

Guide de gestion forestière adaptative au changement climatique

Novembre 2019



Table des matières

1	INTRODUCTION : LE PROJET CANOPEE	5
2	BASES TECHNIQUES ET ÉCOLOGIQUES DES TRAITEMENTS DE GESTION POUR L'ADAPTATION	7
2.1	ÉCLAIRCIES ET DÉPRESSAGES.....	7
2.2	ADAPTATION DU DIAMETRE D'EXPLOITABILITE	15
2.3	CHOIX DES ESSENCES ET DES PROVENANCES LORS DES PLANTATIONS.....	20
2.4	RÉDUCTION DU RISQUE D'INCENDIE.....	23
2.5	DIVERSIFICATION	26
3	PLACETTES DÉMONSTRATIVES ET RÉSULTATS DES TRAITEMENTS	33
3.1	CARTE DE LOCALISATION DES PLACETTES DÉMONSTRATIVES.....	34
3.2	PINÓS (LLEIDA).....	36
3.3	BOUCHEVILLE (PYRÉNÉES-ORIENTALES).....	42
3.4	ESPEZEL (AUDE).....	47
3.5	POBLET (TARRAGONA)	52
3.6	EZPROGUI (NAVARRA).....	59
3.7	SAINT LAURENT BRETAGNE (PYRENEES ATLANTIQUES).....	65
3.8	SAINT LAURENT DE CERDANS (PYRENEES ORIENTALES)	71
3.9	RIEUCAZÉ (HAUTE-GARONNE).....	77
3.10	VILLANÚA (ARAGÓN).....	82
3.11	ENCAMP (ANDORRA).....	88
3.12	VITORIA (ÁLAVA).....	94
4	CONCLUSIONS	109
5	BIBLIOGRAPHIE	111
6	TABLE DES MATIÈRES	123



1 INTRODUCTION : LE PROJET CANOPEE

La forêt occupe plus de la moitié de la surface des Pyrénées et fournit, tant au niveau local qu'au niveau régional, de nombreux biens et services (production de bois, protection des sols, régulation du régime hydrique, loisirs, etc.).

Les changements climatiques peuvent entraver de façon importante cette multifonctionnalité des forêts pyrénéennes en entraînant des dépérissements dans les forêts de production ou de protection, des destructions d'espèces ou habitats remarquables, une détérioration du cadre paysager forestier,...

Par conséquent, il devient de plus en plus évident que les gestionnaires forestiers des Pyrénées doivent anticiper ces changements en développant des outils communs pour améliorer la connaissance et la prise de décision dans la mise en œuvre d'actions d'adaptation sur le territoire.

Fruit du partenariat des forestiers espagnols, andorrans, et français, le projet CANOPEE vise à apporter des éléments de réponse concrets sur les effets du changement climatique et les possibilités d'adaptation au sein du massif montagneux.

Dans ce contexte le projet a pour but de:

- Renforcer le suivi de la phénologie des principales essences des Pyrénées,
- Développer un outil pour caractériser la vitalité des arbres du Massif et leur vulnérabilité au changement climatique,
- Cartographier la distribution et la vulnérabilité (actuelle et future) des principales espèces forestières des Pyrénées selon les différents scénarios de changements climatiques,
- Elaborer et mettre en œuvre des actions de gestion adaptative pour minimiser les impacts attendus.

Le présent manuel est réalisé dans le but de contribuer particulièrement au dernier objectif.

Onze parcelles ont bénéficié de ces traitements. Ces dernières ont été sélectionnées dans le but de couvrir un gradient aussi large et représentatif que possible en termes de conditions stationnelles et de peuplements.

Ainsi, le but de ce document est de faire connaître :

- Les bases théoriques et écologiques sur lesquels se fondent ces opérations,
- Les cas particuliers des parcelles ayant bénéficié de ces traitements, et quel est l'impact identifié de ces derniers à la date de parution.

Cette dernière partie se veut suffisamment détaillée pour permettre aux gestionnaires de prendre une décision éclairée sur les éventuels itinéraires qu'il souhaite mettre en œuvre.

Le temps n'est plus à l'expectative mais à l'action, alimentée par l'acquisition de connaissances locales et partagées.

2 BASES TECHNIQUES ET ÉCOLOGIQUES DES TRAITEMENTS DE GESTION POUR L'ADAPTATION

2.1 ÉCLAIRCIES ET DÉPRESSAGES

2.1.1 Aspects généraux

Les dépressages et les éclaircies sont des coupes partielles réalisées sur un peuplement régulier afin d'améliorer sa stabilité et sa qualité en éliminant les tiges les plus mal conformées, en contrôlant sa composition spécifique et en favorisant la croissance des tiges d'avenir. Par ailleurs, les dégagements sont définis comme un traitement spécifique des taillis qui permet de réserver certaines tiges d'avenir (baliveaux) pour en tirer parti lors de coupes postérieures. Il s'agit, dans l'essentiel, d'un traitement assimilable aux dépressages et aux éclaircies avec, toutefois, la particularité que l'intervention se fait sur des tiges de taillis, c'est à dire sur de multiples rejets de souche ou de racine. En appliquant des dépressages, des éclaircies et des dégagements, l'idée, en général, est de :

- Réduire la concurrence pour favoriser la stabilité biologique.
- Améliorer la situation sanitaire du peuplement.
- Ajuster ou maintenir sa composition spécifique.
- Anticiper la production et la maximiser.
- Augmenter la valeur et les dimensions des produits.

Le type de dépressage, d'éclaircie ou de dégagement peut affecter tous ces aspects, notamment par la fréquence et l'intensité de l'éclaircie, l'intervention à différents stades de développement du peuplement, les critères de sélection. Mais il impacte surtout deux caractéristiques essentielles du peuplement, à savoir sa composition spécifique, ainsi que sa structure verticale et horizontale (Jactel *et al.*, 2009). Afin de faciliter la compréhension, nous utiliserons désormais le terme *éclaircie* pour nous référer à cet ensemble de traitements sylvicoles.

La **fréquence** et l'**intensité de l'éclaircie** auront un effet sur la réaction au traitement, tant sur les arbres dominants restants que sur la végétation des autres strates. Des interventions moins intenses mais plus fréquentes donneront une réaction plus lente mais soutenue dans le temps. En revanche, des interventions plus poussées donneront lieu à des réactions plus brusques qui pourront même être négatives, selon le tempérament des essences (c'est le cas, par exemple, d'essences tolérantes réagissant mal à une brusque mise en lumière).

Le stade du **cycle de développement** au cours duquel on intervient a aussi son importance sur cette réaction. En termes généraux, les tiges les plus jeunes résistent mieux, bien qu'à ce sujet il existe des différences entre espèces. Certaines essences, en particulier celles qui ont le plus de tolérance et de longévité, conservent une capacité de réaction élevée jusqu'à des âges plus avancés.

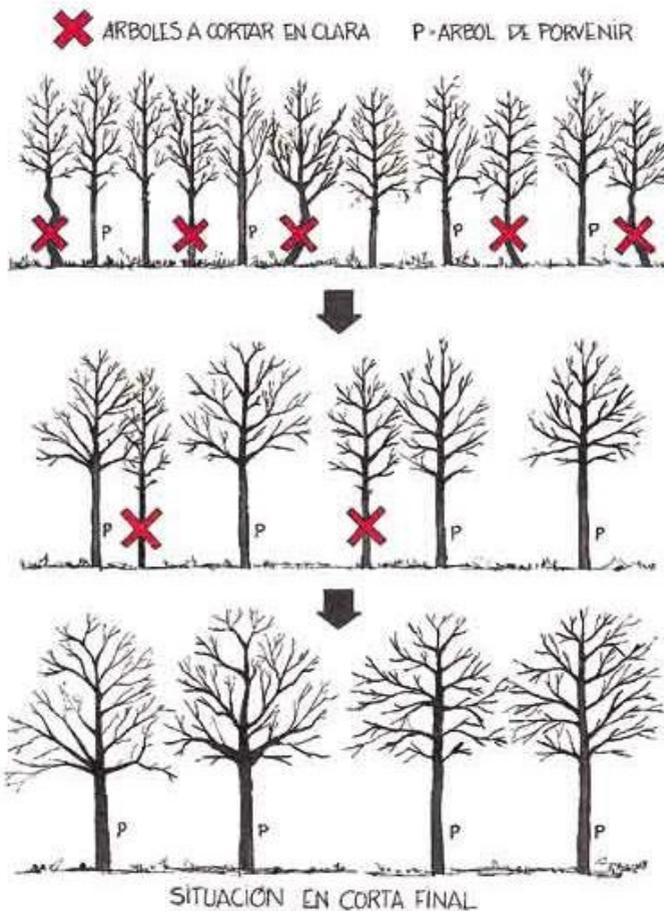


Figure 1 Schéma illustratif du traitement sylvicole d'éclaircies tout au long du développement du peuplement entre les phases de bas-perchis et haut-perchis. Source : *Manual de selvicultura del castaño en Galicia* (Álvarez et al., 2000)

Les **critères de sélection** sont le facteur qui affectera le plus la structure et la composition du peuplement à venir.

L'un de ces critères est celui des classes sociologiques du peuplement. En ce sens, une sélection classique d'éclaircie par le bas, qui n'affecte presque exclusivement que les tiges dominées et submergées, donnera une structure verticale plus régulière et homogène ; alors qu'une éclaircie par le haut qui n'affecte que les tiges dominantes et codominantes donnera une structuration plus irrégulière et hétérogène.

Un autre critère de sélection est celui de la vigueur ou de l'état de santé des arbres individus. Une sélection des tiges les plus vigoureuses renforcera la vigueur générale du peuplement, mais entraînera une certaine homogénéisation, en perdant des éléments singuliers qui peuvent être porteurs d'intérêt pour la création de micro-habitats propices à la biodiversité. Quant au critère de sélection spécifique, il impactera sans aucun doute la composition future du peuplement et sa structure, les essences présentes ayant des caractéristiques morphologiques différentes.

Enfin, citons le critère de sélection dans l'espace. Selon que les tiges à éliminer sont réparties de façon homogène ou regroupée dans l'espace, la structure et la composition du peuplement en résultant seront clairement différentes. Ce critère se traduit par exemple par l'apport de lumière à des arbres individuels, ou à des bosquets de régénération, d'espèce identique ou différente.

2.1.2 Les traitements par éclaircie, un mécanisme d'adaptation

La sylviculture pour l'adaptation au changement climatique est la réponse technique aux impacts constatés et attendus du changement climatique sur nos forêts. Elle inclut un ensemble d'interventions dont les objectifs sont (García-Güemes y Calama, 2015) :

- Réduire la vulnérabilité des forêts aux impacts dérivés des nouvelles conditions climatiques ;
- Renforcer la résilience et la capacité d'adaptation des forêts en garantissant, quel que soit le cas, l'atteinte des objectifs définis pour la gestion forestière dans ces nouveaux scénarios (Lindner *et al.*, 2010)

À partir de ces deux idées générales, la sylviculture d'adaptation définit une série de principes qui se traduisent par certaines pratiques applicables, pour la plupart, au moyen de traitements par éclaircies et dépressages. En d'autres termes, ces traitements sylvicoles peuvent être réalisés dans le but de renforcer certaines caractéristiques déterminées favorables à l'adaptabilité des forêts au changement climatique.

En général, les éclaircies augmentent la vigueur individuelle des arbres restants, toutes essences confondues, qui coexistent et peuvent jouer un rôle important pour atténuer les effets prolongés de la sécheresse et des vagues de chaleur. Dans ce contexte, la pratique des éclaircies peut amortir les effets du changement climatique dans la zone, en réduisant la mortalité naturelle des arbres sur pied, en contrôlant la compétition pour les ressources souterraines, en augmentant la résistance à la faible humidité du sol, et en améliorant la récupération les années qui suivent une

période sèche (Garber et Maguire, 2004; Martin-Benito *et al.*, 2010; De-Dios-García *et al.*, 2015; del Campo *et al.*, 2019b).

À titre d'exemple, les éclaircies peuvent soulager le stress dû à la sécheresse et stimuler la capacité de récupération de croissance des arbres restants sur la limite d'altitude inférieure d'espèces de montagne requérant beaucoup d'eau, comme le *Pinus sylvestris* (Ameztegui *et al.*, 2017).

La même observation a été faite :

- sur la limite de distribution supérieure de *Pinus nigra*, qui domine dans les conditions de montagne plus douces (Marqués *et al.*, 2016) tree growth could be enhanced in temperature-limited high elevations, whilst it might decline at water-constrained low elevations. Species differential responses could, however, modulate the impact of drought on forests along altitudinal gradients. To test for evidence of species differential drought impacts along an altitudinal gradient, we studied the growth responses of two Iberian pine species (*Pinus sylvestris* and *Pinus nigra* ;
- dans le cas des peuplements mixtes *Pinus-Quercus* sur des stations subméditerranéennes ;
- ou encore sur des peuplements purs de *Quercus* méditerranéens, où les éclaircies stimulent la croissance radiale et améliorent le bilan hydrique ; y compris lors d'épisodes de sécheresse extrême (Aldea *et al.*, 2017; del Campo *et al.*, 2019a; Vicente *et al.*, 2018).

Si elles soulagent le stress hydrique, les éclaircies ont aussi prouvé qu'elles sont un outil puissant de gestion pour réduire le combustible forestier (Jactel *et al.*, 2011; Canellas *et al.*, 2004; Crecente-Campo *et al.*, 2009). Cet élément est essentiel pour la pérennité des forêts dans le contexte de changement climatique, où l'on prévoit une augmentation de la sévérité et de la récurrence des grands incendies de forêt (Lindner *et al.*, 2010). Une des règles fondamentales pour gérer le combustible forestier est de réduire la densité du houppier pour minimiser la probabilité d'un feu de houppier. Les éclaircies, en particulier celles par le bas, sont très utiles pour réduire le risque et l'intensité de ce type de feux à court terme (Peterson *et al.*, 2005; Agee et Skinner, 2005).

On connaît aussi l'effet positif des éclaircies sur la stabilité du peuplement face aux perturbations liées au vent et à la neige (Cameron, 2002), de plus en plus fréquentes et intenses (Schelhaas *et al.*, 2010). Cette amélioration vient de la réduction de l'élancement, d'une meilleure conformation des houppiers et est la conséquence de la réduction de la concurrence, d'un approfondissement des systèmes racinaires. Il est néanmoins nécessaire de tenir compte du fait que les éclaircies très intenses appliquées sur des peuplements très denses peuvent avoir un effet déstabilisant à court terme, surtout à cause de l'augmentation de la pénétrabilité du vent dans le peuplement (Quine *et al.*, 1995).

Comme indiqué plus haut, les éclaircies permettent au gestionnaire d'influencer la composition spécifique du peuplement, en favorisant les espèces les mieux adaptées aux nouvelles conditions ou, simplement, en promouvant la diversité de groupes fonctionnels pour donner des peuplements plus résilients. Il faut toutefois garder à l'esprit que l'intensité et les caractéristiques de l'intervention doivent respecter les exigences écologiques des espèces à favoriser, et s'adapter aux conditions environnementales locales. Par exemple, des éclaircies trop intenses sur des sites

enclins à la sécheresse peuvent gêner la régénération ou le développement d'individus juvéniles car, dans ces cas, l'effet de protection de la canopée sur la strate inférieure est essentiel pour la survie de plantules et d'arbres jeunes (Ledo et al., 2014; Barbeito et al., 2008; Manso et al., 2012; Martín-Alcón et al., 2015)

Comme tout autre traitement sylvicole, les éclaircies facilitent les infections par les pathogènes ou les parasites, qui peuvent ensuite affecter le peuplement restant. Cependant, elles améliorent d'une manière générale la vigueur individuelle des arbres restants, réduisant ainsi leur sensibilité à un bon nombre de parasites et de pathogènes forestiers. En outre, en encourageant la diversité spécifique et de structure au moyen d'éclaircies, on contribue à augmenter la résistance et la résilience du peuplement à ces agents biotiques (Jactel *et al.*, 2009).

