin notamment par la compétition pour l'eau. C'est pourquoi dans les sites où celle-ci est la plus intense, un recouvrement même

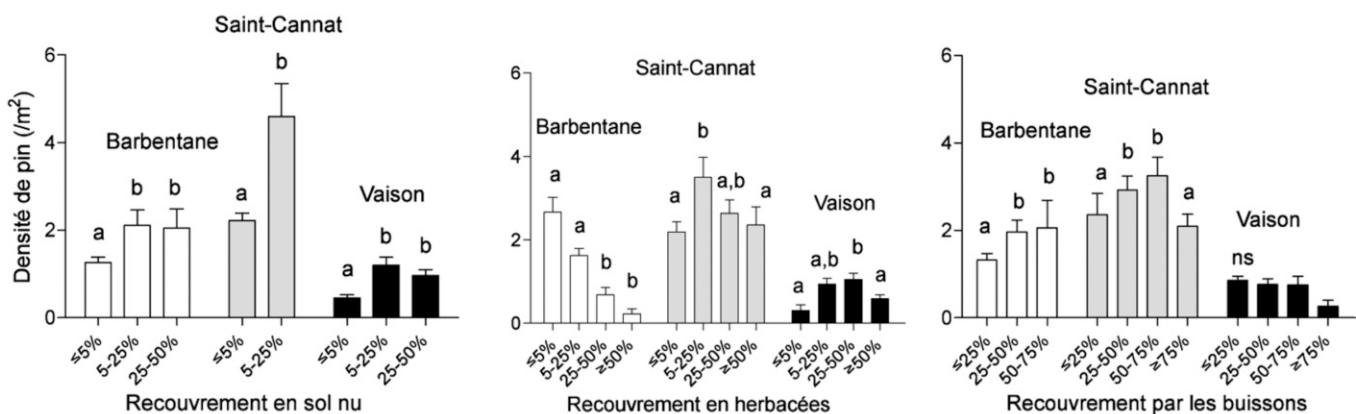
faible induit un effet négatif sur la régénération (Barbentane), alors que dans les sites plus humides, c'est seulement à partir d'un certain taux de recouvrement que la régénération est impactée (Vaison).

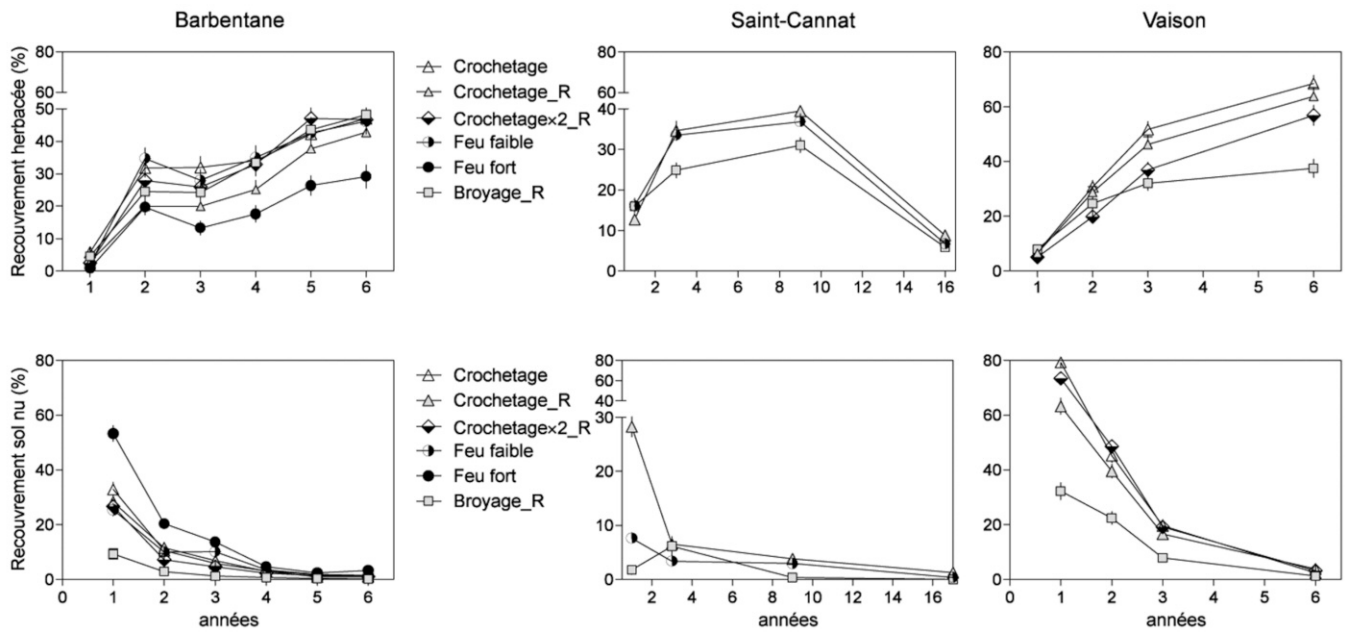
L'évolution dans le temps du recouvrement en sol nu (Cf. Fig. 4) montre que celui-ci décline rapidement de 24% à 5% (tous traitements confondus) en 3 ans à Barbentane, de 10% à 4% à Saint-Cannat et de 62% à 16% à Vaison. Le taux de sol nu dépend aussi fortement du traitement : il est plus élevé dans les traitements avec crochetage ou avec brûlage dirigé fort qu'avec les traitements avec broyage simple ou brûlage dirigé faible. Le taux en herbacées augmente au cours du temps dans tous les sites même si à Saint-Cannat il finit par décliner après 10 ans en raison de la concurrence de la strate arbustive. Les crochetages et le brûlage dirigé faible stimulent le développement des herbacées plus fortement que le broyage seul, sauf à Barbentane. Dans ce dernier site, c'est le brûlage dirigé fort qui apparaît le plus apte à réduire durablement la compétition du tapis herbacé.

