

# Installer des feuillus méditerranéens pour augmenter la résilience et diversifier les peuplements résineux

## *Rôle du couvert forestier et influence de l'espèce*

par Bernard PRÉVOSTO, Jordane GAVINET, Christian RIPERT, Roland ESTÈVE, Fabien GUERRA, Jean-Michel LOPEZ et Christian TRAVAGLINI

***Face au changement climatique déjà en œuvre, les gestionnaires sont à la recherche de nouvelles stratégies sylvicoles pour rendre les forêts moins sensibles aux risques et pour augmenter leur résilience. Le mélange des essences est souvent mis en avant dans cet objectif. Dans cet article, les auteurs présentent les résultats d'une étude testant l'introduction de divers feuillus méditerranéens dans les peuplements résineux monospécifiques de pin d'Alep.***

### **Introduction : pourquoi installer des feuillus ?**

En région méditerranéenne, le changement climatique entraînera non seulement une hausse des températures mais fera aussi peser un risque plus élevé de perturbations majeures sur les écosystèmes forestiers comme les incendies, les sécheresses ou les attaques d'insectes (KOVATS *et al.*, 2014). De nouvelles stratégies sylvicoles sont donc nécessaires pour rendre les forêts moins sensibles à ces risques et pour augmenter leur résilience, c'est-à-dire leur permettre de se reconstituer plus facilement après un événement extrême, en particulier l'incendie. Pour répondre à ces enjeux, une sylviculture favorisant le mélange des essences est souvent mise en avant car de nombreux bénéfices, certains avérés d'autres supposés, sont attribués aux forêts mélangées (voir en particulier l'article dans *Forêt Méditerranéenne* de Prévosto et Ripert, 2011). Ainsi, les forêts mélangées sont plus résistantes aux attaques de ravageurs (JACTEL et BROCKERHOFF, 2007) et plusieurs études montrent qu'elles sont également plus productives (VILA *et al.*, 2007, RUIZ-BENITO *et al.*, 2014). Le gain de productivité est généralement expliqué par la complémentarité des niches entre les espèces. Par exemple, dans le cas

des systèmes pin-chêne, le pin intercepte l'essentiel de la lumière à l'étage dominant alors que le chêne, essence plus tolérante à l'ombre, peut se développer en sous-étage. Le pin prélèvera aussi ses ressources en eau et en nutriments dans les couches de sol moins profondes que celles utilisées par le chêne. Une exploitation plus efficace et un meilleur partage des ressources expliqueraient donc une croissance supérieure des peuplements mélangés par rapport aux peuplements monospécifiques. En revanche, cet effet bénéfique du mélange est controversé lors d'épisodes de sécheresse : certaines études montrant un effet positif (par ex. de DIOS GARCÍA *et al.*, 2015) et d'autres non (par ex. JUCKER *et al.*, 2014). Un autre intérêt majeur d'introduire des feuillus dans les forêts résineuses est d'augmenter leur résilience notamment après feu. Les pins sont en effet éliminés par l'incendie et leur régénération nécessite la présence d'individus reproducteurs à proximité. Le pin d'Alep est certes capable de se régénérer efficacement grâce à ses cônes sérotineux qui libèrent des graines viables après le passage du feu, cependant, même pour cette espèce, cette capacité de reproduction n'opère plus lorsque le feu intervient avant la maturité des peuplements. Des intervalles de feu rapprochés peuvent donc conduire à une disparition prolongée du couvert végétal. En revanche, les feuillus méditerranéens ont tous la capacité de rejeter de souche ce qui permet au système d'être résilient et moins vulnérable à un régime d'incendie plus sévère (PAUSAS *et al.*, 2004).

L'introduction de feuillus dans les peuplements nécessite de sélectionner des espèces adaptées c'est-à-dire possédant, en plus de cette capacité de rejet, des caractéristiques (ou traits) intéressantes pour le forestier comme la croissance, la capacité à supporter un ombrage ou à résister à de forts déficits hydriques. Malheureusement, pour de nombreuses essences on ne connaît pas nécessairement ces traits et lorsqu'ils sont disponibles dans la littérature ils sont souvent imprécis. Par exemple, la tolérance à la lumière est souvent décrite de manière vague : espèce héliophile ou semi-héliophile ou supportant un certain ombrage, etc. Les stades de développement ne sont pas non plus considérés bien que l'on sache que la tolérance à l'ombre d'un jeune plant soit souvent différente de celle d'un arbre adulte. De plus, on ne connaît généralement pas le comportement des essences *in situ* c'est-à-dire en

interaction avec des végétations existantes et soumis à des conditions climatiques fluctuantes.

Pour répondre à cette problématique nous avons développé une expérimentation dans laquelle des espèces ligneuses variées, arborées et arbustives, ont été introduites dans des peuplements de pin d'Alep distribués selon un gradient de couvert allant des peuplements fermés au plein découvert. Le gradient de couvert a été créé par des éclaircies plus ou moins intenses, ces éclaircies modifient d'abord la disponibilité en lumière mais aussi les ressources en eau et le microclimat (AUSSENAC, 2000). L'objectif global est de diversifier les peuplements et d'améliorer leur résilience, nous cherchons à répondre plus précisément aux trois questions suivantes :

- quelle est l'influence du couvert forestier sur la survie et croissance des différentes espèces ?
- quelles sont les espèces les mieux adaptées aux différentes conditions testées et quels sont les traits caractérisant cette adaptation ?
- comment le microclimat et les ressources (eau, lumière) sont-elles globalement affectées par le traitement du couvert forestier ?