En synthèse, les éclaircies peuvent favoriser l'adaptabilité des forêts au changement climatique à travers les processus suivants (García-Güemes y Calama, 2015) :

- **Augmentation de la diversité inter et intraspécifique** : Une base génétique et spécifique ample permet de meilleures résistance, résilience, et capacité adaptative face aux altérations climatiques. En effet, on élargit alors la gamme de conditions écologiques compatibles avec la présence d'un couvert forestier. De même, une large diversité intra et interspécifique permet de sélectionner de manière naturelle les individus les mieux adaptés aux nouvelles conditions.
- **Augmentation de la diversité structurelle** : Les différents groupes de taille ou d'âge présentent un niveau de sensibilité ou de vulnérabilité différent face à une atteinte biotique ou abiotique. Favoriser la diversité de tailles, de morphologies et d'âges au moyen d'éclaircies apporte plus de résistance et de résilience face à la plupart des perturbations qui affectent nos forêts.
- **Augmentation de la résistance individuelle aux agents biotiques et abiotiques** : La réduction régulière de la densité augmente progressivement la superficie de croissance potentiellement disponible pour chaque individu. Cela permet à chaque individu d'atteindre son plus haut potentiel de croissance et de développement, donc la plus grande vigueur, en réduisant sa vulnérabilité et en augmentant sa capacité adaptative aux changements climatiques.
- **Promotion/accélération de changements de structures ou d'essences** : L'aggravation du déficit hydrique peut diminuer la vigueur des arbres et provoquer des phénomènes de dépérissement et/ou de mortalité massive, associés à l'interaction de la sécheresse et d'agents pathogènes ou parasites. Cette circonstance peut s'avérer particulièrement critique dans les zones où la végétation se trouve à la limite de son habitabilité. Dans une approche adaptative, il est nécessaire de promouvoir le changement de structures et d'essences de manière proactive, en encourageant l'introduction et la progression des espèces et des variétés les mieux adaptées aux futures conditions du peuplement.

García-Güemes et Calama (2015) indiquent qu'il est essentiel d'intégrer que la mise en place d'une sylviculture recherchant l'adaptation demande un assouplissement du programme de gestion. Dans ce contexte, les concepts classiques de gestion forestière perdent du poids. A titre

d'exemple, citons les rotations de renouvellement du peuplement forestier, la planification d'interventions à moyen et long terme (ex : programmes d'éclaircies), ou encore la détermination a priori de la qualité des produits forestiers (volume de bois à extraire afin de garantir la rentabilité maximale et le renouvellement du peuplement).

L'idée d'une sylviculture beaucoup plus ciblée dans l'espace et dans le temps prend donc de l'ampleur (Puettmann *et al.*, 2013).

Cette sylviculture devra s'appuyer sur le choix du meilleur moment pour intervenir, de manière à permettre une réponse rapide à une perturbation défavorable ou à un événement favorable (sylviculture d'adaptation réactive). Par ailleurs, il convient d'être suffisamment flexible pour pouvoir répondre à une large et incertaine gamme de conditions climatiques à venir (sylviculture d'adaptation proactive). Le but de cette sylviculture sera d'orienter le peuplement vers un état compatible avec une large gamme d'états finaux objectifs.

2.1.3 Le cas particulier des peuplements mixtes de *Pinus* et *Quercus* régénérés après incendie dans le contexte subméditerranéen

Les forêts de Chênes méditerranéens ont, en général, une grande capacité de rejet, et par conséquent une grande résilience face à bon nombre de perturbations. Tirant parti de cette capacité, elles ont été traitées au cours de l'histoire par des coupes très fréquentes pour la production de bois, de charbon végétal et pour l'obtention de pâturages. Les *Quercus pubescens* et/ou *Quercus faginea* des montagnes des Pré-Pyrénées sont un bon exemple de ce type de formations. Le traitement appliqué sur ces peuplements a longtemps été celui du taillis régulier, avec des rotations de 15 à 30 ans, et sans application de traitements partiels ou intermédiaires.

Néanmoins, l'abondance actuelle de ces chênaies dans la montagne méditerranéenne pourrait être très inférieure à celle d'époques antérieures (Carrión *et al.*, 2000). Sur une bonne partie de la surface potentiellement apte à ces essences, les pratiques associées au pâturage intensif, prolongées durant des décennies ou même des siècles, ont maintenu des formations très ouvertes ou transformées en pâturages, composées de quelques tiges de grande taille et âgées, essentiellement de *Pinus* et *Quercus*, pratiquement sans régénération. Ces peuplements, dont nous avons encore quelques vestiges, ont pu être maintenus artificiellement durant de longues périodes à travers des usages pastoraux dans de vastes zones de la montagne méditerranéenne.

La longue histoire d'usages anthropiques intensifs dans la montagne méditerranéenne a atteint son apogée à la fin du XIX^{ème} siècle et au cours de la première moitié du XX^{ème} (Garcia-Ruiz *et al.*, 1996). Des changements socio-économiques importants, pendant la seconde moitié du XX^{ème} siècle ont mené à l'abandon généralisé de terres dans des zones marginales, à l'abandon, ou du moins à une réduction drastique du pâturage, et à l'intensification de l'utilisation de la terre dans les grandes vallées et les régions côtières. Ces changements ont donné lieu à des processus de croissance et de densification des peuplements forestiers dans des zones de montagne. Dans la majorité des cas qui nous intéressent, ils ont entraîné une occupation progressive des espaces ouverts par les espèces pionnières (i.e. les Pins). C'est ainsi que se sont formées, à l'abri des anciennes

formations occupées par des arbres sources de semences, des pinèdes fournies comme celles dominées par le *Pinus nigra* ssp. *salzmannii* et le *Pinus sylvestris* dans de nombreuses montagnes des Pré-Pyrénées (Lasanta-Martinez *et al.*, 2005; Vicente-Serrano *et al.*, 2005).

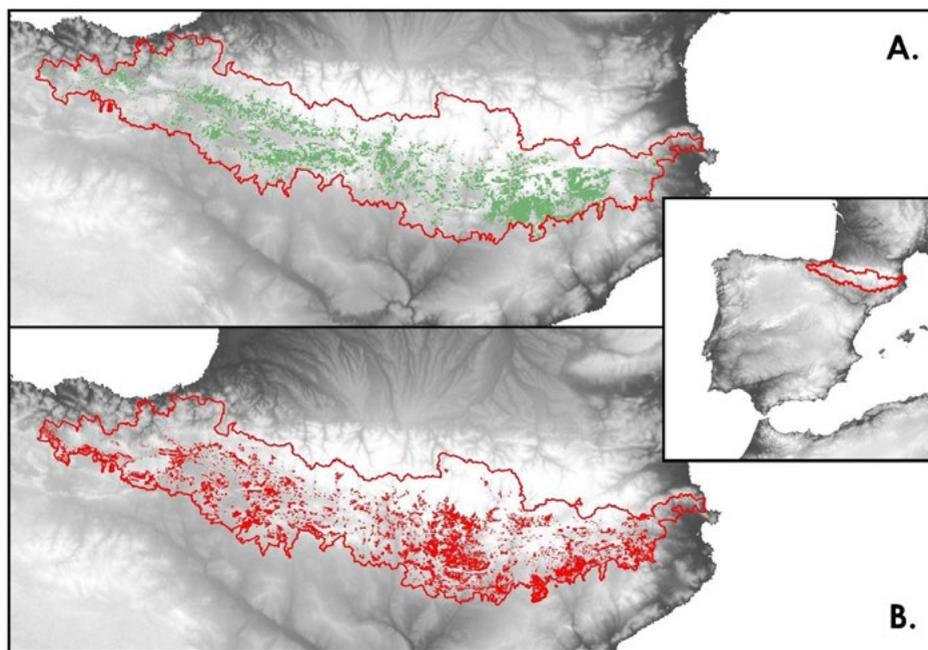


Figure 1 Répartition de la dominance des pinèdes de *Pinus nigra* ou *Pinus sylvestris* (A) et des chênaies de *Quercus pubescens* ou *Quercus faginea* (B) à l'étage sous-méditerranéen de la zone pyrénéenne en Espagne. Source : Mapa Forestal de España ed. 20155.

Ces nouvelles cohortes de pinèdes ont atteint progressivement des phases de développement plus avancées (i.e. bas-perchis et haut-perchis), et ont amélioré les conditions microstationnelles (i.e. de sol et microclimat). Ces éléments ont donné lieu à une colonisation du sous-bois, encore active à ce jour, par des arbustes et des essences d'arbres à des stades de succession écologique plus avancés, surtout des essences de *Quercus* (Urbieta *et al.*, 2011 ; Martín-Alcón *et al.*, 2015) southern Spain. Ces essences sont considérées en général intolérantes ou de tolérance moyenne à l'ombre, mais elles requièrent toutefois un certain ombrage durant leur période d'établissement, en particulier lorsqu'elles croissent dans des conditions climatiques stressantes (Lookingbill y Zavala, 2000 ; Broncano *et al.*, 1998).

Une autre perturbation, les grands incendies de forêts, rend en ce moment aux chênaies le caractère dominant qu'elles avaient perdu sur de vastes étendues. Ce fut déjà le cas auparavant dans l'histoire de ces systèmes, ainsi que le rapportent les analyses polliniques existantes (Carrion *et al.*, 2000). Malgré la fréquence des grands incendies dans la forêt méditerranéenne avant le Quaternaire, ils sont relativement nouveaux dans l'histoire récente de nos forêts (Pausas *et al.*, 2008). Les grands incendies ont affecté récemment de grandes surfaces dominées par des essences du

genre *Pinus* peu aptes à les contrecarrer (i.e. *Pinus nigra* ou *Pinus sylvestris*), donnant lieu à des changements de végétation importants vers des formations dominées par des essences du genre *Quercus* (Martín-Alcón y Coll, 2016 ; Puerta-Piñero *et al.*, 2012 ; Rodrigo *et al.*, 2004).



Figure 1 Images de chênaies de *Quercus pubescens* et *Quercus faginea* ressurgies après incendie dans d'anciens peuplements dominés par *Pinus nigra*, et avec une présence variable de régénération de cette essence. Hiver 2014, 15 ans environ après l'incendie. Source : FiDBosc-CTFC.

À ce jour, il existe dans la montagne méditerranéenne une surface non négligeable de chênaies et autres bois de quercinées qui ont colonisé des surfaces dominées par les Pins avant l'incendie. Ces chênaies, où se trouvent également les Pins régénérés sur les bords de l'incendie et des îlots non brûlés (Gracia *et al.*, 2002 ; Sánchez-Pinillos *et al.*, 2018), doivent être gérées correctement pour assurer la stabilité de la forêt à moyen et long terme.

Conformément aux traitements décrits plus haut, la sylviculture pour l'adaptation au changement climatique dans ces peuplements devra suivre les lignes directrices suivantes :

- **Augmentation de la diversité inter et intraspécifique** : Favoriser dans tous les cas le mélange d'essences, en dégageant les individus d'essences moins représentées et ceux présents sporadiquement. A l'identique, lorsque cela est possible, favoriser les éléments singuliers de chaque essence (i.e. des individus à singularités morphologiques, physiologiques ou phénologiques apparentes).
- **Augmentation de la diversité structurelle** : Sélectionner les individus d'avenir de manière à favoriser la diversité de tailles, de morphologies et d'âges. Intervenir avec une inten-

sité variable, de manière à créer des espaces et des groupements d'arbres aux caractéristiques différentes dans tout le peuplement.

- **Augmentation de la résistance individuelle à des agents biotiques et abiotiques :** Réduire la concurrence entre les individus d'avenir, afin d'augmenter la surface de croissance potentiellement disponible, et donc leur vigueur.
- **Promotion/accélération de changements de structures ou d'essences :** Favoriser l'entrée et le développement d'éléments qui, du fait de leurs exigences écologiques, peuvent être mieux adaptés à un fourchette future de conditions comme le sapin (*Quercus ilex*) ou le pin d'Alep (*Pinus halepensis*) dans le contexte des peuplements mixtes de *Pinus* et *Quercus* méditerranéens.

2.2 ADAPTATION DU DIAMETRE D'EXPLOITABILITE

2.2.1 Dans quel cas l'adaptation du diamètre d'exploitabilité est-elle pertinente ?

Il est important d'intégrer le fait que l'âge des arbres est un des principaux facteurs de vulnérabilité au stress hydrique. L'adaptation du diamètre d'exploitabilité peut s'envisager, en fonction des caractéristiques du peuplement et des conditions technico-économiques, principalement dans deux cas.

2.2.1.1 Cas des dépérissements constatés (ou vulnérabilité future) ne remettant pas en cause le choix de l'essence objectif

La question de l'adaptation du diamètre d'exploitabilité se pose lorsque l'essence objectif peut être maintenue, mais qu'un risque de dépérissement est avéré ou probable avant d'avoir atteint le diamètre d'exploitabilité. Dans ce cas, le gestionnaire forestier considère que, malgré la vulnérabilité, il sera possible de renouveler le peuplement et de continuer avec la même essence objectif, quel que soit le traitement.

Pour atténuer le risque de dépréciation, le choix est alors pris de réduire le diamètre d'exploitabilité.

2.2.1.2 Cas des peuplements peu mélangés en essence et sans possibilité technique ou financière de réaliser une transformation par plantation

Dans certains cas, bien que l'analyse d'un peuplement puisse montrer qu'un changement d'essence objectif par plantation serait souhaitable, il est impossible techniquement ou non rentable financièrement de réaliser la plantation. Réduire le diamètre d'exploitabilité peut être une solution de compromis à envisager lorsqu'il est impossible de choisir une autre essence en mélange.

2.2.2 Le principe théorique de l'adaptation du diamètre d'exploitabilité en fonction du risque

2.2.2.1 Analyse technico-économique sans prendre en compte le facteur risque

Le choix d'un diamètre d'exploitation est le résultat d'une analyse technico-économique incluant :

- L'accroissement en volume et en diamètre des peuplements selon la fertilité,

- Le prix de vente en €/m³ incluant la qualité technologique escomptée des peuplements,
- Les dépenses réalisées au cours de la vie du peuplement,
- Les conditions d'exploitation.

Avec les risques liés aux dépérissements (sécheresse, canicule) et aux tempêtes, il faut également prendre en compte le facteur risque dans l'analyse technico-économique.

Il existe différentes méthodes pour déterminer un âge d'exploitabilité optimal. Toutes les méthodes intègrent l'âge et non le diamètre du peuplement. Par conséquent, nous considérerons ici l'âge à sylviculture constante, pour pouvoir transposer la démonstration sur les diamètres.

La méthode la plus couramment utilisée est le Bénéfice Actualisé en Séquence Infinie (BASI), ou critère de Faust Mann (1849). Pour optimiser le choix de l'âge d'exploitabilité, il faut alors maximiser le BASI.

La formule du BASI est la suivante :

$$\text{BASI} = \sum_{a=0}^n \frac{(R_a - D_a)(1+r)^{n-a}}{(1+r)^n - 1}$$

Avec :

- a, l'âge du peuplement, variant de 0 à n,
- R_a, le revenu à l'âge a,
- D_a, la dépense à l'âge a,
- r, le taux d'actualisation (fixé généralement autour de 3%).