Au vu de ces résultats, il est possible de décrire schématiquement l'action des différents types de travaux sur le sol et la végétation :

- le broyage suivi du crochetage permet d'offrir immédiatement après application, un taux de sol nu élevé et une réduction des herbacées, c'est-à-dire des conditions favorables pour l'installation d'une régénération. Ces conditions favorables sont cependant temporaires (< 3 ans). Le crochetage ne fait que scinder le système souterrain du brachypode, plante rhizomateuse, qui se redéveloppe ensuite très rapidement et bloque l'installation des semis. Le crochetage double reproduit les mêmes effets et n'est pas plus favorable que le crochetage simple.

Fig. 3 :
Densité de pin dans chacun des sites, trois ans après les travaux (tous traitements confondus hors témoin), en fonction des recouvrements en classes pour le sol nu, les herbacées et les buissons. Des lettres différentes entre les classes de recouvrement dans un même site indiquent des différences significatives ($P < 0,05$; ns : non significatif).





– Le broyage simple ne permet pas d’obtenir une régénération suffisante car, en ne détruisant que la partie aérienne de la végétation et en accumulant du broyat au sol, il limite la possibilité d’obtenir du sol nu favorable à l’émergence des plantules et augmente l’épaisseur de litière. Le développement du couvert herbacé n’est que peu freiné par ce type de traitement.

– Le brûlage dirigé présente une efficacité qui varie avec l’intensité du feu. Le brûlage de faible intensité n’est que peu efficace pour la régénération. Il ne détruit que partiellement la litière et la végétation au sol. Cette dernière se redéveloppe rapidement (le brachypode est qualifiée d’ailleurs de plante pyrophyte) comme dans le cas d’un brûlage à

but pastoral. En revanche le brûlage de forte intensité (obtenu lorsqu’il y a par exemple des rémanents au sol) est un traitement efficace pour la régénération. Il produit en effet beaucoup de sol nu et limite, sur une durée plus longue, la repousse des herbacées compétitrices. Ce résultat s’explique par les fortes températures atteintes qui détruisent les banques de graines du sol et le système souterrain du brachypode, au moins partiellement.

– Enfin, le témoin est le traitement le moins favorable car l’absence de perturbations ne permet pas de créer des conditions nécessaires à l’installation et la survie des plantules de pin.

Fig. 4 : Evolution des taux de recouvrement du sol en herbacées et sol nu en fonction du temps et des traitements pour les trois sites (le traitement «témoin» n’est pas indiqué).

Photo 3 (à gauche) : 2 ans après un brûlage intense des plaques de sol nu sont toujours visibles (Barbentane)

Photo 4 (à droite) : Régénération de pin 16 ans après crochetage (Saint-Cannat)





Photo 5 (à gauche) :
Crochetage au premier plan et broyage seul à l'arrière plan (Vaison)



Photo 6 (à droite) :
Au bout de 6 ans, la végétation arbustive s'est redéveloppée et la végétation au sol est dominée par le brachypode de phénicie (Vaison)

Des résultats similaires pour d'autres espèces et pour des conditions environnementales différentes