## L'expérimentation

### **Les différentes espèces feuillues introduites**

Nous avons introduit deux espèces arbustives et cinq espèces arborées.

Les espèces arbustives sont l'arbousier (*Arbutus unedo*) et le pistachier térébinthe (*Pistacia terebinthus*). L'arbousier est décrit comme une plante des sols siliceux (*Flore Forestière*, RAMEAU *et al.*, 2008) mais il est présent aussi sur calcaire de façon disséminée. Cette espèce présente un intérêt pour les fruits charnus qu'elle produit et c'est aussi une plante mellifère. Le pistachier térébinthe est commun dans les formations arbustives mais plus discret dans les peuplements de pin d'Alep.

Les espèces arborées ont été choisies pour leur intérêt sylvicole principalement (mais pas uniquement). Il s'agit du chêne vert (*Quercus ilex*), du chêne pubescent (*Quercus pubescens*), du frêne à fleurs (*Fraxinus ornus*), du sorbier domestique (*Sorbus*

*domestica*) et du caroubier (*Ceratonia siliqua*). Les chênes sont des espèces classiques et fréquentes dans les dynamiques de succession qui font évoluer les pinèdes vers les chênaies (BARBÉRO *et al.*, 1990). En revanche le frêne et le sorbier sont présents de façon disséminée dans le paysage sous forme d'individus (le sorbier) ou de petits groupes d'arbres (le frêne). Le caroubier est une plante très thermophile, qui a été anciennement importée et qui est maintenant naturalisée en quelques points du littoral (Alpes-Maritimes, Var, Corse). Il s'agit d'une espèce protégée, inscrite sur la liste II de l'Arrêté du 20 janvier 1982 fixant la liste des espèces végétales protégées sur l'ensemble du territoire. Toutes les espèces mentionnées sont indiquées comme héliophiles (RAMEAU *et al.*, 2008).

Les graines ont été récoltées localement (Basse Provence calcaire, près de Toulon et de Nice pour le caroubier), soit pour être semées directement sur le terrain (chênes), soit pour produire des plants de 1 an (autres feuillus, pépinière zone des Milles, département des Bouches-du-Rhône).

### Utilisation d'un gradient de couvert

Le site expérimental se situe sur la commune de Saint-Mitre-les-Remparts près de l'Etang de Berre (Bouches-du-Rhône) sur un site protégé appartenant au Conservatoire

du littoral et géré par l'Office national des forêts. La zone climatique est celle du mésoméditerranéen inférieur avec une pluviométrie annuelle de 550 mm (période 1961-2010) et une température moyenne de 14,5°C. La végétation du site est dominée par des peuplements purs de pin d'Alep de 50-60 ans, mais comprend aussi des zones ouvertes composées de garrigues et de quelques champs. Les sols sont sur substrat calcaire gréseux (calcarénite), il s'agit d'anciens sols de culture, avec une profondeur moyenne de 40 cm environ et une texture sablo-limoneuse.

Des peuplements de pin d'Alep ont été sélectionnés et éclaircis pour créer un gradient de couvert selon trois traitements (Cf. Photos 1) : couvert dense (aucune éclaircie, surface terrière de 30 m<sup>2</sup>/ha), couvert moyen (éclaircie moyenne, 20 m<sup>2</sup>/ha) et couvert léger (éclaircie forte, 10 m<sup>2</sup>/ha). Un traitement en plein découvert, sur des banquettes débroussaillées, complète le gradient.

Le dispositif comprend 12 placettes forestières (4 placettes de 25m x 25m dans chacun des trois traitements forestiers) et 4 placettes en découvert (15m x 15m). Les placettes ont été grillagées pour éviter des dégâts par le gibier (sanglier notamment) et les plants protégés individuellement avec un grillage plastique.

En forêt, un semis de glands a été réalisé en novembre 2007 (cf. PRÉVOSTO *et al.*, 2015 pour la méthodologie) en installant dans



**Photos 1 :**  
Placettes expérimentales pour les différents traitements.  
A) Couvert dense,  
B) Couvert moyen,  
C) Couvert léger,  
D) Découvert.  
Photos JM Lopez.

chaque placettes, 104 potets de trois glands (la moitié en chêne blanc et la moitié en chêne vert) et 90 plants de 1 an en novembre 2009 (18 plants pour chacune des cinq espèces). En découvert, chaque placette comprend 20 potets (la moitié en chêne blanc et la moitié en chêne vert) et 100 plants (20 plants/espèce). De plus dans ce dernier traitement, la végétation arbustive a été régulièrement éliminée pour garder un découvert complet et éviter une fermeture du milieu.

### Les mesures

Les feuillus ont été suivis annuellement pour mesurer la survie et la croissance (diamètre à la base de la tige et hauteur). Le recouvrement de la végétation arbustive a aussi été mesuré en utilisant les coefficients de recouvrement de Braun-Blanquet.