Il suffit alors de prendre la valeur de « a » pour laquelle le BASI atteint son maximum. Cette valeur correspond à l'âge optimum d'exploitabilité :

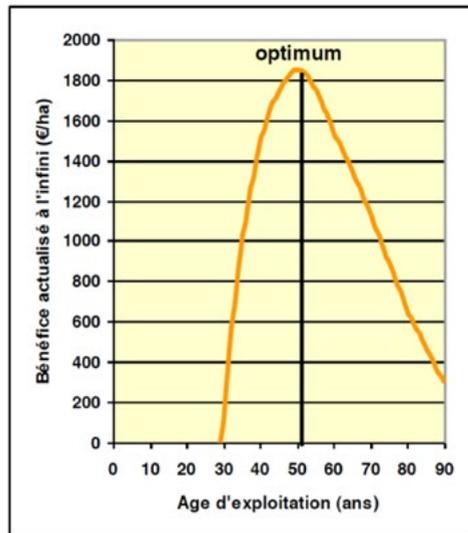


Fig. 1 : Evolution du BASI en fonction de l'âge. Exemple du pin maritime (Peyron, 2014)

Cette approche part de l'hypothèse que les accroissements et les prix sont connus avec certitude à l'avance. Elle permet d'avoir une vision pertinente de l'optimum économique de la récolte, mais elle n'intègre pas le facteur risque.

2.2.2.2 Analyse technico-économique intégrant le facteur risque

Reed (1984), introduit la notion de risque dans le calcul de l'optimisation du BASI. Il a travaillé sur le risque d'incendie, supposé indépendant de l'âge du peuplement.

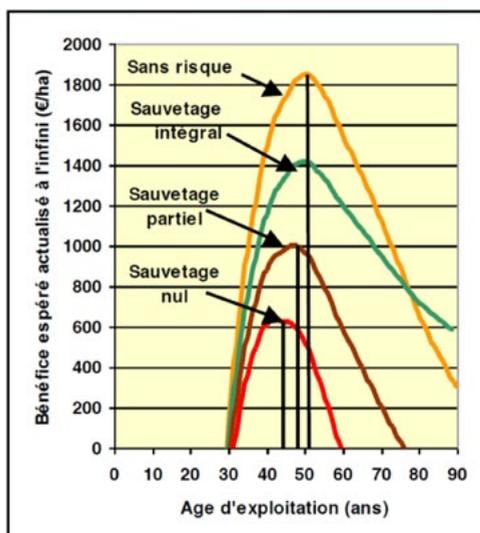
Pour caractériser l'aléa, deux paramètres :

- la probabilité I , moyenne d'occurrence annuelle (indépendante de l'âge),
- le sauvetage, valeurs des bois sinistrés que l'on récupère après l'aléa. Le sauvetage peut être intégral (totalité des bois sinistrés vendus sans décote), partiel ou nul (aucun revenu des bois sinistrés).

Plus concrètement, l'impact de l'introduction du risque sur la durée optimale de la révolution revient à une hausse du taux d'actualisation de r à $r+\lambda$ dans le critère de Faustmann (cf. ci-dessus). Cela induit le fait que plus le temps passe et plus le coût du risque alourdit le coût d'origine.

Logiquement, le bénéfice espéré diminue lorsqu'on introduit la notion de risque, mais lorsque le sauvetage est intégral, l'optimum d'exploitation n'est quasiment pas modifié. En revanche, et c'est le cas lorsqu'il s'agit d'un épisode de dépérissement après sécheresse/canicule, l'âge optimum baisse d'autant plus que le sauvetage des bois est faible.

Fig. 2 : Effet de la prise en compte du risque et du sauvetage sur l'âge d'exploitabilité et la valeur de la forêt. Exemple du pin maritime (Peyron, 2014)



Reed a travaillé sur le risque incendie dont l'occurrence est indépendante de l'âge. Le problème est traité dans une perspective analytique, par une équation (voir le graphique ci-dessus comme

exemple). Cette approche simplifiée permet de comprendre le mécanisme en lien avec l'âge d'exploitabilité.

Or, la réalité est plus complexe. Le risque de dépérissement après un épisode de sécheresse/canicule dépend effectivement de l'âge : plus le peuplement est âgé et plus il est sensible. Donc le risque lié à la sécheresse/canicule réduit davantage l'âge d'exploitabilité que s'il s'agissait d'un aléa indépendant de l'âge.

La résolution mathématique pour déterminer l'âge optimal ne se fait alors plus de façon analytique, mais suivant une méthode itérative numérique permettant d'approcher le résultat. Le constat est alors le même, bien que non visualisable au travers d'une équation :

- plus la probabilité d'occurrence de l'aléa est grande, et plus l'âge d'exploitabilité diminue (d'autant que la sensibilité à la sécheresse/canicule est liée à l'âge),
- plus le sauvetage possible est faible et plus l'âge d'exploitabilité diminue.

Un point important à retenir est qu'il ne s'agit pas de dire ici que l'on consent un sacrifice d'exploitabilité en cas de risque. En réalité, le risque de dépérissement entraîne un abaissement de l'optimum d'exploitabilité. L'objectif est donc bien de se recalculer sur des choix optimaux, intégrant les risques.

2.2.3 Les conséquences pratiques sur le choix du diamètre d'exploitabilité en fonction du risque

L'approche théorique permet de mettre en relief de façon objective les critères influençant le choix des diamètres d'exploitabilités :

- La probabilité d'occurrence d'un aléa sécheresse/canicule entraînant des dépérissements et mortalités,
- Le sauvetage, c'est-à-dire le revenu que l'on peut obtenir en vendant les bois sinistrés. A priori, plus l'épisode climatique est sévère (perte rapide de qualité des bois) et étendu géographiquement (marché du bois saturé), et plus le sauvetage sera faible.

Il s'agit d'établir concrètement comment ces conclusions peuvent modifier les diamètres d'exploitabilité. Attention ! Ces **indications ne remettent pas en cause les cadrages déjà en vigueur** sur les Pyrénées en France, en Espagne ou en Andorre, et dans une forêt publique ou privée ; c'est une approche parallèle qui permet de définir les orientations possibles.

2.2.3.1 Cas particulier de la futaie régulière

En futaie régulière, il est important de prendre pour référence le diamètre dominant (diamètre moyen des 100 plus grosses tiges) afin de raisonner sur le diamètre du peuplement final, mais aussi d'éviter de prendre en compte les cas de surdensité qui faussent la réflexion.

Les diamètres d'exploitabilité peuvent alors être revus selon les critères suivants :

Adaptation du diamètre d'exploitabilité	Dépérissement observé et/ou peuplement estimé fortement vulnérable*	Pas de dépérissement observé ou peuplement estimé moyennement vulnérable*
Feuillus**	Retenir un diamètre d'exploitabilité inférieur de 5-10cm, voire 15cm pour les plus gros diamètres	Retenir un diamètre d'exploitabilité inférieur de 0-5cm, voire 10cm pour les plus gros diamètres
Résineux**	Retenir un diamètre d'exploitabilité inférieur de 10-15cm	Retenir un diamètre d'exploitabilité inférieur de 5-10cm

* La notion de vulnérabilité est à estimer à partir des cartes de vulnérabilité de l'action « Diagnostiquer »

** Le choix de la fourchette haute ou basse du diamètre est à estimer à partir de la résilience potentielle du peuplement (Cf méthode ARCHI)

Pour les essences à durée de régénération longue (ex : sapin pectiné), il est nécessaire de commencer la régénération de façon très précoce pour laisser le temps au peuplement de se régénérer sans avoir à faire face à des dépérissements massifs. Le diamètre d'exploitabilité à retenir dans la fourchette basse des diamètres possibles.

Bien évidemment, en cas de dépérissement généralisé, le peuplement sera récolté quel que soit le diamètre, et à condition d'être commercialisable.

2.2.3.2 Cas particulier de la futaie irrégulière

En futaie irrégulière, le renouvellement est diffus et il n'y a pas de contrainte liée à la durée de régénération telle qu'évoquée au paragraphe précédent. En cas de dépérissement rapide des plus gros arbres, des semenciers seront toujours présents pour assurer le renouvellement.

En revanche, en cas de risque, il est tout autant nécessaire de baisser le diamètre d'exploitabilité optimal, car la perte de valeur potentielle est la même.

Adaptation du diamètre d'exploitabilité	Dépérissement observé et/ou peuplement estimé fortement vulnérable*	Pas de dépérissement observé ou peuplement estimé moyennement vulnérable*
Feuillus**	Retenir un diamètre d'exploitabilité inférieur de 5-10cm, voire 15cm pour les plus gros diamètres	Retenir un diamètre d'exploitabilité inférieur de 0-5cm, voire 10cm pour les plus gros diamètres
Résineux**	Retenir un diamètre d'exploitabilité inférieur de 10-15cm	Retenir un diamètre d'exploitabilité inférieur de 5-10cm

* La notion de vulnérabilité est à estimer à partir des cartes de vulnérabilité de l'action « Diagnostiquer »

** Le choix de la fourchette haute ou basse du diamètre est à estimer à partir de la résilience potentielle du peuplement (Cf méthode ARCHI)

2.2.3.3 Cas particulier du taillis

Dans ce cas, vu les diamètres considérés souvent faibles (15 à 25cm), changer de catégories de diamètre (-5 à -15cm) n'a pas vraiment de sens.

En cas de risque de sécheresse/canicule avéré sur un taillis, il est alors nécessaire d'estimer l'âge du taillis. Un âge limite d'exploitation inférieur est alors fixé, pour ne pas dépasser un âge jugé trop risqué.

Il n'y a pas de critères d'âge limite pour le taillis car les cas peuvent être très divers. L'âge limite est à estimer au cas par cas.

2.2.4 Vers une nécessité d'associer le diamètre et l'âge comme optimum de récolte ?

Le diamètre est le paramètre le plus couramment utilisé pour qualifier la maturité d'un peuplement. Ce choix est logique car il correspond à un critère de commercialisation incontournable.

Cependant, à essence, contexte stationnel et diamètre égaux, un peuplement plus âgé sera plus sensible à l'aléa sécheresse/canicule. Il faut donc intégrer la notion d'âge limite optimal, surtout pour les peuplements ayant été conduits en surdensité tout au long de leur cycle sylvicole.

Il n'est pas fait référence ici aux âges limites optimaux par essence et contexte, car ce serait trop compliqué voire impossible. En revanche, il est fortement recommandé de mener l'analyse sur l'âge parallèlement au choix du diamètre, pour définir un couple « diamètre optimum / âge limite », lorsque les critères d'exploitabilité doivent être revus pour un peuplement à risque.

2.3 CHOIX DES ESSENCES ET DES PROVENANCES LORS DES PLANTATIONS

2.3.1 Les Bases écologiques

La répartition des espèces végétales est déterminée par leurs exigences autoécologiques. En effet, chaque essence arborée occupe une niche écologique spécifique définie notamment par des conditions édaphiques, thermiques et hydriques déterminées (Piedallu *et al.*, 2013, Piedallu *et al.*, 2016). Ceci explique notamment l'étagement des essences forestières en montagne. Le réchauffement climatique risque cependant de remettre en cause les écosystèmes forestiers actuels et de perturber ces niches écologiques et les équilibres compétitifs entre espèces (Legay, 2014, Le-noir *et al.*, 2008). De telles modifications ont déjà pu être constatées, par exemple, dans le massif de Montsény en Catalogne (Peñuelas et Boada, 2003), dans le massif de la Sainte-Baume en Provence-Alpes-Côte d'Azur (Vennetier *et al.*, 2007), pour le cèdre dans le Moyen-Atlas (Mátyás, 2010) ou encore le hêtre dans le sud-ouest de la Hongrie (Mátyás *et al.*, 2010).

Bien que les espèces soient capables de migrer pour suivre leur niche écologique, une crainte perdue quant à la capacité des arbres - immobiles et longévifs - à se disperser aussi vite que le

climat évolue (Bertrand *et al.*, 2011) surtout dans un paysage fragmenté où forêt, agriculture et urbanisation se côtoient et entrent en concurrence (Legay, 2014).

En réponse, certains forestiers envisagent de planter des essences moins vulnérables face aux conditions climatiques à venir. Du point de vue sylvicole, l'objectif recherché est de maintenir l'état sanitaire et la productivité des peuplements forestiers qui assurent, au sein d'un territoire, un rôle économique et social majeur (Mueller et Hellmann, 2008, Sáenz-Romero *et al.*, 2016). Cette approche correspond à la mise en application du concept de migration assistée qui s'est fortement développé à partir des années 2000. Il s'agit du déplacement d'espèces entrepris par l'Homme dans le but d'anticiper les effets du changement climatique. Ste-Marie *et al.* (2011) proposent ainsi une terminologie qui définit trois niveaux de migration assistée :

2.3.1.1 Migration assistée des populations

Au sein d'une même essence, les individus ont une certaine plasticité phénotypique ou physiologique (Riou-Nivert, 2014) qui peut être de nature adaptative (Nicotra *et al.*, 2010). Ceci explique l'existence de sous-espèces ou d'écotypes différents au sein d'une même essence. Au moment de la plantation, il est donc important de bien choisir la provenance selon les caractéristiques pédoclimatiques actuels mais en fonction aussi des évolutions ultérieures escomptées.

2.3.1.2 Expansion assistée de l'espèce

Déplacement anticipé des espèces vers des zones se trouvant en bordure de leurs aires de distribution actuelles de sorte à faciliter et à accélérer les processus naturels de migration.

2.3.1.3 Migration assistée « longue-distance »

Introduction d'essences non autochtones dans des territoires inaccessibles à la dispersion naturelle. Le choix se portera alors sur des essences supposées mieux adaptées et résistantes aux conditions climatiques futures.

2.3.2 Une méthode sujette à débats

La méthode de migration assistée n'est ni « sans risque » ni « garante de succès ». Les conséquences inattendues augmentent avec la distance de migration. La méthode suscite donc un vif débat autour de plusieurs risques : risques liés à l'inaction, risque d'échec des plantations et risque d'espèces nouvellement invasives (Mueller et Hellmann, 2008).

Ainsi, si le choix des provenances semble le moins risqué, le recours à des essences exotiques doit toutefois faire l'objet d'expérimentations dès aujourd'hui afin de préciser leur adaptabilité, leurs capacités de production voire leurs potentiels d'invasion. Ce risque d'invasion biologique est particulièrement difficile à prédire puisqu'il peut prendre des décennies. Il peut cependant altérer des processus écologiques importants (cycle des éléments minéraux, hydrologie, dispersion des graines, hybridation...) et n'est donc pas négligeable.

A l'inverse, l'introduction d'espèces dans un nouvel écosystème n'est pas toujours couronnée de succès et nombreuses sont les plantations ratées pour des raisons diverses. En effet, hors les

conditions climatiques, de nombreuses autres interactions régissent la répartition des espèces, telles que la concurrence entre espèces, les associations trophiques ou encore symbiotiques... Par exemple, pour leur germination et leur croissance, les espèces d'arbres présentent de nombreuses associations mycorhiziennes (Schwartz *et al.*, 2006).

Au regard des risques évoqués ci-dessus, certains préfèrent miser sur le potentiel d'adaptation des espèces via la sélection naturelle d'une part (Ste-Marie *et al.*, 2011) où les effets encore très mal connus de l'épigénétique. En effet, les conditions environnementales peuvent jouer un rôle crucial dans l'expression des gènes sans pour autant en changer la séquence ADN (Kremer *et al.*, 2012, Bräutigam *et al.*, 2013, Alberto *et al.*, 2013, Cortijo *et al.*, 2014). Il est possible que ces effets épigénétiques liés au changement climatique soient profitables à certaines essences déjà en place.