Si l'étude expérimentale de l'impact de différents travaux du sol et de la végétation, incluant le brûlage dirigé, sur la régénération n'avait jamais été réalisée à notre connaissance sur le pin d'Alep, d'autres études ont en revanche souligné l'intérêt de tels travaux pour d'autres essences et dans des contextes climatiques variés. Le bénéfice d'un travail du sol a d'ailleurs été reconnu depuis longtemps en France. Par exemple FOURCHY (1953) recommande un travail du sol (décapage ou crochetage) pour régénérer de nombreuses essences résineuses (pin sylvestre, mélèze, épicéa) ou feuillues (hêtre, chêne pédonculé ou sessile). Mais il note pourtant qu'il est « rarement employé, voire presque délaissé » dans beaucoup de régions autres que le Centre et l'Ouest. Ainsi, NGUYEN et LAFFONT (2001) notent qu'en Lozère la régénération naturelle des peuplements de pin sylvestre issus de la colonisation spontanée des terres abandonnées est très difficile et que seul un travail du sol permet d'obtenir une régénération suffisante. Plus au Nord, en Allemagne, dans des peuplements de pin sylvestre avec une végétation au sol dominée par la ronce ou la molinie et la canche flexueuse, HILLE et DEN OUDEN (2004) montrent également que la régénération est forte avec une scarification du sol ou un brûlage dirigé intense. En revanche, la régénération est moins abondante avec un brûlage dirigé de faible intensité et quasi nulle dans le témoin. De façon

similaire, HANCOCK *et al.* (2009) ont montré en Ecosse que la régénération du pin sylvestre, dans une végétation basse composée de callune et de myrtille, était stimulée par un brûlage intense qui permet de consommer aussi la litière et la strate de mousse au sol. L'effet favorable de la scarification sur la régénération a été par ailleurs largement montré dans les pays scandinaves, aussi bien pour le pin sylvestre que pour l'épicéa ou le bouleau (NILSSON *et al.*, 2002 ; AGESTAM *et al.*, 2003).

Enfin, on peut citer les travaux de KERR *et al.* (2008), sur le pin laricio de Corse dans le sud de l'Angleterre (espèce réputée difficile à régénérer dans ce contexte), et ceux de BARJA *et al.* (2009), sur le pin de Salzmann en Espagne centrale, qui aboutissent aux mêmes conclusions.

Pour conclure : des travaux nécessaires !

La régénération est une phase qui nécessite une perturbation de l'écosystème afin de permettre aux jeunes plantules de lever et de survivre. Cette perturbation peut être apportée par la coupe de régénération et les opérations qui y sont attachées (débardage des bois, traitements des rémanents). Cependant, cette perturbation peut ne pas suffire, notamment en présence d'une végétation au sol interférente qui empêche en partie ou en totalité l'installation d'une régénération. Les travaux du sol et de la végétation sont alors nécessaires. Ils permettent de lever certains obstacles physiques et/ou fonctionnels que peuvent constituer la végétation au sol, la litière, la mousse, etc. La levée de

ces obstacles est une condition nécessaire pour l'installation des semis. Elle ne devient suffisante que si les autres facteurs contrôlant la régénération (pluie de graines, prédation, conditions climatiques par exemple) sont favorables. Dans ce cas, s'ouvre une « fenêtre » de régénération qui est temporaire et qui se ferme avec le retour plus ou moins rapide aux conditions initiales.

Parmi les travaux possibles, notre étude a confirmé le rôle favorable de la scarification du sol et a montré que celle-ci ne doit pas être nécessairement très intense et que son effet est temporaire. Le rôle contradictoire des rémanents dans ce type de traitement, appelle à conduire des études plus détaillées sur leurs effets en fonction de diverses conditions environnementales. Le brûlage dirigé est une opération qui est aussi bénéfique pour la régénération, si l'intensité du feu est suffisante, en créant du sol nu et en limitant plus durablement dans le temps la compétition par les herbacées. Cette technique n'est pas utilisée en France à notre connaissance dans l'objectif de renouvellement des peuplements. En région méditerranéenne le brûlage dirigé sert à des buts de DFCI ou d'entretien de l'espace (pour le pastoralisme par exemple). Cette technique présente certes des inconvénients tels que la nécessité d'intervenir dans des conditions climatiques particulières (vent, humidité), la disponibilité de personnels formés (exemple des cellules de brûlage de l'ONF dans le sud de la France), et la susceptibilité d'engendrer des nuisances (fumées, dégâts si le brûlage échappe au contrôle). Ces obstacles sont cependant maîtrisables et compte-tenu de l'intérêt potentiel qu'offre le brûlage dirigé sur la réussite de la régénération, il conviendrait de tester cette technique sur une échelle plus large, sur d'autres essences et d'autres milieux.