Nous avons mesuré, en fin de période estivale, deux paramètres écophysologiques : la fluorescence chlorophyllienne et le potentiel de base foliaire sur environ 15 individus/espèce répartis dans les différents traitements. La fluorescence est mesurée l'après-midi sur des feuilles préalablement mises à l'obscurité sur lesquelles on applique un flash lumineux de 3500 micromoles/m<sup>2</sup>/s pendant 10 s à l'aide d'un fluorimètre portable (Pocket Pea, Hansatech Instruments). Cela permet de mesurer les fluorescences maximale (F<sub>m</sub>), minimale (F<sub>o</sub>) et un taux de variation  $F_v/F_m = (F_m - F_o)/F_m$ . Le ratio  $F_v/F_m$  est un indicateur du statut photosynthétique du plant, il s'abaisse en cas de stress. Le potentiel de base est mesuré le matin avant le lever du soleil en prélevant une feuille (sur 15 individus également) et en mesurant son potentiel à l'aide d'une chambre à pression (PMS Instrument). Le

potentiel de base est lié au statut hydrique du plant : il s'abaisse quand le stress hydrique s'accroît.

Les principaux facteurs environnementaux ont été caractérisés (Cf. Photos 2). Il s'agit de la lumière dans le domaine du PAR (c'est-à-dire de la lumière utile pour la photosynthèse) à l'aide de cinq capteurs par traitement (SKP 215, Skye Instruments), de la teneur en eau des sols à - 30 cm avec douze capteurs par traitement (EC-5, Decagon Device) et du microclimat (température et humidité de l'air) au moyen de 3-5 capteurs par traitement (iButton DS 1923).

Pour mieux caractériser le microclimat, nous avons utilisé le déficit de pression de vapeur (VPD en anglais) qui traduit la différence entre la quantité d'humidité dans l'air ambiant et la quantité d'humidité que l'air ambiant peut contenir lorsque celui-ci en est saturé. Le VPD se calcule en combinant la température et l'humidité relative, ce paramètre est lié à la capacité de transpiration des plantes et donc à leur croissance.

### Les résultats

#### Survie : les couverts denses défavorables

Les résultats pour la survie des plants à 6 ans et des semis de chênes à 8 ans sont présentés sur la figure 1. On constate que les couverts les plus fermés sont les plus défavorables à la survie à l'exception du frêne à fleurs qui présente des taux de survie élevés (> 94%) dans tous les types de couvert. Le sorbier et le chêne vert sont ensuite les espèces qui supportent le mieux les couverts

#### Photos 2 :

Mesure des facteurs de l'environnement.

A) Capteur de lumière PAR,

B) Installation de sondes d'humidité du sol, C) Abri pour sonde de température et humidité de l'air.

Photos JM Lopez et J Gavinet.



fermés avec des taux de survie respectifs de 60% et 52% alors que ces taux sont nettement inférieurs (< 30%) pour les autres feuillus. Le pistachier et le chêne vert montrent une augmentation de la survie avec l'ouverture du couvert, alors que pour l'arbousier, le caroubier et le chêne blanc, les survies entre le découvert et les couverts forestiers léger ou moyen sont relativement comparables.

### Croissance : un contraste entre croissance en diamètre et croissance en hauteur

Les croissances en diamètre et en hauteur réagissent de façons contrastées à la fermeture du couvert (Cf. Fig. 2). Le diamètre augmente des milieux fermés vers les milieux ouverts pour toutes les espèces. La différence entre le couvert léger et le découvert est particulièrement marqué pour l'arbousier (diamètre passant de 8,6 à 20,6 mm soit  $\times 2,4$ ) et pour le chêne vert ( $\times 2$ ) puis dans une moindre mesure le sorbier et le pistachier ( $\times 1,4$  et  $\times 1,7$  respectivement). Le caroubier ne montre pas de variations entre les traitements pour le diamètre et pour la hauteur qui restent très faibles. Cela s'explique par le fait que l'espèce a subi de gros dégâts de gel en février 2012 dans tous les traitements, entraînant une mortalité de l'espèce et une pénalisation de sa croissance, la plupart des plants ayant survécu étant repartis sous forme de rejets. Le *pattern* (modèle) de la croissance en hauteur diffère de celui du diamètre et on distingue trois types de comportement selon les espèces. Le frêne, le sorbier et le chêne blanc présentent une hauteur maximale dans les couverts forestiers moyen ou léger alors que celle-ci est fortement réduite en découvert puisqu'elle est divisée