2.3.3 Mise en œuvre de la migration assistée

L'introduction ou l'expansion de nouvelles essences sur de nouveaux territoires supposent donc de bonnes connaissances sur :

- l'autécologie des essences et les paramètres influant leur distribution (Piedallu *et al.*, 2016),
- une analyse précise des causes de mortalité et la part attribuable au changement climatique (Taccoen *et al.*, 2019),
- de bonnes projections climatiques ; celles pour la fin du siècle restant incertaines, il est plus raisonnable de se baser sur les prévisions à moyens termes : 2030-2060 (Sáenz-Romero *et al.*, 2016).

Pour ce faire, il est nécessaire de disposer de tests apportant des données scientifiques et de limiter les échecs de plantations (Sáenz-Romero *et al.*, 2016). Ainsi, à l'image du projet CANOPEE, des tests de plantation de nouvelles essences ou provenances sont expérimentées par exemple via des *arboreta* ou des tests de comportement.

Pour les propriétaires et dans l'idée de minimiser les risques, le principal conseil est de recourir à diverses essences ou aux peuplements mélangés qui offrent des possibilités de substitution en cas d'échec de l'une ou l'autre des essences plantées. Il est notamment très important de planter des essences en station et de s'intéresser de près aux composantes pédologiques pour le choix des essences ; les conditions climatiques risquant de se durcir il est en effet conseillé d'éviter tous stress complémentaires attribuables à des conditions pédologiques limitantes.

2.3.4 L'exemple du sapin, espèce emblématique des Pyrénées

Plusieurs études scientifiques suggèrent une régression des aires de distribution du sapin en réponse au changement climatique (Badeau *et al.*, 2010, Maiorano *et al.*, 2012) tree growth could be enhanced in temperature-limited high elevations, whilst it might decline at water-constrained low elevations. Species differential responses could, however, modulate the impact of drought on forests along altitudinal gradients. To test for evidence of species diffe-

rential drought impacts along an altitudinal gradient, we studied the growth responses of two Iberian pine species (*Pinus sylvestris* and *Pinus nigra*. Cependant, les facteurs anthropiques influent également beaucoup sur la distribution des espèces et notamment des arbres dont certaines essences ont été favorisées ou défavorisées par la sylviculture. Tinner *et al.* (2013) concluent donc que l'utilisation des sols et la sylviculture sont des paramètres très importants à intégrer aux modélisations prédictives notamment en Europe où l'influence des activités anthropiques sur les écosystèmes a débuté il y a plus de 5.000 ans. Ils suggèrent ainsi que la répartition actuelle des essences ne se limite pas à leurs capacités de dispersion (Pearman *et al.*, 2008).

En s'intéressant au sapin, essence emblématique des Pyrénées, Tinner *et al.* (2013) pointent l'intérêt de la diversité génétique et l'existence de populations se développant dans des conditions climatiques considérées comme chaudes pour le sapin. Sont ainsi cités des peuplements de la péninsule italienne où les températures moyennes de juillet sont de 22-23°C (Rovelli, 1995, Carrao *et al.*, 1999). Explorer le potentiel écologique de ces écotypes particuliers peut être particulièrement intéressant à prendre en considération dans les stratégies d'adaptations au changement climatique. Ainsi, ces provenances relictuelles du sud de l'aire du sapin peuvent être intéressantes pour la production de plants.

2.4 RÉDUCTION DU RISQUE D'INCENDIE

Bases techniques et écologiques des traitements de mitigation et d'adaptation au risque d'incendie de forêt.

2.4.1 Les forêts de montagne et le risque d'incendie de forêt

Ces dernières décennies, en conséquence du changement climatique et de la diminution des activités dans les zones de montagne, les forêts ont recolonisé les versants de nombreuses vallées du massif pyrénéen et les forêts existantes se sont densifiées (Camarero et Gutiérrez, 2007). On estime, par exemple, que sur le versant sud des Pyrénées, les pinèdes ont augmenté leur superficie de 8.900 ha entre 1956 et 2006 (Améztegui *et al.*, 2010). Tout cela a fait que les forêts de protection augmentent en surface et qu'elles sont plus efficaces mais, à des cotes élevées ce processus est très lent et très variable, dépendant des conditions climatiques locales (Bebi y Ulrich, 2008). Cette expansion et la densification des forêts a provoqué une augmentation de la continuité horizontale de la végétation dans les zones de montagnes (Sanz-Elorza *et al.*, 2003). La combinaison de ces divers changements a généré une augmentation importante de la charge de combustible dans les forêts du massif ces dernières années, ce qui suppose une augmentation du risque d'incendie de forêt habituellement limité par la présence de combustible (Minnich, 1998). Si, à ce jour, les incendies sont encore relativement réduits dans les Pyrénées, comparés par exemple à ceux de la zone méditerranéenne, le changement climatique pourrait modifier la tendance.



Figure 4 Les canaux d'écoulement d'avalanches n°24 et 25 dans la forêt domaniale de *Restauration des Terrains de Montagne* (RTM), située à l'Hospitalet-Près-l'Andorre, en 1908 à gauche et en 1990 à droite. Source : service RTM de l'Ariège.

D'une manière générale et même si on ne peut faire un pronostic détaillé des nouvelles conditions climatiques avec le changement climatique, on a la quasi-certitude que cela représentera une augmentation des perturbations naturelles risquant de modifier brutalement la structure des forêts. Les nouvelles conditions météorologiques résultant du changement climatique auront des conséquences sur le risque d'incendie qui deviendra plus élevé à cause de la hausse des températures, d'un manque croissant d'eau, et de plus en plus de sécheresse des sols entraînant une augmentation de l'inflammabilité des combustibles vivants et morts. Le changement climatique donnera lieu à une saison d'incendies plus précoce et, dans certains cas, les incendies seront d'une ampleur méconnue (Moreno, 2005). Les nouvelles conditions climatiques affecteront aussi la régénération des forêts pyrénéennes après les incendies. Celle-ci sera en effet plus lente parce qu'il s'agit de forêts à résilience très basse comparée à celle des forêts méditerranéennes ou atlantiques (Díaz-Delgado *et al.*, 2002), et elle sera aussi accentuée à cause d'une diminution de la fertilité du sol (Moreno, 2005).

Les zones de montagne comme les Pyrénées seront plus vulnérables et exposées à un régime d'incendies plus important que l'actuel. L'inflammabilité de la végétation et la période de sensibilité au feu augmenteront et, par conséquent, on peut s'attendre à des incendies plus fréquents, étendus et intenses. Il est donc de plus en plus important de promouvoir une gestion forestière capable de favoriser et d'obtenir des peuplements résistants ou résilients (capables de s'adapter) au changement climatique. Dans le cas des forêts de protection, cela implique la réalisation de travaux sylvicoles destinés à assurer leur rôle protecteur en cas d'un possible incendie.

2.4.2 Traitements de réduction de la continuité et de la charge de combustible forestier

En matière de traitement d'atténuation et d'adaptation au risque d'incendie de forêt, les forêts de protection répondent aux mêmes problématiques que les autres forêts de montagne.

Le principal problème des forêts de montagne est que la propagation du feu augmente avec l'angle qu'offre la surface au front de flammes. La propagation dans le sens du versant est donc rapide et dangereuse. De la même manière qu'il existe une typologie des forêts protectrices, il existe des modèles de combustibles forestiers. Ces modèles se fondent sur la typologie de la structure des combustibles pour expliquer le comportement du feu lors d'incendies de forêt. L'ampleur des incendies de forêt dépend dans une grande mesure de la sévérité du feu qui est, à son tour, très influencée par la quantité de combustible consommé durant l'incendie. Les modèles de combustibles nous fournissent cette information et nous permettent alors d'estimer le comportement du feu dans les différentes formations forestières. Cette estimation se fait plus précisément sur la base de concepts relatifs à la combustion tels que la carte de combustible, la continuité horizontale, la distribution verticale, le tassement, le temps de latence... D'une manière générale, une meilleure connaissance de la charge de combustible permet d'estimer mieux l'exposition et la vulnérabilité de la forêt au risque d'incendie et accroît donc la rentabilité des mesures d'atténuation (Martell, 2001).

Les actions d'atténuation des incendies de forêt consistent à réduire les quantités de combustible et leur continuité, car elles ont une incidence importante sur le comportement de l'incendie (intensité et vitesse de propagation).

Le contrôle de la quantité de combustible se fait surtout au moyen du défrichage mécanique ou manuel du sous-bois et des buissons.

La réduction de la continuité du combustible se fait au moyen d'éclaircies et de dépressages, pour réduire la continuité horizontale ; et de la taille des branches les plus basses des arbres, pour réduire la continuité verticale. Dans ce dernier cas il est recommandé d'éliminer les branches basses jusqu'à un tiers de la hauteur totale ou jusqu'au diamètre maximum des houppiers. Ces actions sont à compléter avec l'élimination des résidus forestiers, de préférence en les triturant, pour éviter l'accumulation de combustible forestier susceptible de brûler en cas d'incendie.

Ces travaux doivent être prévus et planifiés pour éviter que les éclaircies et les dépressages soient faits dans des zones exposées à des vents forts, car il existe le risque de casse et de chute d'arbres, ce qui peut provoquer a posteriori une augmentation du combustible mort après l'intervention. La planification des actions sylvicoles est également importante pour que les travaux se fassent à la bonne époque eu égard à la végétation et pour qu'ils n'affectent pas son état de santé. En ce sens, et vu que les actions sylvicoles peuvent stimuler l'apparition de parasites et de maladies, il est recommandé de ne pas brûler les résidus dans la forêt, et de ne pas abandonner de branches ayant un diamètre supérieur à 6 centimètres sans les triturer.

Du point de vue de la réduction du risque d'incendie on peut envisager l'aménagement d'infrastructures servant d'obstacle à l'avancée du feu tels que les pare-feu. Il faut aussi envisager

l'installation de points d'eau ou promouvoir un réseau de pistes forestières pour faciliter la surveillance de la forêt et une lutte efficace contre les incendies. Le résultat que nous pouvons attendre des actions d'atténuation associées à une meilleure évaluation du risque, et à une bonne surveillance des forêts, est la maîtrise d'une grande partie des incendies de forêts avant qu'ils n'atteignent une envergure excessive.

Dans des zones de montagne comme les Pyrénées, l'idée de lutter contre tous les incendies est techniquement impossible et économiquement irréalisable. Il faut donc déterminer où et quand l'incendie doit être maîtrisé quoiqu'il en coûte, et dans quelle mesure il peut être toléré ne serait-ce que pour minimiser le risque d'un incendie incontrôlé. (Moreno, 2005). Au-delà des actions d'atténuation, les stratégies préventives des incendies de forêts devraient encourager une gestion intégrée des forêts en tenant compte du rôle qu'elles jouent dans la conservation de la biodiversité et la fixation du carbone.

2.5 DIVERSIFICATION

2.5.1 Aspects généraux

Les traitements de diversification visent à augmenter la **complexité de la forêt**, entendue comme **diversité, à petite échelle, de compositions** (peuplements mixtes), et de **structures** en dimension verticale (strates) et horizontale (mosaïques).

Un système forestier complexe et riche en biodiversité est considéré plus résilient et résistant aux perturbations liées au changement climatique (Stephens 2010; Puettmann, 2011) car il promeut l'émergence de réponses adaptatives capables de faire face à l'incertitude associée au changement climatique (Messier i Puettmann, 2011).

Diversification. La diversification requiert d'introduire une ample diversité dans les forêts, à tous les niveaux :

- **Diversification génétique :** Dans une même essence, on cherche la diversité maximale des provenances locales, productives et adaptables, qu'elles soient d'essences autochtones ou acclimatées. Encouragement de l'adaptation génétique (adaptation *in situ* et migration).
- **Diversification d'essences :** Dans une communauté, on favorise les mélanges d'essences arborées dominantes et on les maintient ou on introduit même, dans des plantations ou régénérations naturelles, les essences du sous-bois. Augmentation de la complexité du peuplement général et de la diversité structurelle verticale (strates).
- **Diversification structurelle :** Dans une communauté, on augmente le nombre de strates du peuplement (structurel vertical) ou, à l'échelle du paysage, on promeut l'apparition de différentes communautés ou mosaïques (structure horizontale).

En plus de ses effets sur la biodiversité et sur l'adaptation des forêts au changement climatique, la diversification peut aussi avoir des effets économiques positifs, en accroissant potentiellement la capacité à faire face aux fluctuations du marché et en ouvrant l'accès à des secteurs du marché

spécialisés en bois de qualité et produits autres que le bois. Elle sert aussi à améliorer le paysage et la fonction touristique des forêts.

2.5.1.1 Diversification génétique

Le potentiel d'adaptation d'un peuplement forestier est la capacité d'évolution de ses caractéristiques génétiques d'une génération à l'autre, de manière naturelle et/ou aidée par ses gestionnaires. La plasticité phénotypique offre une réponse à court terme et amortit les impacts négatifs du changement, alors que la diversité génétique augmente la capacité d'adaptation à long terme et facilite la migration (Benito *et al.*, 2011).

Les arbres de forêt se caractérisent en général par une grande diversité génétique au sein de chaque peuplement : cette diversité est le carburant indispensable pour que fonctionne la sélection naturelle, ce mécanisme qui conduit à l'adaptation. Le niveau de diversité intra-peuplement est variable d'une espèce à l'autre. Il est inférieur chez les espèces qui ont une fragmentation élevée dans leur zone et peuvent varier, pour une même espèce, du centre aux limites de sa zone de distribution (Messier y Puttman, 2011).

La diversité génétique, pourtant si difficile à observer au sein des essences, est en évolution constante et elle est conditionnée par la dynamique des populations, par les flux de graines et du pollen entre les populations, et enfin par la sélection, d'origine naturelle ou anthropique (Lefèvre *et al.* 2014). Dans tous ces aspects, la gestion forestière à petite échelle joue un rôle fondamental.

2.5.1.2 Diversification d'essences

La présence de d'essences diverses dans un peuplement, ne serait-ce que de façon sporadique, garantit l'existence d'une biodiversité spécifique qui leur est associée, ainsi qu'un apport majeur de multiples services écosystémiques forestiers (Gamfeldt *et al.*, 2013). En outre, la présence d'un plus grand nombre d'essences arborées réduit la prévalence de parasites, en comparaison avec des forêts monospécifiques, et offre plus de variabilité de ressources alimentaires et de dendro-microhabitats aux prédateurs naturels ainsi qu'une moindre efficacité des insectes herbivores pour trouver leur espèce d'arbre hôte (voir Bellamy *et al.*, 2018)

Les diverses stratégies fonctionnelles entre les différentes essences (et, surtout entre les différents genres) permettent en outre plus d'efficacité dans l'utilisation des ressources et plus d'opportunités de récupération en cas de perturbations. Ainsi, au-delà du nombre absolu d'essences, ce qui importe eu égard à la résilience de la forêt est la diversité de traits fonctionnels associés aux différents groupes d'espèces arborées ou arbustives (Messier *et al.*, 2019). Ceux-ci affectent la capacité de réponse aux pressions externes (p.ex. sécheresse ou concurrence par rapport aux essences envahissantes), ou les processus et services qu'ils fournissent (ex : pollinisation ou contrôle de l'érosion).

La gestion forestière, lorsque l'on intervient sur la diversité de la composition végétale et structurale de la montagne, a également un impact sur la diversité de la faune associée, de sorte que le nombre global d'essences présentes dans la montagne se multiplie (Larrieu y Gonin, 2012). Le rôle du bois mort est remarquable à ce niveau.