Remerciements

Cette étude a bénéficié d'un financement de la Région Provence-Alpes-Côte d'Azur et du ministère de l'Agriculture, de l'Agroalimentaire et de la Forêt (MAAF, DRAAF-PACA). Le site de Barbentane a aussi reçu une aide financière du ministère de l'Ecologie, du Développement Durable et de l'Energie (MEDDE-DEB).

Les auteurs remercient Roland Estève, Aminata N'Diaye, Willy Martin et Jean-Michel Lopez pour leur aide dans la récolte des données ainsi que le propriétaire de la forêt privée des Barons (13).

Bibliographie

- Agestam E., Ekö P.M., Nilsson U., Welander N.T. 2003. The effects of shelterwood densities and site preparation on natural regeneration of *Fagus sylvatica* in southern Sweden. *For. Ecol. Manage.* 1-3 : 61-73
- Barja A.D., Lucas-Borja M.E., Garcia E.M., Serrano F.R.L., Abellan M.A., Morote F.A.G., Lopez R.N. 2009. Influence of stand density and soil treatment on the Spanish Black Pine (*Pinus nigra* Arn. ssp *Salzmannii*) regeneration in Spain. *Investigacion Agraria-Sistemas y Recursos Forestales*, 18(2) : 167-180.
- Bonin G., Bousquet-Melou A., Lelong B., Voiriot S., Nozay S., Fernandez C. 2007. Expansion du pin d'Alep. Rôle des processus allélopathiques dans la dynamique successionale. *For. Médit.*, XXVIII(3) : 211-218.
- Castro, J., Allen, C.D., Molina-Morales, M., Marañón-Jiménez, S., Sánchez-Miranda, Á., Zamora, R. 2011. Salvage jogging versus the use of burnt wood as nurse object to promote post-fire tree seedling establishment. *Restor. Ecol.*, 19, 537-544.
- Devine, W.D., Harrington, C.A. 2007. Influence of harvest residues and vegetation on microsite soil and air temperatures in a young conifer plantation. *Agr. For. Meteorol.* 145 : 125-138.
- Fourchy P. 1953. Travail du sol et régénération. *Rev. For. Fr.* 5 : 328-340.
- Frochot H., Armand G., Gama A., Nouveau M., Wehrlen L. 2002. La gestion de la végétation accompagnatrice : état et perspective. *Rev. For. Fr.* LIV(6) : 505-520.
- Gaudio, N. 2010. Interactions pour la lumière entre les arbres adultes, les jeunes arbres et la végétation du sous-bois au sein d'un écosystème forestier : application à la régénération du pin sylvestre en peuplement mélangé chêne sessile - pin sylvestre. Thèse Univ. Orléans.
- Gómez-Aparicio L., Valladares F., Zamora R., Quero J.L. 2005. Response of tree seedlings to the abiotic heterogeneity generated by nurse shrubs: an experimental approach at different scales. *Ecography* 28: 757-768.
- Hancock M., Summers R.W., Amphlett A., Willi J. 2009. Testing prescribed fire as a tool to promote Scots pine *Pinus sylvestris* regeneration. *Eur. J. For. Res.* 128 : 319-333.
- Hille M., den Ouden J. 2004. Improved recruitment and early growth of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) seedlings after fire and soil scarification. *Eur. J. For. Res.* 123 : 213-218.
- Johansson, K., Orlander, G., Nilsson, U. 2006. Effects of mulching and insecticides on establishment and growth of Norway spruce. *Can. J. For. Res.*, 36 : 2377-2385.
- Kerr G., Gosling P., Morgan G., Stokes V., Cunningham V., Parratt M., 2008. Seed production and seedling survival in a 50-year-old stand of Corsican pine (*Pinus nigra* subsp *laricio*) in southern Britain. *Forestry*, 81(4): 525-541.
- Landhäuser, S.M. 2009. Impact of slash removal, drag scarification, and mounding on lodgepole pine cone distribution and seedling regeneration after cut-to-length harvesting on high elevation sites. *For. Ecol. Manage.* 258 : 43-49.