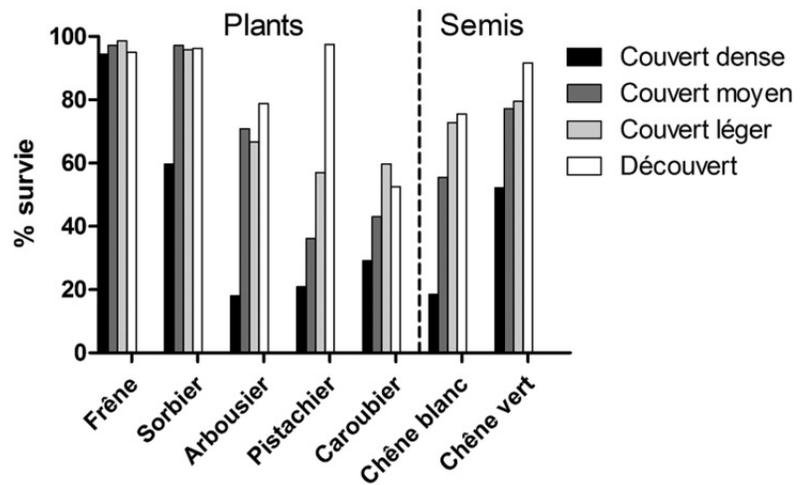


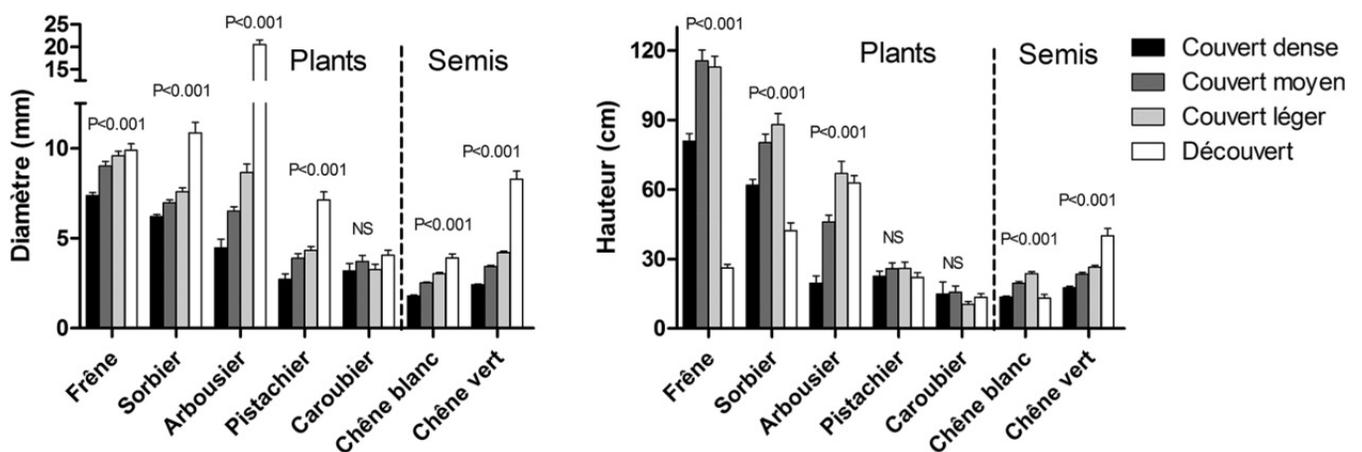
Fig. 1 : Pourcentage de survie des plants (à 6 ans) et des semis (à 8 ans) pour les différentes espèces en fonction des types de couvert.

respectivement par 4,4 ; 2,1 et 1,8. En revanche, les hauteurs sont comparables ou supérieures en découvert par rapport au couvert léger pour l'arbousier et le chêne vert. Enfin, on n'observe pas de différences pour le caroubier (mais voir remarque ci-dessus) et le pistachier.

### Paramètres écophysologiques : les stress lumineuse et hydrique

La mesure de la fluorescence chlorophyllienne permet de déterminer l'efficacité de l'appareil photosynthétique de la plante c'est-à-dire sa capacité à transformer l'énergie lumineuse en énergie chimique. On mesure sur le terrain un indicateur de variation de niveaux de fluorescence (ratio Fv/Fm). De façon schématisée, un abaissement de ce ratio traduit un stress de la plante, lié notamment à un excès de radiations lumineuses. Les résultats (Cf. Fig. 3) montrent un abaissement du ratio Fv/Fm

Fig. 2 : Dimensions (moyenne + erreur type) pour les différentes espèces en fonction des types de couvert : diamètre à la base des tiges (à gauche) et hauteur (à droite). Les valeurs P indiquent des valeurs significativement différentes entre les traitements pour une même espèce (NS=non significatif).



selon le gradient de couvert pour toutes les espèces. On note cependant que deux espèces présentent un ratio particulièrement faible : le frêne (0.63) et le chêne blanc (0.54). Ce résultat traduit le fait que ces espèces présentent un stress marqué en plein découvert lié à une photoinhibition -c'est-à-dire un excès d'éclairement susceptible endommager l'appareil photosynthétique- et aussi probablement à des températures élevées.

Le potentiel foliaire de base mesure quant à lui le stress hydrique de la plante : plus il est négatif et plus la plante subit un stress hydrique. Le stress hydrique le plus intense en période estivale est observé sous couvert dense (Cf. Fig. 3). La teneur en eau du sol n'est pourtant pas plus basse que dans les autres types de couvert mais la disponibilité en lumière est la plus faible (voir paragraphe suivant). De ce fait, le développement du plant est réduit, en particulier le développement du système racinaire, ce qui limite son approvisionnement en eau et induit donc un stress hydrique. Le potentiel est en revanche le plus élevé (= le moins négatif) en découvert. En effet, le découvert se caractérise par une absence de consommation en eau par la végétation ligneuse et donc présente une teneur en eau du sol un peu plus forte (voir ci-après).