2.5.1.3 Diversification structurelle (horizontale)

Un paysage en mosaïque peut limiter la propagation de perturbations telles que les incendies, les vents de tempête ou les maladies et parasites, chose souhaitable dans un scénario où leur fréquence et intensité augmentent (Messier *et al.*, 2019).

Si la fragmentation forestière a souvent été associée à une communauté faunistique appauvrie, dans des zones où les feux de forêts et autres perturbations ont favorisé traditionnellement un paysage hétérogène, les fragments de différents habitats dans le paysage, même s'ils sont de taille réduite, semblent essentiels pour assurer la présence de diverses essences dans le paysage (Brotons, 2007). Ainsi, par exemple, l'hétérogénéité du paysage apparaît comme un élément clé dans la détermination des schémas de distribution de certains oiseaux.

2.5.2 Traitements de diversification

Malgré un effort pour classer et individualiser les traitements, il faut tenir compte du fait que nombre d'entre eux font effet à la fois sur la **diversité de composition et la diversité structurelle**, et qu'ils sont habituellement (cela est conseillé) combinés.

Les traitements résumés ici ciblent la gestion à **échelle de forêt ou de peuplement**. Il faut néanmoins prendre en considération leur relation avec l'**échelle de paysage**, surtout lorsque l'on doit prioriser les actions comme, par exemple, sur les peuplements moins divers fonctionnellement ou encore favoriser les essences qui apportent de nouveaux traits fonctionnels inexistants dans l'ensemble du paysage.

2.5.2.1 Promotion de la diversité (de composition et de structure verticale) dans des forêts déjà mixtes.

Promotion active de la diversité d'essences arborées et arbustives et d'éléments singuliers, à petite échelle.

- **Promotion d'essences sporadiques.** Ce traitement entre dans le cadre de la technique de "sylviculture d'arbre individuel", développée surtout les 20 dernières années sur des bois et essences de l'aire eurosibérienne. Il consiste à centrer les efforts de gestion uniquement sur les pieds qui auront à l'avenir le plus de valeur, en laissant le reste des arbres sous gestion minimale ou en exploitation immédiate. L'objectif est de faciliter l'identification des meilleurs pieds au stade juvénile (qualification), et ensuite d'éliminer la concurrence qui leur est faite afin qu'ils puissent se développer avec rapidité et vitalité (développement). Du point de vue de l'adaptation au changement climatique, la sylviculture d'arbres individuels permet de maintenir la diversité d'essences présentes car elle leur offre de faibles niveaux de concurrence et améliore aussi l'hétérogénéité structurelle. En Italie, son applicabilité a été testée dans des forêts à essences feuillues pour une mise en valeur économique, l'augmentation de la biodiversité et la stabilité écologique (LIFE PProSPoT : <http://www.pprospot.it/>). Le projet LIFE MIXforchange (<http://www.mixforchange.eu>) a été pionnier en appliquant cette même technique dans des forêts méditerranéennes subhumides en Catalogne.
- **Gestion de forêts mixtes bistratifiées comme les taillis sous futaie.** La gestion se fait ici sur deux strates : une inférieure de pousses pour la production de petit bois et une su-

périeure, de pieds francs d'essences de valeur pour la production de bois. Les coupes sont espacées dans le temps (20-30 ans) et intenses. Toute la strate basse est coupée, et les tiges hautes porte-graines (d'essence identique ou différente) sont maintenues durant plusieurs rotations, avec d'autres tiges accompagnantes (Serrada, 2011). De cette façon, la vitalité du peuplement s'améliore et on obtient sa diversification spécifique et structurelle, tout en favorisant en continu la régénération sexuelle (par graine). Certaines études récentes ont mis en exergue les nombreux avantages du taillis sous futaie pour l'adaptation au changement climatique et la conservation de la biodiversité (Sjölund & Jump, 2013; Kollert, 2014).

- **Rétention d'éléments clé ("Retention forestry").** La "sylviculture de rétention" se base sur l'idée de maintenir intentionnellement, au moment de la coupe, des structures et des individus importants qui resteront longtemps dans le peuplement (Gustafsson *et al.*, 2012). Il s'agit de rémanents, comme de vieux et grands arbres, vivants et morts, qui resteront en place après coupe. Le principal objectif est de donner de la continuité à la structure, fonction et composition de l'écosystème par le biais de diverses générations de la forêt. Ce genre de sylviculture permet de maintenir et d'augmenter la diversité spécifique du peuplement, en favorisant la biodiversité associée à ces habitats telle que les plantes épiphytiques, les organismes saproxyliques, les insectes et les champignons du bois et bien d'autres organismes ayant un rôle important dans la capacité de résilience de la forêt. Les débroussailllements sélectifs peuvent contribuer à cette sylviculture. De manière générale, plus la strate arbustive est variée et meilleure sera la situation.
- Pour la maîtriser, il est en revanche nécessaire de prendre en compte le comportement des différentes essences arbustives par rapport à l'eau (si elles retiennent ou stockent de l'eau), au feu (pyrofites ou pas), à leur biodiversité associée (productrices de fruits ou pas), ainsi qu'à leurs stratégies de reproduction (rejets *versus* graines).



Photo 1 : Diversification faite par la favorisation d'essences minoritaires dans une chênaie. L'intervention s'est faite dans le cadre du projet **LIFE MIXforCHANGE**, qui a conçu un modèle de gestion d'adaptation spécifique pour des forêts mixtes méditerranéennes subhumides, à partir de la combinaison des techniques de "taillis sous futaie" et de "sylviculture d'arbre individu" (*tree-oriented silviculture*), en appliquant des trouées pour la régénération et des plantations d'enrichissement. Projet co-financé par le programme LIFE de l'Union Européenne.

2.5.2.2 Incorporation de nouvelles essences dans des peuplements peu diversifiés

- Régénération naturelle : Ouverture de trouées de différentes tailles**, adaptées à l'écologie des essences et tirant parti du matériel régénéré en attente. Cette pratique apporte également de la diversité de structures à l'horizontale (petites mosaïques). Le principal facteur ici est le degré d'ensoleillement. La dimension des îlots ou bandes de régénération se détermine en fonction de l'écologie de l'essence à incorporer, et des conditions d'ensoleillement attendues (Martín-Alcón *et al.* 2015). En Catalogne on a constaté que, dans des conditions méditerranéennes et avec une projection de longues périodes de sécheresse estivale, il peut s'avérer utile, même pour les essences héliophiles, de réduire les dimensions de la trouée. Ceci permet de maintenir une humidité plus importante, et de tirer parti des microstations plus favorables (Baiges *et al.*, 2019). Pour favoriser l'introduction d'essences tolérantes à l'ombre, certains auteurs recommandent de faire des bandes étroites qui permettront l'entrée de lumière latérale sous les arbres au lieu de chercher l'ensoleillement direct de la trouée. Pour certaines de ces essences il peut s'avérer nécessaire de semer ou planter avant de faire la trouée.

Mais, au-delà du degré d'ensoleillement, d'autres facteurs conditionnent le succès de la mise en œuvre de la régénération naturelle, plus encore que les nouvelles conditions climatiques. En Catalogne, Baiges *et al.* (2019) signalent de nouveaux facteurs à considérer tels que la réduction de la viabilité des graines, le possible rôle facilitateur de la strate arbustive, ou encore la présence de pathogènes qui inhibent la production de graines ou font obstacle à la viabilité du matériel régénéré. Les expériences, à chaque fois plus fréquentes de conversion de monocultures forestières en peuplements mixtes au centre et au nord de l'Europe sont une preuve claire de la complexité du processus d'introduction de nouvelles essences. À titre d'exemple, De Schrijver *et al.* (2009) ont montré que dans des plantations de Pins sylvestres en sol sablonneux, l'impact de la méthode de coupe sur le cycle de calcium et magnésium était le facteur qui conditionnait le plus le succès de l'installation de bouleau régénéré.

Photo 2 : Coupe expérimentale par îlots de différentes tailles dans les Pyrénées catalanes, où l'on ciblait la régénération de l'essence principale (*Pinus sylvestris*), l'introduction de nouvelles essences (de genre *Quercus* et *Fagus*) et l'essai de nouvelles provenances de *P. sylvestris* et *P. nigra*. Le suivi et la diffusion des premiers résultats ont été faits dans le cadre du projet POCTEFA CANOPEE.



- **Plantations (ou ensemencement) d'enrichissement**, dans des zones à très faible diversité spécifique.

Les plantations d'enrichissement visent à introduire ou à augmenter la proportion d'une ou plusieurs essences dans un peuplement forestier préexistant (Coello *et al.*, 2019). Elles se font généralement dans des peuplements peu variés, à densité insuffisante (du fait de perturbations ou de la gestion) et à faible régénération naturelle, en tirant parti du potentiel productif des microstations les plus favorables (fonds de vallée, anciennes terrasses...). On y a également recours pour diversifier des plantations adultes à faible diversité fonctionnelle, en introduisant des essences tolérantes à l'ombre. En ce qui concerne les plantations sur terrain boisé, elles ont l'inconvénient de la difficulté de mécanisation mais, a contrario, elles bénéficient de microclimats plus favorables grâce à l'effet tampon des arbres sur place, si les essences plantées tolèrent l'ombre. Selon Coello *et al.* (2019), pour des essences intolérantes, les surfaces terrières initiales devraient être inférieures à 20 m²/ha.

Le choix des essences dépend de l'objectif originel de la plantation. Elles sont mixtes en général même si une essence domine et les autres ont le rôle d'auxiliaires. Généralement la plantation se fait à des densités faibles à l'échelle du peuplement (environ 200 tiges/ha), mais elle est organisée en groupes plus denses (environ 1000 tiges/ha) pour en améliorer la conformation (sans besoin de coupes annuelles) et pour maîtriser le développement de la végétation concurrente. Même lorsque l'objectif de la plantation est de produire du bois de qualité, le principe incontournable dans sa gestion est que l'intensité et, par conséquent, le coût de maintenance soit minimal (Coello *et al.*, 2017). La gestion se réduit aux opérations indispensables qui garantissent la survie. L'approche sylvicole appliquée est celle de la sylviculture de l'arbre individuel décrite plus haut. Pendant une phase de qualification, la plantation croît en densité. Cette phase est suivie par celle l'identification des tiges d'avenir, à 15-20 ans. C'est à ce moment que les éclaircies sélectives se prévoient.

Photo 3 : Plantation d'enrichissement réalisée dans le cadre du projet LIFE CLIMARK : ce type de plantations est adopté comme mesure d'atténuation-adaptation, recommandable dans 3 situations de départ : i) Peuplements affectés par des incendies avec du matériel régénéré peu dense et/ou diversifié ; ii) Peuplements adultes avec présence de trouées et de microstations favorables ; iii) Bandes de faible densité d'arbres autour de terrains de culture biologique. Projet cofinancé par le programme LIFE-Climat de l'Union Européenne.



2.5.2.3 Pratiques qui favorisent la diversité et l'adaptation génétique du peuplement

En gestion forestière, la durée de la rotation souvent élevée, ce qui signifie que l'évolution des conditions environnementales affectant le peuplement entre l'état juvénile et le moment de la coupe sera importante. Pendant la période de régénération - qu'elle soit naturelle ou par plantation - il faut s'assurer que l'on apporte une diversité génétique suffisante pour permettre la sélection naturelle postérieure.

- Adapter la densité et les critères de sélection d'arbres lors des coupes de régénération.

Il s'agit de préparer la phase de régénération de sorte à en assurer la quantité et la diversité génétique : augmenter le nombre d'arbres porteurs de graines dans les coupes d'ensemencement, et maintenir une diversité phénotypique élevée. La diversité phénotypique, très élevée dans certaines essences comme le *Quercus*, englobe des différences morphologiques (le port, par exemple), phénologiques (dates de germination) et physiologiques (les stratégies de reproduction ou de résistance à la sécheresse notamment). Cette diversité phénologique est un indicateur qui combine la diversité génétique et la plasticité phénotypique d'un peuplement, et qui facilite l'adaptation *in situ*, à court et long terme (Benito *et al.*, 2011).

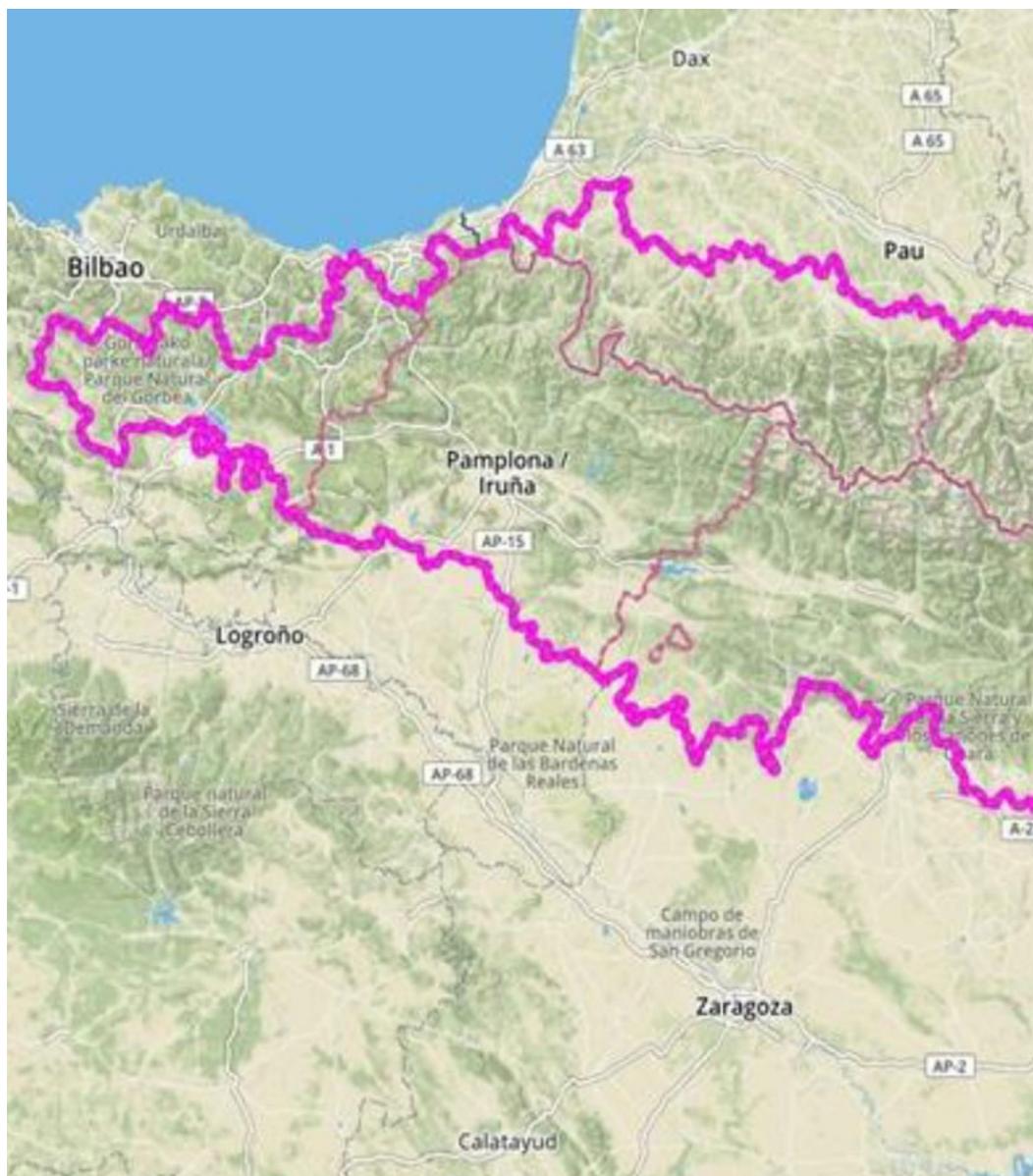
- **La migration assistée.** Utilisation d'essences d'autres provenances plus conformes à la nouvelle situation climatique, actuelle ou estimée (voir section *Choix d'essences et des provenances lors de plantations*, page XX). Dans les Pyrénées par exemple, on constate l'utilisation d'écotypes de milieux plus xériques (Martín-Alcón *et al.*, 2016) ou, dans des plantations à rotation courte, (peupliers, taillis, ...) l'utilisation du matériel de reproduction le mieux adapté aux nouvelles conditions, tout en évitant l'uniformité à l'échelle du paysage ou à l'échelle régionale (Messier, 2011).