Bernard PRÉVOSTO
Christian RIPERT
IRSTEA
Ecosystèmes méditerranéens et risques,
3275 Route Cézanne,
CS 40061
13612 Aix-en-Provence cedex 5

Louis AMANDIER
CRFP
7 Impasse Ricard-Digne
13004 Marseille

Thierry QUESNEY
ONF
1175 chemin du Lavarin
84000 Avignon

Gautier de BOISGELIN
ONF, Unité territoriale de Vigneulles
20 rue du Général de Gaulle
55210 Heudicourt-sous-les-Côtes

Auteur correspondant :
bernard.prevosto@irstea.fr

- Lefevre F., Colin E. 2008. Changement climatique, diversité génétique et adaptation des forêts. *For. Médit.*, XXIX(2) : 243-246.
- MAP, 2000. Ministère de l'Agriculture et de la Pêche. Les indicateurs de gestion durable des forêts françaises, 144p.
- Nguyen N., Lafont J.P. 2001. Quelle stratégie de renouvellement pour le pin sylvestre de Lozère ? Les possibilités de régénération naturelle. *For. Médit.*, XXII(1): 81-84.
- Nilsson U., Gemmel P., Johansson U., Karlsson M., Welander T. 2002. Natural regeneration of Norway spruce, Scots pine and birch under Norway spruce shelterwoods of varying densities on a mesic-dry site in southern Sweden. *For. Ecol. Manage.* 161 : 133-145.
- Pardé, J. 1957. La productivité des forêts de pin d'Alep en France. *ENEF*, 15 : 365-414.
- Prévosto B., Amandier L., Quesney T., De Boisgelin G., Ripert C. 2012. Regenerating mature Aleppo pine stands in fire-free conditions: Site preparation treatments matter. *For. Ecol. Manage.* 282 :70-77.

Résumé

La régénération naturelle des peuplements de pin d'Alep est une opération sylvicole délicate notamment en présence d'une végétation compétitrice au sol. Nous avons étudié l'impact de différents types de travaux du sol et de la végétation sur l'installation de semis dans trois pinèdes matures en région méditerranéenne. Les travaux testés sont le broyage seul, le broyage suivi d'un crochitage du sol simple ou double, le brûlage dirigé de faible ou de forte intensité. L'influence des rémanents d'exploitation a été également testée pour la modalité crochitage. La régénération a été mesurée dans chaque peuplement sur une période de plusieurs années. La régénération au bout de 6 à 9 ans, variable d'un peuplement à l'autre, est peu abondante dans les traitements broyage et brûlage peu intense. Elle est faible ou nulle dans le témoin. Les plus fortes densités de semis s'observent dans le traitement crochitage simple — le crochitage double n'apportant aucun effet favorable supplémentaire — ainsi que le brûlage de forte intensité. L'action favorable de ces traitements sur la régénération s'explique par la production de sol nu et la réduction de la compétition par la végétation au sol. Ces effets sont en revanche plus fugaces dans le cas du crochitage que dans celui du brûlage intense qui se révèle donc un traitement particulièrement efficace bien que très peu testé en France. L'effet des rémanents d'exploitation sur la régénération lors des travaux de crochitage a été contrasté selon les peuplements et nécessiterait une étude plus approfondie.

A partir de cette expérimentation et des enseignements tirés de la littérature, nous concluons en soulignant l'importance des travaux sylvicoles dans la phase de renouvellement des peuplements en présence d'une végétation compétitrice au sol. Ceux-ci permettent d'ouvrir une « fenêtre » de régénération nécessaire à l'installation des semis de la plupart des espèces de pin.

Summary

Effective regeneration of pine stands: silvicultural work is often indispensable! An example: Aleppo pine stands in the Mediterranean area

The self-seeding regeneration of Aleppo pine stands is a challenge to silviculture, especially in competition with other plant cover. We studied the impact on self-seeding of different types of intervention on the soil and vegetation in three mature pine stands near the Mediterranean in south-east France. The various types of treatment were chopping alone, chopping followed by scarification once or twice, controlled burning at both high and low intensity. The effect on scarification of logging slash was also investigated. The success of seedlings was measured in each stand over several years. Six to nine years after intervention, the number of seedlings varied from one stand to another: it was low in the areas treated by chopping and controlled burning at low intensity and was negligible on the control plot. The highest seedling densities were recorded with the single scarification treatment –scarifying twice brought no improvement- and with controlled burning at high intensity. Enhanced regeneration can be explained by the yield on bare soils and the reduced competition from other plants. However, such favourable factors lasted for a shorter period after scarification than after high-intensity controlled burning. Such burning thus emerged as very favourable to the self-seeded regeneration of pine stands, though in France the method has rarely been tested. The influence of logging slash on regeneration was variable, depending on the stands, and needs further study.

From this experiment along with the results of previous studies in self-seeded regeneration of pine stands, we highlight the importance of working the soil and limiting competition from other ground cover. Such interventions open a "window" for regeneration essential to the self-seeding of most pine species.