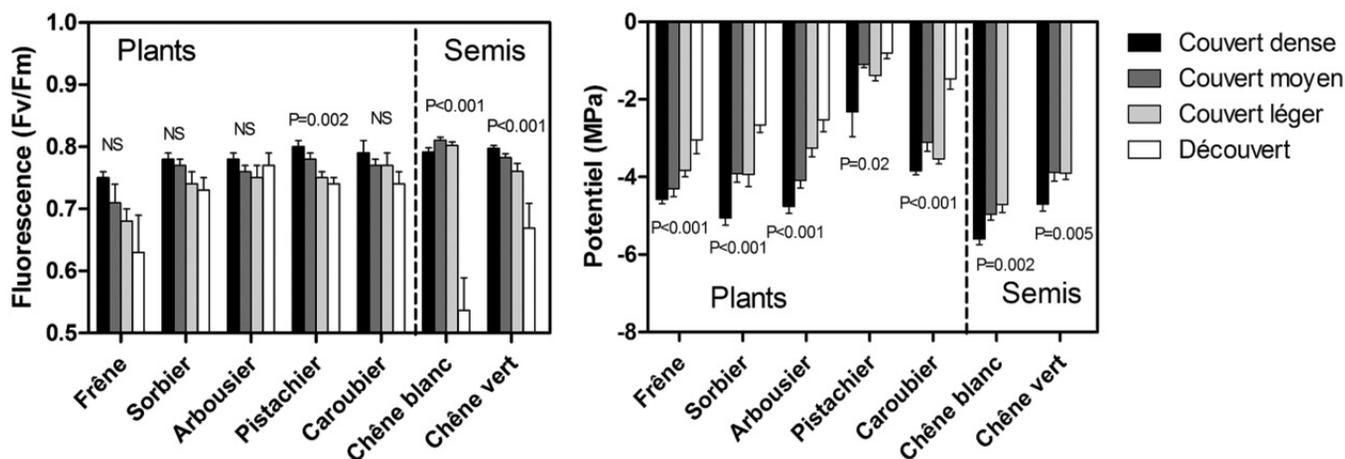
**Fig. 3 :**

Valeurs (moyenne + erreur type) de deux paramètres écophysologiques mesurés en période estivale : fluorescence (rapport Fv/Fm, à gauche) et potentiel foliaire de base (à droite). Une valeur basse de la fluorescence indique une efficacité moindre de l'appareil photosynthétique et la valeur du potentiel est d'autant plus négative que le plant subit un stress hydrique fort. Les valeurs P indiquent des valeurs significativement différentes entre les traitements pour une même espèce (NS=non significatif).

### **Paramètres de l'environnement : gradient microclimatique des milieux ouverts vers les milieux fermés**

Les valeurs de croissance et de paramètres écophysologiques qui sont très variables selon les traitements reflètent des conditions

environnementales contrastées. Nous en montrons les valeurs pour la lumière, la température de l'air, le VPD et la teneur en eau du sol mesurées en période estivale (Cf. Fig. 4). La lumière augmente très logiquement des milieux fermés (10% de lumière transmise par rapport au découvert) vers les milieux totalement ouverts (100%). Lié à ce gradient de lumière, existent un gradient thermique et un gradient de déficit de pression de vapeur. Ce dernier montre que la demande potentielle d'évaporation pour la plante s'accroît fortement avec l'ouverture du milieu. La teneur en eau du sol présente en revanche un profil particulier. Tout d'abord, nous n'observons pas de différences significatives entre les traitements forestiers. Cela peut apparaître surprenant car l'ouverture du peuplement est obtenue en réduisant la densité d'arbres donc en limitant la transpiration et l'interception de la pluie par la canopée. On pourrait donc s'attendre à une augmentation de la teneur en eau du sol. Cependant, dans les peuplements ouverts, les arbres restants (qui sont aussi les plus gros) peuvent transpirer plus et surtout on observe un développement fort de la strate basse qui consomme également la ressource en eau. Ces deux derniers processus semblent donc compenser le gain lié à une transpiration et une interception réduites. Autre observation, la teneur en eau du sol est plus élevée en découvert que dans les peuplements. Le milieu découvert se caractérise en effet par un développement très faible de la végétation (donc une transpiration réduite) et on ne peut pas non plus exclure une réserve en eau du sol plus élevée en découvert qu'en milieu forestier liée à une différence de sol.