Photo 4. Plantation d'enrichissement à base d'espèces rejetant de souche dans des pinèdes monospécifiques de pin sylvestre dans les Pré-Pyrénées catalanes, dans le cadre du projet MED ForClimAdapt. Différentes essences de Chênes et du matériel végétal de provenances différentes ont été utilisés dans les plantations.

3 PLACETTES DÉMONSTRATIVES ET RÉSULTATS DES TRAITEMENTS

3.1 CARTE DE LOCALISATION DES PLACETTES DÉMONSTRATIVES

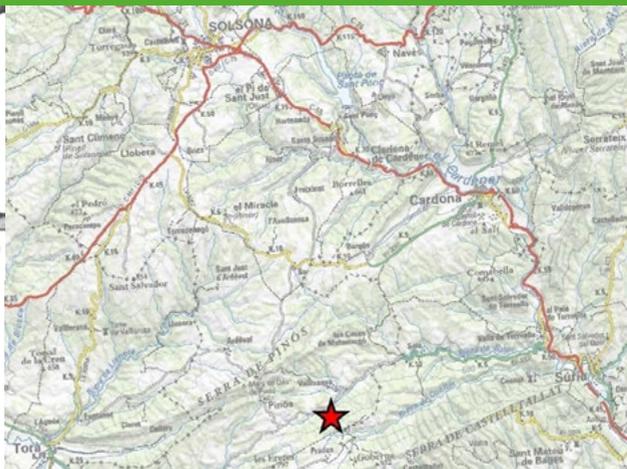




3.2 PINÓS (LLEIDA)

3.2.1 Fiche descriptive du peuplement

Localisation du peuplement



Limites du peuplement



Image du type de peuplement



Partenaire : Centre de Ciència i Tecnologia Forestal de Catalunya

Localisation de l'action : Catalogne, Lleida, Pinós (Solsonés)

Formation forestière : Taillis de chêne pubescent avec présence ponctuelle de pin laricio (formation provenant d'un incendie de forêt)

Surface du peuplement sélectionné : 2 ha

Propriétaire/gestionnaire : Ferrán Miquel

Date du commencement de l'intervention : 2018

CTFC 

Objectifs généraux :

1. Réguler la concurrence entre les rejets de Chêne pour la ressource hydrique et augmenter ainsi la vitalité du peuplement.
2. Promouvoir la diversification du peuplement.

Objectifs opérationnels :

Traitement d'éclaircies sélectives mixtes qui consistent en :

1. Réduction de la densité des rejets de Chêne
2. Élimination de la concurrence autour de chaque individu de Pin (rayon 1 à 2 m)
3. Débroussaillage des buissons
4. Débardage manuel et tronçonnage des rejets de chêne extraits pour usage énergétique (petit bois)

État du peuplement avant traitement**État du peuplement après traitement****Résultats attendus de l'intervention**

- Augmentation de la croissance en diamètre des rejets de chêne, amélioration de leur état hydrique et de leur vitalité.
- Augmentation de la croissance en diamètre du matériel de Pin régénéré, amélioration de son état hydrique et de sa vitalité
- Diversification de la composition du peuplement et du sous-bois
- Diminution de l'évapotranspiration du peuplement et amélioration du bilan hydrique avec l'augmentation de l'infiltration et de la quantité d'eau bleue.

Description détaillée du peuplement

Topographie : Le peuplement se trouve sur un versant à pente modérée (10-20%), orienté nord-ouest (NW). L'altitude oscille entre 630 et 650m.

Climat : Le peuplement se trouve dans une zone de climat subhumide sec (selon l'indice de Thornthwaite), caractérisé par une moyenne de précipitations et une température de 650 mm et 12°C, respectivement. Les précipitations se concentrent, en général, durant les mois d'automne et de printemps. Durant l'été, des orages fréquents apportent des quantités de précipitations significatives (une moyenne d'environ 150mm).

Sol : Le sol est formé de plis de roches carbonatées (surtout des lutites, des marnes et calcaires) et des sédiments de plâtre. Sol de profondeur modérée.

Végétation : Le peuplement est situé sur un terrain privé de la province de Lleida (Catalogne), situé au sud de la commune du Solsonès (municipalité de Pinós). Le terrain fait partie d'une vaste zone touchée en 1998 par un grand incendie de forêt qui a brûlé plus de 24,000 ha de boisements.

Avant l'incendie le peuplement était composé d'un peuplement adulte de Pin de Salzmann (*Pinus nigra* ssp. *salzmannii*), de structure régulière. Le sous-bois était formé de différentes espèces de buissons de la zone méditerranéenne (*Quercus coccifera*, *Crataegus monogyna*, *Viburnum lantana*, *Rubus ulmifolius* et *Buxus sempervirens*) et de plusieurs tiges de chêne pubescent (*Quercus pubescens*).

Après l'incendie, le peuplement de Pin de Salzmann a été rapidement remplacé par une intense repousse de chêne (principalement de rejets). Cependant, après quelques années, on observe une certaine présence du Pin régénéré à l'intérieur de la repousse de Chêne, qui provient d'îlots non brûlés situés sur la partie supérieure du versant.

3.2.2 Description et évaluation quantitative de l'action

3.2.2.1 Description des mesures réalisées

Pour l'évaluation quantitative du traitement, un inventaire a permis de comparer l'état pré et post-intervention, pour la placette d'essai et la placette-témoin.

Une placette de 25 x 25 m a été sélectionnée pour chacune d'entre elles (placette (A) sur la Figure 5), et a fait l'objet de mesures avant et après le traitement : surface terrière, essence et diamètre de tous les arbres avec $d_{1,30} > 5$ cm, couvert (%), hauteur moyenne de chaque essence arbustive, et couvert (%) par groupe biologique d'essences herbacées (graminées et non-graminées). Sur chaque placette, on a relevé une sous-placette de 5 mètres de rayon (placette (a) sur la Figure 5) où l'on a comptabilisé les tiges de $d_{1,30} < 5$ cm de chaque essence en différenciant celles dont la hauteur est supérieures à 130 cm et les inférieures à cette hauteur.

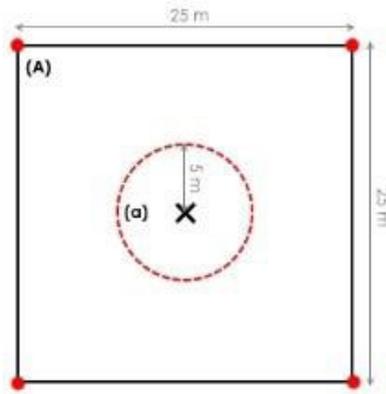


Figure 1 Typologie de placette d'inventaire, avec une placette (A) carrée de 25 x 25 mètres, où l'on mesure tous les arbres de $d_{1,30} > 5$ cm; et une sous-placette (a) circulaire de 5 mètres de rayon où l'on dresserait l'inventaire des arbres de $d_{1,30} < 5$ cm.

3.2.2.2 État initial du peuplement

Il s'agit de taillis clairement dominé par *Quercus pubescens* à l'état de bas-perchis, d'un diamètre moyen quadratique de 7,38 cm et d'une densité moyenne de 1.056 tiges/ha (Tableau 1). La présence d'autres espèces sur la strate supérieure est rare et nous n'y retrouvons que quelques individus de *Pinus nigra* ayant un diamètre moyen de 5,6 cm.

Sur la strate de juvéniles ($d_{1,30} < 5$ cm), le *Quercus pubescens* est clairement dominant et a une densité élevée (plus de 3.500 tiges/ha) de tiges de hauteur inférieure à 1,3 mètres et une densité mineure de tiges d'une hauteur supérieure à 1,3 mètres. Nous retrouvons toutefois souvent d'autres essences au sein de cette strate, surtout le *Pinus nigra*, mais aussi des juvéniles de *Sorbus torminalis*, *Crataegus monogyna*, *Viburnum lantana*, *Cornus sanguinea*, *Quercus coccifera*, etc.

Finalement, les strates arbustive et herbacée se caractérisent par une prévalence de couvert herbacé (60%). Dans le groupe des arbustives, les dominantes sont le *Rubus ulmifolius* (32,5%), la *Genista scorpius* (10%) et le *Dorycnium pentaphyllum* (10%) ; elles sont accompagnées d'autres essences plus rares comme le *Prunus spinosa*, la *Crataegus monogyna*, le *Quercus coccifera*, le *Viburnum lantana* et le *Cornus sanguinea*.

Tableau 1 Caractéristiques dendrométriques de base du peuplement d'action avant l'intervention

Variable	<i>Q. pubescens</i>	<i>P. nigra</i>	Autres feuillues
Densité adultes ¹ (tiges/ha)	1.056,00	16,00	0,00
Surface terrière (m ² /ha)	4,52	0,04	0,00
Diamètre quadratique moyen (cm)	7,38	5,60	0,00
Densité juvéniles ² h>1,3 m (tiges/ha)	684,70	47,80	15,90
Densité juvéniles ² h<1,3 m (tiges/ha)	3.551,00	159,20	175,20

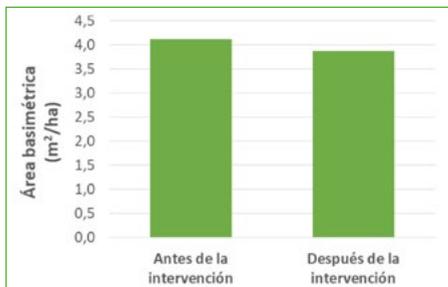
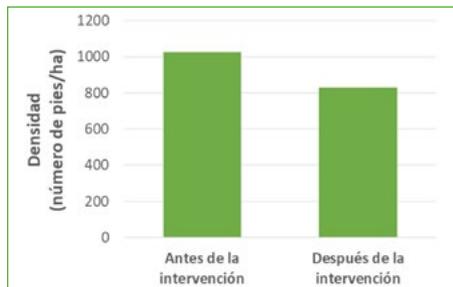
3.2.2.3 Caractérisation quantitative de l'intervention

Description de l'effet de l'intervention à partir des données relevées avant et après celle-ci sur la parcelle.

1 Individus adultes : $d_{1,30} > 5$ cm

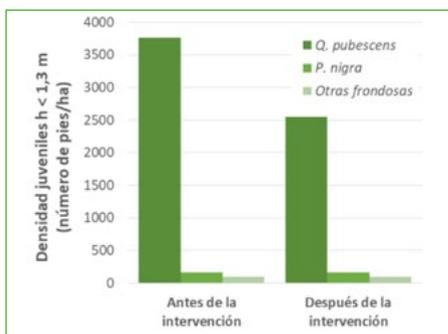
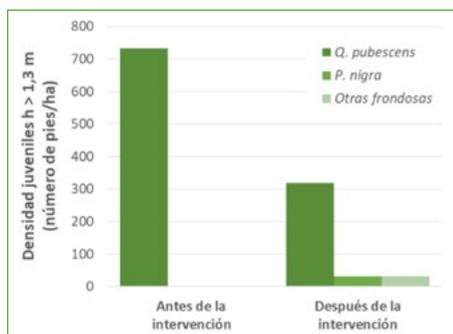
2 Individus juvéniles : $d_{1,30} < 5$ cm

Effets sur la strate boisée ($d_{1,30} > 5$ cm). *Quercus pubescens*.



L'intervention a eu un léger effet sur la strate boisée composée exclusivement de *Quercus pubescens* sur la parcelle de suivi de l'action. La densité de cette essence est passée de 1.024 à 832 tiges/ha, et a donc diminué de 18,8%. L'effet sur la surface terrière est moins apparent, l'on passe de 4,11 à 3,87 m²/ha, la diminution n'étant donc que de 5,9%. Rappelons cependant qu'entre une prise de mesures et la suivante, un cycle végétatif complet s'est écoulé. L'augmentation de la surface terrière pendant cette période pourrait avoir masqué l'effet de l'intervention. Le diamètre quadratique de moyenne est passé de 7,38 à 7,69 cm, du fait de l'intervention.

Effets sur la strate juvénile ($d_{1,30} < 5$ cm)

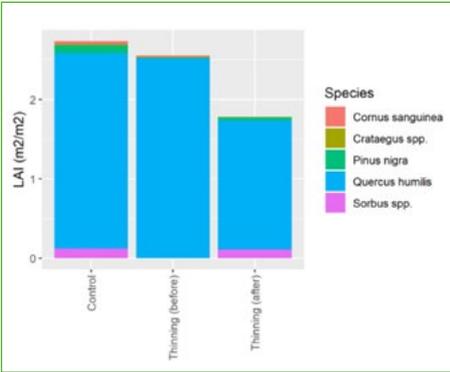


L'intervention a eu un effet remarquable sur la strate de juvéniles, notamment par la réduction significative de la densité des tiges dominées et submergées de *Quercus pubescens*. La densité de juvéniles de hauteur supérieure à 1,3 mètre a chuté de 732 à 318 tiges/ha, diminuant de 56,5%, et la densité de juvéniles de hauteur inférieure à 1,3 mètre a diminué de 3.758 à 2.548 tiges/ha (32,2%). L'effet de l'intervention sur le reste des essences a été nul, respectant ainsi un des principaux objectifs de l'intervention, c'est à dire stimuler le mélange d'essences dans le peuplement.

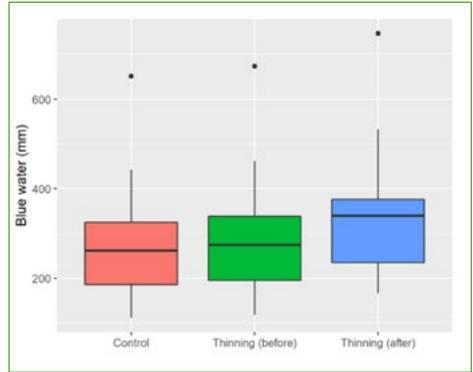
3.2.2.4 Effet de l'intervention sur le bilan hydrique

Une simulation du bilan hydrique a été faite suivant le modèle *medfate* (De Cáceres *et al.*, 2015). Pour ce faire, les données d'entrée relevées pour le modèle sont les caractéristiques du sol de la parcelle, sa structure avant et après intervention, et les données météorologiques correspondantes à la période 1981-2015. Les résultats sont présentés en incluant ceux d'une placette de contrôle de la même zone d'intervention.