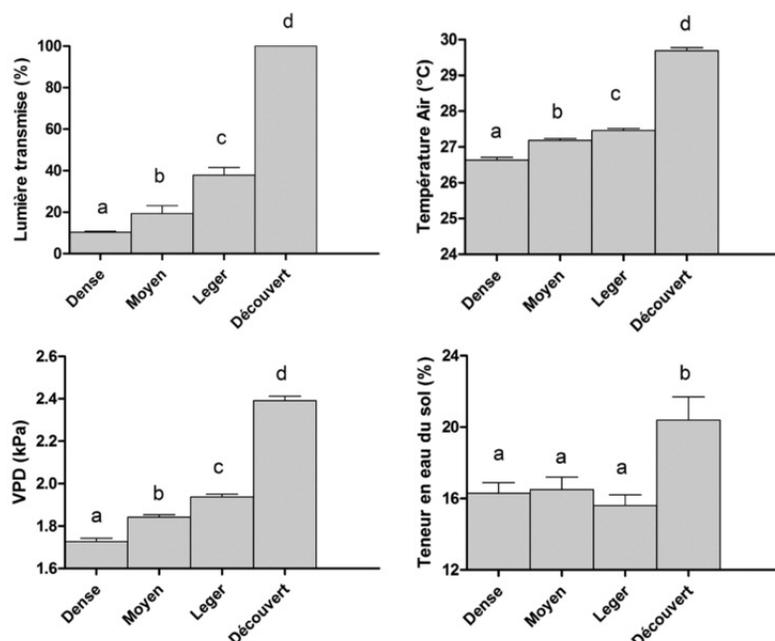


## Discussion et conclusion

### **Une influence forte de l'ouverture du couvert sur la croissance et la survie**

Les résultats montrent une influence du couvert sur la survie et la croissance des plants. La survie est toujours la plus faible sous les couverts les plus fermés, à l'exception du frêne qui ne montre pas de différences entre les traitements. En effet, dans les couverts fermés, c'est la ressource en lumière qui est la plus limitante avec seulement 10% de lumière transmise, ce qui limite la croissance des plants et en particulier le développement de leur système souterrain leur permettant d'accéder aux ressources en eau. Les plants sont alors plus vulnérables à la sécheresse estivale et leur survie est diminuée. La combinaison de la sécheresse et de fort ombrage a d'ailleurs été mise en avant comme un facteur pénalisant le développement des plants dans de précédents travaux (VALLADARES *et al.*, 2005 ; SÁNCHEZ-GÓMEZ *et al.*, 2006). Cependant cette constatation n'est pas unanimement partagée dans la littérature. Dans une expérience réalisée dans le sud de l'Espagne, divers feuillus ont été installés sous un gradient de couvert de pin d'Alep similaire au nôtre, mais, à l'inverse de nos résultats, une survie plus forte a été notée dans les couverts denses que dans les couverts légers (GAVINET *et al.*, 2015 ; GRANADOS *et al.*, 2016). Les auteurs attribuent cette meilleure survie dans les conditions d'ombrage les plus intenses à des conditions climatiques plus favorables : températures et déficit de pression de vapeur (VPD) moins élevées. Ces facteurs ne semblent pas jouer dans notre étude : en plein découvert, c'est-à-dire dans les conditions de VPD et de température les plus fortes, la survie reste élevée. Ce résultat s'explique en partie par le fait que la teneur en eau est supérieure en découvert que dans les autres traitements, même en période estivale, favorisant ainsi la survie des plants comme en témoigne les valeurs de potentiel de base plus faibles dans les conditions de plein découvert.

Contrairement à la survie, la croissance en diamètre est favorisée par l'ouverture du couvert, un résultat aussi constaté dans d'autres expérimentations (GRANADOS *et al.*, 2016). En revanche, la hauteur est généralement plus élevée sous couvert léger qu'en



**Fig. 4 :** Valeurs moyennes de différents paramètres environnementaux pour la période estivale : lumière transmise dans le domaine du PAR, température de l'air, déficit de pression de vapeur (VPD) et teneur en eau du sol à -30cm. Température et VPD correspondent à la moyenne de l'été 2015 pour des périodes diurnes (7h-18h). Des lettres différentes indiquent des différences significatives ( $P < 0.05$ ) entre les traitements.

plein découvert sauf pour le chêne vert. Ce sont surtout le frêne et le sorbier qui montrent une très forte baisse de la hauteur en plein découvert par rapport au couvert léger de pin (77% et 52% de réduction respectivement). Ces deux espèces, et en particulier le frêne, semblent sensibles à l'excès de radiations lumineuses et aux fortes températures du découvert, entraînant une photoinhibition et une limitation de leur croissance en hauteur.

### **La performance des plants dépend de l'espèce**

Un des objectifs de l'expérimentation était de mieux connaître le comportement des espèces selon différents types d'habitats et de conditions environnementales. En effet, les feuillus que nous avons utilisé sont décrits dans les bases existantes (par exemple la flore forestière, RAMEAU *et al.*, 2008) avec des données autécologiques similaires : espèces héliophiles, thermophiles, et résistantes à la sécheresse. Cependant nos résultats montrent des différences marquées (Cf. Photos 3). Ainsi le frêne est apparu comme une espèce particulièrement capable de supporter des faibles éclaircissements au moins les premières années alors que sa croissance en hauteur en plein découvert est réduite. Il faut noter que la croissance en hauteur est un descripteur important puisqu'il marque la capacité du plant à s'affranchir de la compétition de la végétation environnante (artifi-



**Photos 3 :**

Exemples de développement très contrasté entre le découvert et le milieu forestier : le frêne à fleurs et l'arbousier.

- A) Frêne de faible hauteur en découvert,
  - B) Frêne sous couvert léger de pin,
  - C) Arbousier en découvert,
  - D) Arbousier sous couvert dense très peu développé.
- (Photos JM Lopez).

ciellement éliminée en plein découvert dans cette étude rappelons-le). Le sorbier et le chêne blanc présentent un profil comparable pour le développement en hauteur mais avec une survie à l'ombre limitée pour le sorbier et encore plus réduite pour le chêne blanc. Nous avons donc identifié un premier groupe constitué par le frêne, le sorbier et le chêne blanc qui sont des espèces feuillues décidues et malacophylles (feuilles larges et souples) dont le développement est favorisé sous des couverts forestiers intermédiaires à légers.

Un second groupe se compose des autres espèces qui présentent des feuilles coriaces, qui sont sempervirente (sauf le pistachier), et se développent sous forme d'arbuste ou d'arbre de faible hauteur. Ces espèces voient leurs performances, survie et croissance surtout en diamètre, s'améliorer avec l'ouverture du couvert. Le caroubier est un cas particulier : cette espèce native de l'Europe du sud (Chypre), du Maghreb, de la Turquie et du Moyen-Orient a été testée car elle est adaptée à la sécheresse et aux températures élevées. Les premières années après plantation, l'arbre s'est développé dans toutes les conditions de couvert mais des gelées particulièrement fortes en février 2012 ont détruit presque la totalité des individus, ceux-ci rejetant ensuite plus ou moins de souche. Cette constatation illustre le fait qu'il convient d'utiliser avec prudence les espèces thermophiles, non natives (en tout cas non présentes dans la zone d'étude) dont on connaît mal les possibilités d'adaptation aux contraintes climatiques locales.