Effets sur le bilan hydrique et le stress pour cause de sécheresse de *Quercus pubescens*

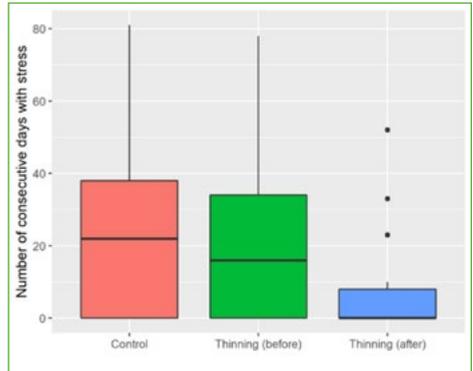


Indice de surface foliaire par espèce



Eau bleue (mm)

Selon les halométries du modèle de bilan hydrique, l'intervention supposerait une réduction de l'indice de surface foliaire (LAI) de 2.5 à 1.78 m²/m², du fait surtout de la réduction du nombre de tiges sur la strate de juvéniles. La conséquence sur le bilan hydrique de la parcelle prédite par le modèle inclut une augmentation de l'eau exportée de 293 à 344 mm/an de moyenne. Par ailleurs, le modèle prédit une réduction de la durée de la période de stress hydrique de 22 à 6 jours/an, en moyenne pour *Quercus pubescens*.



Nombre de jours consécutifs sous stress

3.2.2.5 Évaluation finale de l'intervention

L'intervention réalisée sur le peuplement avait comme objectifs principaux : (i) la régulation de la concurrence entre les rejets de chêne pour la ressource hydrique, et en conséquence l'accroissement de la vitalité du peuplement, et (ii) la stimulation de la diversification du peuplement.

L'exécution du traitement par éclaircies sélectives mixtes a permis, d'une part, de réduire sensiblement la densité et, par conséquent, la compétition au sein de la strate supérieure, d'autre part, de réduire de manière importante la densité de rejets de chêne dominés (répertoriés comme juvéniles), obtenant ainsi une amélioration générale de la vigueur du peuplement.

Le traitement a également stimulé la diversification du peuplement. Non seulement tous les individus de *Pinus nigra* et d'autres essences accessoires ont été maintenus mais les conditions de leur développement se sont améliorées par élimination de la concurrence autour de chaque individu, notamment par le débroussaillage des buissons.

3.3 BOUCHEVILLE (PYRÉNÉES-ORIENTALES)

3.3.1 Description et évaluation quantitative de l'action

3.3.1.1 État initial du peuplement de l'action

L'état initial du peuplement est décrit sur la base des données prises avant l'intervention dans la placette d'action sylvicole. Il s'agit d'une forêt de montagne dominée par le hêtre (*Fagus sylvatica*) à 98,8% (voir tableau 1 pour les caractéristiques dendrométriques des arbres dont $D > 17.5\text{cm}$). La présence d'autres espèces dans la strate supérieure est rare, avec le chêne sessile (*Quercus petraea*), 1,2%. Les perches ($7.5 < \text{diamètre} < 17.5\text{cm}$) sont composées à 100% de hêtre et représentent 2,2 m²/ha avec une densité de 176 tiges/ha.

La strate juvénile (diamètre < 7,5 cm) est peu représentée avec quelques pieds de hêtre et d'érable sycomore.

La strate arbustive se caractérise par un couvert important de Houx (*Ilex aquifolium*) et quelques pieds de Daphné laureole. La strate herbacée est peu importante, avec un recouvrement de 3% (fétuque hétérophylle, *Festuca heterophylla*).

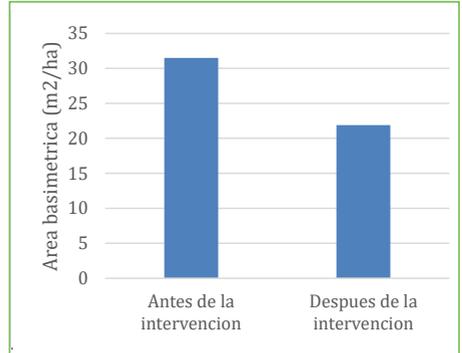
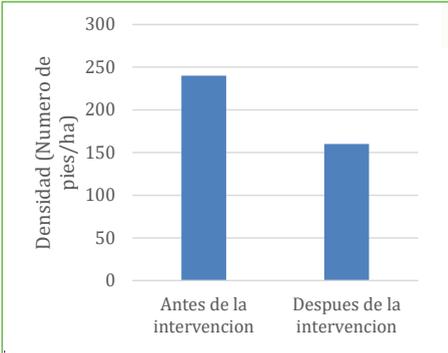
Tableau 2 Caractéristiques dendrométriques de base du peuplement de l'action avant intervention ($D > 17.5\text{cm}$)

Variable	<i>Fagus sylvatica</i>	<i>Quercus petraea</i>
Densité adultes ³ (pieds/ha)	224	16
Surface terrière (m ² /ha)	31,1	0,4
Diamètre quadratique moyen (cm)	42,0	17,9

3.3.1.2 Caractérisation quantitative de l'intervention

L'effet de l'intervention est décrit sur la base des données recueillies avant et après la coupe sur la placette d'action sylvicole, et pour les arbres dont le diamètre est supérieur à 17,5cm.

Effets sur la strate arborée (dbh > 17,5 cm).



L'intensité de la coupe est forte. Si l'on considère les arbres de diamètre > 17,5cm, la densité a été réduite de 33% et la surface terrière de 30%. Le diamètre moyen des tiges retirées est de 39cm et le volume récolté est de 105 m³/ha. Avec un coefficient $K=V_e/V=0,91$, l'éclaircie a bien été faite par le haut, conformément à ce qui était prévu.

Effets sur la strate juvénile (dbh < 17,5 cm)

Aucune tige de diamètre inférieur à 17,5 cm n'a été prélevée, afin de concentrer l'effort de coupe dans la strate dominante et améliorer la vitalité des houppiers.

3.3.1.3 Évaluation finale de l'intervention

L'intervention réalisée dans le peuplement a trois objectifs :

- Réduire la compétition pour l'accès à l'eau en réduisant la densité du peuplement
- Augmenter la vitalité des houppiers en coupant des arbres de l'étage dominant
- Provoquer l'arrivée d'un mélange d'essences

L'action sylvicole a permis de réduire la densité de 33%, la surface terrière de 30%, ce qui correspond à un prélèvement fort. D'autre part, la tige de chêne sessile présente sur la placette a été conservée pour faciliter l'arrivée d'un mélange avec l'ouverture du peuplement et l'arrivée de lumière.

3.3.2 Fiche descriptive du peuplement

Localisation du peuplement faisant l'objet de l'intervention

Action Agir - Office National des Forêts : localisation de la placette en forêt domaniale de Boucheville (parcelle 39)



Action Agir - Office National des Forêts : localisation de la placette en forêt domaniale de Boucheville (parcelle 39)



Limites du peuplement de l'action

Forêt domaniale de Boucheville (66) - Parcelle 39

Tel d'intervention sylvicole sur le hêtre pour l'adaptation des peuplements forestiers face aux changements climatiques.



Légende

- Tronçons de peuplement 20 x 20 m
- Zone d'intervention sylvicole

0 50m 100m



© IGN 2017
 18 00000 0000 0000
 Niveau : 100 000 000 000 000 000

Image du type de peuplement



Partenaire : Office National des Forêts



Localisation de l'action : Occitanie, Pyrénées-Orientales, commune de Vira, forêt domaniale de Boucheville, parcelle 39

Formation forestière : Hêtraie de montagne adulte

Superficie du peuplement sélectionné : 2,31 ha

Propriétaire/Gestionnaire : État, Ministère de l'Agriculture

Date du début de l'intervention : 2018

Objectifs généraux :

1. Réduire la concurrence hydrique entre les arbres
2. Augmenter la vitalité des faites
3. Provoquer le mélange des essences

Objectifs de l'opération :

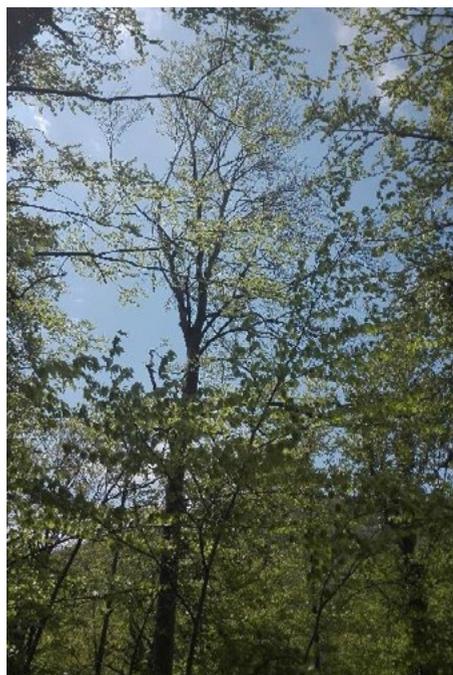
Traitement d'éclaircie sélectif mixte consistant à :

1. Réduire de 30% la surface terrière de la placette
2. Réduire la concurrence entre les arbres

État du peuplement avant traitement



État du peuplement après traitement



Résultat attendus de l'intervention

- Augmenter la croissance en diamètre des arbres
- Améliorer la vitalité et l'alimentation hydrique en diminuant la concurrence pour l'eau,
- Diminuer l'évapotranspiration totale du peuplement
- Augmenter la vitalité individuelle des houppiers
- Diversifier le peuplement en provoquant le mélange

Description détaillée du peuplement de l'action

Topographie : Le peuplement est situé sur une pente moyenne (36%), orientée au sud. L'altitude varie entre 850 et 900m.

Climat : Le climat est de type montagnard avec une influence méditerranéenne. Les précipitations sont de 890 mm/an, avec seulement 125 mm sur les mois de juin/juillet/août, ce qui constitue une contrainte pour le hêtre, en partie compensée par l'apport de brouillards. Il y a 95 jours de pluie par an en moyenne. Les variations de précipitations peuvent être très importantes d'une année sur l'autre. La moyenne des températures maximales du mois le plus chaud (juillet) est de 25°C, alors que la moyenne des températures minimales du mois le plus froid (janvier) est de 0,9°C. Il y a 52 jours de jours de gel par an en moyenne. Le vent tel que la tramontane peut aggraver encore plus les épisodes de sécheresse. Source : MétéoFrance, Aurhely, 1981-2010.

Sol : Le sous-sol est calcaire, sur lequel repose un sol décarbonaté avec une charge importante en cailloux. La texture du sol est limoneuse.

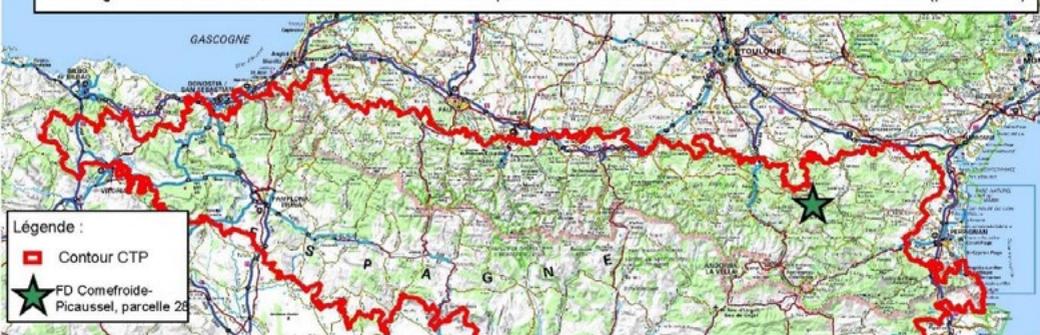
Végétation : Le peuplement est une hêtraie de montagne d'environ 80 ans, de structure régulière, avec un sous-étage composé notamment de Houx (*Ilex aquifolium*) et de Daphné lauréole (*Daphne laureola*).

3.4 ESPEZEL (AUDE)

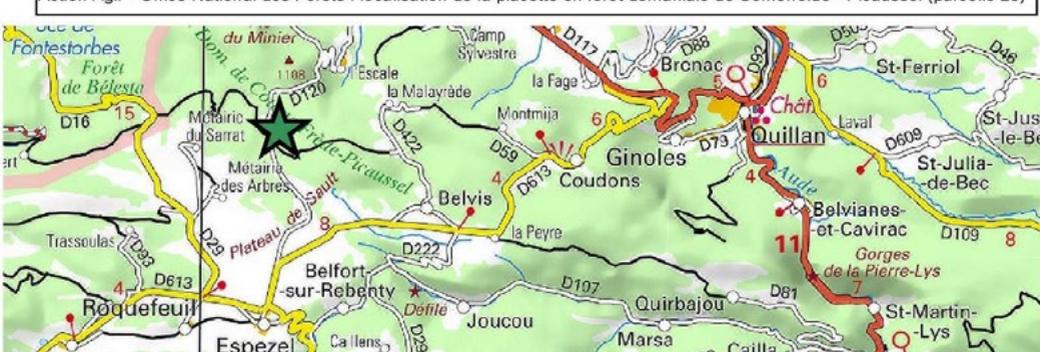
3.4.1 Fiche descriptive du peuplement

Localisation du peuplement de l'action

Action Agir - Office National des Forêts : localisation de la placette en forêt domaniale de Comefroide - Picaussel (parcelle 28)



Action Agir - Office National des Forêts : localisation de la placette en forêt domaniale de Comefroide - Picaussel (parcelle 28)



Limites du peuplement de l'action

Forêt domaniale de Comefroide-Picaussel (11) - Parcelle 28

Test d'intervention sylvicole sur le sapin pour l'adaptation des peuplements forestiers face aux changements climatiques.



Image du type de peuplement



Partenaire : Office National des Forêts



Localisation de l'action : Occitanie, Aude, commune d'Espezel, forêt domaniale de Comefroide-Picaussel, parcelle 28

Formation forestière : Sapinière de montagne adulte

Superficie du peuplement sélectionné : 2,61 ha

Propriétaire/Gestionnaire : État, Ministère de l'Agriculture

Date de début de l'intervention : 2018

Objectifs généraux :

1. Réduire la compétition hydrique entre les arbres
2. Augmenter la vitalité des houppiers
3. Provoquer le mélange des essences

Objectifs de l'opération :

Un traitement d'éclaircie sélectif mixte servira à :

1. Réduire la surface terrière de la placette de 30%
2. Réduire la compétition entre les arbres

État du peuplement avant traitement



État du peuplement après traitement



Résultats attendus de l'intervention

- Augmenter la croissance en diamètre des arbres
- Améliorer la vitalité et l'alimentation hydrique en diminuant la concurrence pour l'eau,
- Diminuer l'évapotranspiration totale du peuplement
- Augmenter la vitalité individuelle des houppiers
- Diversifier le peuplement en provoquant le mélange

Description détaillée du peuplement

Physiographie : Le peuplement est situé sur une pente faible (10%) orientée au sud. L'altitude varie entre 870 et 900m.

Climat : Le climat est de type montagnard avec une influence océanique. Les précipitations sont de 1138 mm/an, avec 204 mm sur les mois de juin/juillet/août. Il y a 119 jours de pluie par an en moyenne. Les précipitations sont relativement stables à l'échelle annuelle, mais peuvent avoir une variabilité mensuelle importante. La moyenne des températures maximales du mois le plus chaud (juillet) est de 24°C, alors que la moyenne des températures minimales du mois le plus froid (janvier) est de -0,2°C. Il y a 71 jours de jours de gel par an en moyenne. La sapinière étant ici à basse altitude, le risque climatique est ici surtout dû aux canicules. Source : MétéoFrance, Aurhely, 1981-2010.

Sol : Le sous-sol est calcaire, sur lequel repose un sol décarbonaté avec une charge importante en cailloux. La texture du sol est limono-argileuse.

Végétation : Le peuplement est une sapinière de montagne, de structure régulière, avec un sous-étage composé notamment de houx (*Ilex aquifolium*), de buis (*Buxus sempervirens*) et de ronce (*Rubus fruticosus*).