**Quels enseignements pour la restauration ?**

L'expérimentation a été conçue afin de restaurer ou du moins d'améliorer la résilience et la diversité des formations forestières dégradées par un usage anthropique. Nous avons privilégié l'utilisation de feuillus divers capables de rejeter de souche qui ont été introduits sous un gradient de couvert de

pin et en plein découvert. Les résultats, pour les premières années, montrent que les feuillus sempervivents, sclérophylles, formant des arbustes ou de petits arbres sont mieux adaptés aux conditions environnementales des milieux découverts caractérisés par un microclimat difficile (températures et VPD élevés en saison estivale par exemple) et un excès de radiations lumineuses. En revanche, les espèces arborées, décidues et malacophylles bénéficient d'un couvert forestier qui tamponne fortement les extrêmes climatiques du découvert. Dans ce cas, les peuplements formant des couverts denses doivent être éclaircis car la forte réduction de l'éclaircissement sous couvert fermé réduit considérablement la survie et la croissance des plants. Afin d'éviter un développement trop fort du sous-étage et donc l'accumulation de combustible, l'éclaircie peut être modérée (modalité « couvert moyen » dans cette étude) au prix certes d'une réduction de croissance mais qui reste limitée. Le choix des espèces en fonction des habitats et la possibilité de manipuler ces habitats par des actions de gestion sont donc des éléments clés pour le succès des opérations d'enrichissement ou de restauration des écosystèmes méditerranéens.

## Remerciements

Ce travail a bénéficié du soutien financier du ministère de l'Écologie (MEDDE-DEB) et de la Région Provence-Alpes-Côte d'Azur.

## Bibliographie

- Aussenac G., 2000. Interactions between forest stands and microclimate: Ecophysiological aspects and consequences for silviculture. *Annals of Forest Science* 57: 287-301.
- Barbéro M., Quézel P., Loisel R., 1990. Les apports de la phytoécologie dans l'interprétation des changements et perturbations induits par l'homme sur les écosystèmes forestiers méditerranéens. *Forêt Méditerranéenne* XXII : 194-215.
- De Dios García J., Pardos M., Calama R., 2015. Interannual variability in competitive effects in mixed and monospecific forests of Mediterranean stone pine. *Forest Ecology and Management* 358: 230-239.
- Gavinot J., Vilagrosa A., Chirino E., Granados M.E., Vallejo R., Prévosto B., 2015. Hardwood seedling establishment below Aleppo pine depends on thinning intensity in two Mediterranean sites. *Annals of Forest Science* 72: 999-1008.
- Granados M.E., Vilagrosa A., Chirino E., Vallejo R., 2016. Reforestation with resprouters species to increase diversity and resilience in Mediterranean pine forests. *Forest Ecology and Management* 362: 231-240.
- Jactel H., Brockerhoff E., 2007. Tree diversity reduces herbivory by forest insects. *Ecological Letters* 9: 835-848.
- Kovats, R.S., Valentini, R., Brower, L.M., Georgopoulou, E., Jacob, D., Martin, E., Rounsevell, M., Soussana, J.F., 2014. Europe, in: *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability*. Part B: regional aspects. Cambridge, UK and NY, NY, USA, pp.1267-1326.
- Pausas, J.G., Bladé, C., Valdecantos, A., Seva, J.P., Fuentes, D., Alloza, J.A., Vilagrosa, A., Bautista, S., Cortina, J., Vallejo, R., 2004. Pines and oaks in the restoration of Mediterranean landscapes of Spain: new perspectives for an old practice-a review. *Plant Ecology* 171: 209-220.
- Prévosto B., Reque J.A., Ripert C., Gavinot J., Estève R., Lopez J.M., Guerra F., 2015. Semer les chênes méditerranéens *Quercus ilex*, *Quercus pubescens* : pourquoi, comment et avec quelle réussite ? *Forêt Méditerranéenne* XXXVI(1) : 1-14.
- Prévosto B., Ripert C., 2011. Les forêts mélangées en région méditerranéenne : quels bénéfices et comment créer le mélange. *Forêt Méditerranéenne* XXXII(2) : 187-196.
- Ruiz-Benito P., Gómez-Aparicio L., Paquette A., Messier C., Kattge J., Zavala M.A., 2014. Diversity increases carbon storage and tree productivity in Spanish forests. *Global Ecology and Biogeography* 23: 311-322.
- Sánchez-Gómez D., Valladares F., Zavala M.A., 2006. Performance of seedlings of Mediterranean woody species under experimental gradients of irradiance and water availability: trade-offs and evidence for niche differentiation. *New Phytologist* 170: 795-806.
- Valladares F., Dobarro I., Sánchez-Gómez D., Percy RW., 2005. Photoinhibition and drought in Mediterranean woody saplings. Scaling effects and interactions in sun and shade phenotypes. *Journal of Experimental Botany* 56: 483-494.
- Vilà M., Vayreda J., Comas L., Ibáñez J.J., Mata T., Obón, B., 2007. Species richness and wood production: a positive association in Mediterranean forests. *Ecology Letters* 10: 241-250.

Bernard PRÉVOSTO  
Christian RIPERT  
Roland ESTÈVE  
Fabien GUERRA  
Jean-Michel LOPEZ  
Christian TRAVAGLINI  
IRSTEA  
UR RECOVER  
Equipe Ecosystèmes méditerranéens et risque  
3275 route de Cézanne CS 40061,  
13182 Aix-en-Provence cedex 5,  
Courriel : bernard.prevosto@irstea.fr

Jordane GAVINET  
IRSTEA et  
Institut méditerranéen de biodiversité et d'écologie marine et continentale (IMBE)  
Aix-Marseille  
Université, CNRS, IRD  
Avignon Université  
UMR 7263  
3 place Victor-Hugo  
13331 Marseille  
cedex 3

## Résumé

---

Notre étude a pour objectif de tester l'introduction de divers feuillus méditerranéens dans les peuplements résineux monospécifiques de pin d'Alep afin d'accroître leur diversité et leur résilience. Sept espèces ont été testées, cinq ont été plantées (*Arbutus unedo*, *Ceratonia siliqua*, *Fraxinus ornus*, *Pistacia terebinthus*, *Sorbus domestica*) et deux semées (*Quercus ilex*, *Quercus pubescens*). Les feuillus ont été introduits sous un gradient de fermeture de couvert selon quatre traitements : couvert dense, couvert moyen, couvert léger et plein découvert. La survie, la croissance et des paramètres de l'environnement (lumière, eau du sol, microclimat) ont été mesurés. Les résultats montrent que, à l'exception du frêne, la survie est la plus réduite dans les peuplements denses (couvert fermé) en raison d'une limitation drastique de l'éclairage. Les espèces arborées, décidues et malacophylles (frêne et sorbier) présentent un meilleur développement sous les couverts forestiers moyens ou légers qu'en plein découvert où elles subissent un processus de photoinhibition et des températures extrêmes. En revanche, les autres espèces, qui sont sempervirentes (à l'exception du pistachier), plutôt arbustives et aux feuilles coriaces montrent une tendance inverse. Ces résultats permettent de mieux connaître les exigences écologiques de ces feuillus et leur utilisation dans des opérations de restauration ou d'enrichissement sous couvert forestier ou en découvert.

## Summary

---

### Introducing broadleaved Mediterranean species to enhance resilience and diversity in conifer stands - Role of forest cover and species influence

Our study aims at testing the introduction of various Mediterranean broadleaved species in monospecific Aleppo pine coniferous stands in order to increase their diversity and resilience. Seven species were used, five were planted (*Arbutus unedo*, *Ceratonia siliqua*, *Fraxinus ornus*, *Pistacia terebinthus*, *Sorbus domestica*) and two were sown (*Quercus ilex*, *Quercus pubescens*). The introduction of these species corresponded to a gradient of pine cover: dense cover, medium cover, light cover and, open conditions. Measurements were made of growth and certain environmental parameters (light, soil moisture, microclimate). Results show that, for all species but *Fraxinus*, survival is minimal in the dense cover treatment due to the reduced availability of light. Deciduous and malacophylle tree species (*Fraxinus* and *Sorbus*) show better development in the medium and light cover treatments than in the open option. In the open, these species are in fact submitted to photo-inhibition and extreme temperatures. In contrast, the other species which are evergreen (except *Pistacia*), with a shrub or small tree habit and leathery leaves, show a reverse trend. These results enable us to better understand the ecological requirements of these species and their potential use in restoration or enrichment planting operations in both forest and open conditions.

## Resumen

---

### Establecer frondosas mediterráneas para aumentar la resiliencia y diversificar las plantaciones de coníferas. Función de la cubierta forestal e influencia de las especies

Nuestro estudio tiene por objetivo comprobar la introducción de varias frondosas mediterráneas en plantaciones de coníferas mono-específicas de pino carrasco con el fin de aumentar su diversidad y su resiliencia. Se probaron siete especies, cinco se plantaron (*Arbutus unedo*, *Ceratonia siliqua*, *Fraxinus ornus*, *Pistacia terebinthus*, *Sorbus domestica*) y dos sembradas (*Quercus ilex*, *Quercus pubescens*). Las frondosas se introdujeron en gradiente de cierre de copas según cuatro tratamientos: cubierta densa, cubierta media, cubierta ligera y descubierto total. Se midieron la supervivencia, el crecimiento y parámetros del medio ambiente (luz, agua del suelo, microclima). Los resultados mostraron que, a excepción del fresno, la supervivencia es la más reducida en las plantaciones densas (cubierta cerrada) a causa de una limitación drástica de la iluminación. Las especies arbóreas, caducas y malacophylles (fresno y serbal) presentan un mejor desarrollo bajo cubiertas forestales medias o ligeras que en descubierto total, donde sufren un proceso de foto-inhibición y de temperaturas extremas. En cambio, las otras especies, que son perennes (a la excepción del cornicabra), más bien arbustivas y con hojas coriáceas muestran una tendencia inversa. Estos resultados permiten conocer mejor las exigencias ecológicas de estas frondosas y su utilización en operaciones de restauración o de enriquecimiento bajo cubierta forestal o en descubierto.