3.4.2 Description et évaluation quantitative de l'action

3.4.2.1 État initial du peuplement de l'action

L'état initial du peuplement est décrit sur la base des données prises avant l'intervention dans la placette d'action sylvicole. Il s'agit d'une forêt de montagne dominée par le sapin pectiné (*Abies alba*) à 96% (voir tableau 1 pour les caractéristiques dendrométriques des arbres dont $D > 17.5\text{cm}$). La présence d'autres espèces dans la strate supérieure est rare, avec le hêtre (*Fagus sylvatica*), 4%. Les perches ($7.5 < \text{diamètre} < 17.5\text{cm}$) sont absentes.

La strate juvénile (diamètre $< 7,5\text{ cm}$) est représentée par des semis de sapin pectiné (*Abies alba*), de hêtre (*Fagus sylvatica*) et d'épicéa commun (*Picea abies*).

La strate arbustive se caractérise par un couvert important de ronce (*Rubus fruticosus*), de Houx (*Ilex aquifolium*), de buis (*Buxus sempervirens*) et quelques pieds de Daphné lauréole (*Daphne laureola*). La strate herbacée a un recouvrement de 15%, avec notamment *Carex sylvatica*.

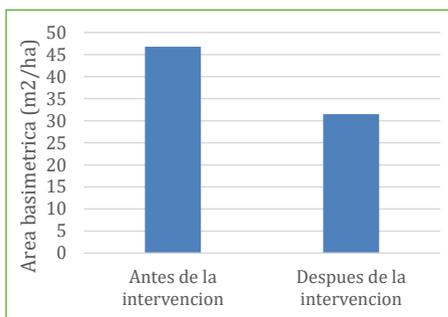
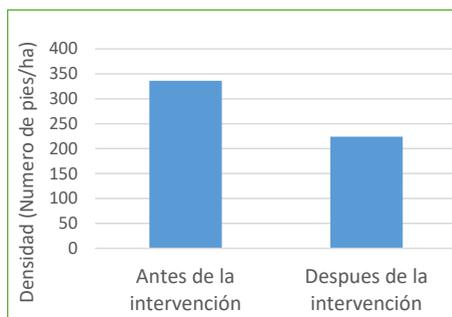
Tableau 3 Caractéristiques dendrométriques de base du peuplement de l'action avant intervention ($D > 17.5\text{cm}$)

Variable	<i>Abies alba</i>	<i>Fagus sylvatica</i>
Densité adultes ⁴ (pieds/ha)	320	16
Surface terrière (m ² /ha)	44,8	2,0
Diamètre quadratique moyen (cm)	42,2	40,3

3.4.2.2 Caractérisation quantitative de l'intervention

L'effet de l'intervention est décrit sur la base des données recueillies avant et après la coupe sur la placette d'action sylvicole, et pour les arbres dont le diamètre est supérieur à 17,5 cm.

Effets sur la strate arborée (dbh > 17,5 cm).



L'intensité de la coupe est forte. En considérant les arbres de diamètre > 17,5 cm, la densité et la surface terrière ont été réduites de 33%. Le diamètre moyen des tiges enlevées est de 41,7 cm et le volume récolté est de 186 m³/ha. Avec un coefficient $K=V_e/V=1,00$, l'éclaircie a bien été faite par le haut, conformément à ce qui était prévu.

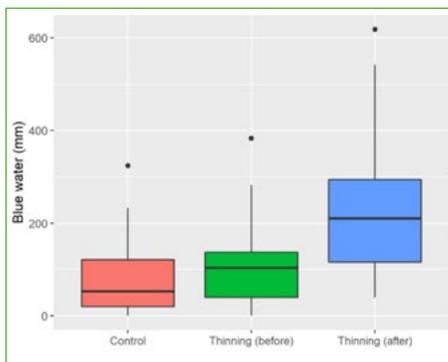
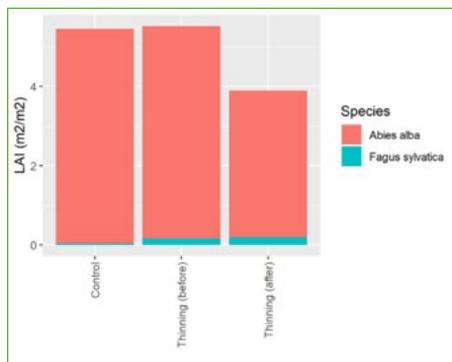
Effets sur la strate juvénile (dbh < 17,5 cm)

Aucune tige de diamètre inférieur à 17,5 cm n'a été prélevée, afin de concentrer l'effort de coupe dans la strate dominante et d'améliorer la vitalité des houppiers.

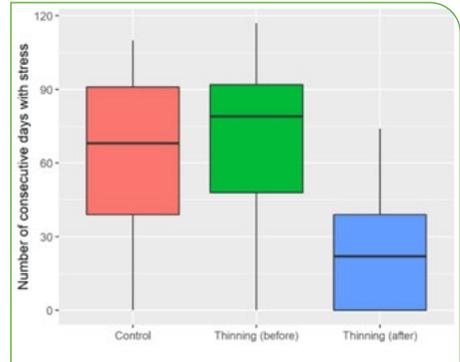
3.4.2.3 Effet de l'intervention sur le bilan hydrique

Ci-après, les résultats d'une étude de simulation du bilan hydrique d'après le modèle *Medfate*

Effets sur le bilan hydrique et le stress pour cause de sécheresse de *Abies alba*



D'après les halométries du modèle de bilan hydrique, l'intervention entraînerait une réduction de l'indice de l'aire foliaire (LAI) de 5.52 à 3.89 m²/m², du fait de la diminution du nombre de tiges. Telle que la prévoit le modèle, la conséquence sur le bilan hydrique de la parcelle est une augmentation moyenne de l'eau exportée de 104 à 230 mm/an. Par ailleurs, le modèle prédit une réduction moyenne de la période de stress pour cause de sécheresse de 72 à 25 jours/an, pour *Abies alba*.



3.4.2.4 Évaluation finale de l'intervention

L'intervention réalisée sur le peuplement poursuit trois objectifs :

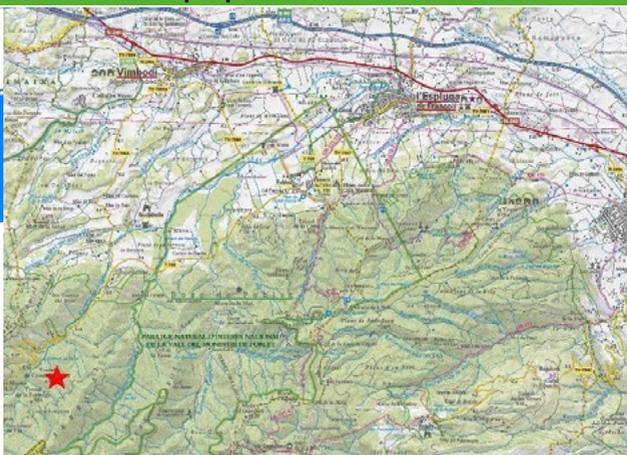
- Réduire la concurrence pour l'accès à l'eau en réduisant la densité du peuplement
- Augmenter la vitalité des houppiers en coupant des arbres de l'étage dominant
- Provoquer l'arrivée d'un mélange d'essences

L'action sylvicole a permis de réduire la densité et la surface terrière de 33%, ce qui correspond à un prélèvement fort. D'autre part, le hêtre présent sur la placette a été conservé pour faciliter l'arrivée d'un mélange avec l'ouverture du peuplement et l'arrivée de lumière.

3.5 POBLET (TARRAGONA)

3.5.1 Fiche descriptive du peuplement

Localisation du peuplement



Limites du peuplement



Image du type de peuplement



Partenaire : Centre de la Propietat Forestal

Emplacement de l'action : Catalogne, Tarragone, Bosc de Poblet

Formation forestière : Taillis de sapin pyrénéen mélangé d'arbusier et présence d'autres essences telles que le filaire à large feuille, le chêne ou l'érable.

Superficie du peuplement sélectionné : 8,9 + 11,8 ha

Propriétaire/gestionnaire : Generalitat de Catalunya

Date de commencement de l'intervention : octobre 2017

Generalitat de Catalunya
Departament d'Agricultura, Ramaderia,
Pesca, Alimentació i Medi Natural



Centre de la Propietat
Forestal

Objectifs généraux :

L'objectif de l'action est la régulation de la concurrence pour :

1. Augmentation de la vitalité (résilience plus élevée)
2. Plus d'efficacité dans la consommation d'eau (eau verte)
3. Possible impact sur le débit exporté de la parcelle (eau bleue)

Objectifs de l'opération :

1. Éclaircie basse portant surtout sur des tiges non-répertoriées. On passera de 4.000 tiges/ha à 2000 tiges/ha, environ, sans prélever plus de 30% de la surface terrière et sans réduire le couvert à moins de 70%.
2. Respecter la proportion chêne-arbousier initiale, les espèces accompagnantes et les arbres singuliers.

État du peuplement avant traitement**État du peuplement après traitement****Résultats attendus de l'intervention**

Obtenir un peuplement forestier mieux adapté à l'aggravation progressive de l'aridité, à la récurrence majeure et à l'intensité des phénomènes extrêmes (sécheresses, incendies ou parasites) issus du changement climatique, au moyen de :

- L'augmentation de la croissance individuelle par réduction de la concurrence et, donc, amélioration de la vitalité et de l'état hydrique (plus d'efficacité dans l'utilisation de l'eau).
- La conservation et l'amélioration de la biodiversité, par la promotion des essences les mieux adaptées à la sécheresse et des individus provenant de graines (amélioration de la diversité génétique). La réduction à moyen terme de la vulnérabilité aux incendies, par réduction de la continuité verticale et le volume de biomasse.

On attend aussi de l'intervention un meilleur bilan hydrique sur le bassin versant (augmentation de l'eau bleue) par le biais de la réduction de l'évapotranspiration et l'augmentation de l'infiltration et du ruissellement superficiel.

Description détaillée du peuplement de l'action

Topographie : Le peuplement est situé sur un bassin versant fermé de 45ha qui jouxte un autre bassin versant jumeau n'ayant pas été traité. La pente du bassin versant est de 30% environ, orientée au nord-ouest (NW). L'altitude du bassin versant oscille entre 640 et 1080 m.

Climat : Le climat est typiquement méditerranéen, avec quelques nuances (tendance à la continentalité). L'orientation générale du peuplement, orienté au nord, a aussi une influence sur le climat. La température moyenne annuelle est de 13,2 °C, et la précipitation moyenne annuelle oscille entre 550 et 600 mm

Sol : Sols typiques de la cordillère Littorale Catalane sous chênaies de montagne et développés à partir de dépôts colluviaux de schistes et d'ardoise. Le profil est assez profond (70-100 cm), bien drainé, de texture argileuse ou argilo-sablonneuse, et légèrement acide. La matière organique est très importante en surface et dans les premiers centimètres de sol. La forte pierrosité réduit le volume de sol disponible bien que les racines puissent aisément pénétrer entre les colluvions ou dans les fractures du substrat lithologique.

Végétation : Le bassin versant du Barranc de la Teula a été utilisé intensivement pour la fabrication de charbon durant des décennies, puis s'est retrouvé sans gestion. En conséquence, on y trouve aujourd'hui un peuplement vieilli, sans trop de vitalité, des rejets abondants, et de faibles diamètres (abondance de tiges non inventoriées).

La formation végétale est un peuplement mixte de *Quercus ilex* et d'*Arbutus* spp., accompagnés de *Phyllirea latifolia*, *Quercus* spp., *Acer* spp et autres essences.

3.5.2 Description et évaluation quantitative de l'action

3.5.2.1 Description des relevés de mesures réalisées

Afin d'évaluer l'état originel du peuplement forestier, le résultat de l'action et l'évolution du peuplement au fil du temps, une première placette permanente a été mise en place à l'intérieur du peuplement (8,9 ha), et une seconde dans la zone de contrôle (peuplement de mêmes caractéristiques mais sans intervention sylvicole). Les deux placettes sont circulaires et ont 15m de rayon. Dans la zone de la seconde phase de la coupe (11,8ha), 3 placettes d'inventaire supplémentaires ont été établies (deux avec un rayon de 5m et une avec un rayon de 8m).

La végétation a été caractérisée à partir des mesures de la surface terrière, du diamètre de toutes les tiges de plus de 2,5 cm (et d'une hauteur supérieure à 130cm) par essence, en faisant le comptage des tiges de diamètre inférieur à 2,5cm, du nombre de tiges par souche, en mesurant le couvert et la hauteur moyenne des essences arbustives, ainsi que le couvert d'essences herbacées.

Deux méthodologies ont été adoptées pour l'étude du bilan hydrique du bassin versant :

- Modèle théorique MEFDFA pour une caractérisation détaillée du sol : orientation, pente, lithologie (et classification du sol), profil et profondeur moyenne du sol. Pour l'élaboration du profil, 4 niveaux ont été établis, qui atteignent les 80-100 cm. La texture, la pierrosité et la densité apparente ont été décrites pour chaque niveau.

- Mesures directes de débit par forage dans le bassin faisant l'objet de l'intervention, eu dans le bassin versant « jumeau », laissé sans intervention. Ces calculs ont été menés durant les vingt dernières années par l'université d'Alicante qui apportera les données issues de séries historiques et le suivi post-intervention.

3.5.2.2 État initial du peuplement

Partant des données d'inventaire, le peuplement est un peuplement mixte de chênes verts et d'arbousiers qui présente une qualité de station moyenne (Qii_Au-B). On y trouve également d'autres essences telles que le Filaire à larges feuilles (*Phyllirea latifolia* L. Subsp. *media* (L.) P. Fourn.), le Chêne (*Quercus cerrioides*), etc.

Les caractéristiques dendrométriques du peuplement sont les suivantes :

	Densité (tiges/ha)	G (m ² /ha)
<i>Quercus ilex</i>	2766	24,72
<i>Arbutus unedo</i>	672	6,54
<i>Phyllirea latifolia-media</i>	101	0,68
<i>Quercus cerrioides</i> (humilisxaginea)	3	0,06
TOTAL tiges inventoriées (diamètre > 7,5 cm)	3575	32,20
TOTAL tiges non inventoriées (diamètre < 7,5 cm)	4341	8,99
TOTAL TIGES	7379	41,19

Densité cépées (cépées/ha)	2403
Moyenne tiges par cépée	3,85
Maximum de tiges par cépée	16

Le couvert représentait environ 85%, le diamètre moyen quadratique était de 10,7 cm et la hauteur moyenne était de 6,25m.

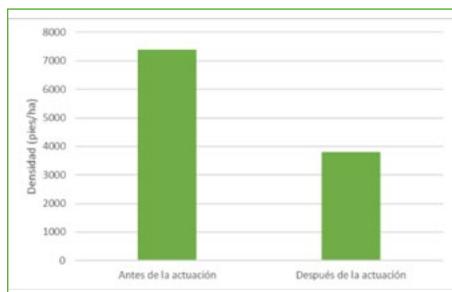
La couverture arbustive était très faible. Dans les zones ayant un couvert plus élevé, elle représentait environ 8%, la Bruyère et le Fragon petit-houx étant les principales essences présentes. Dans les zones un peu plus ouvertes ce sont le Genêt et le Ciste qui dominaient, sur un couvert de presque 20%. Le couvert herbacé était pauvre, avec des valeurs allant de 10 à 40%. Il était essentiellement formé de graminées et de mousses.

Dans l'ensemble il s'agit d'une forêt souffrant d'une densité excessive, vieillie et à faible vitalité.

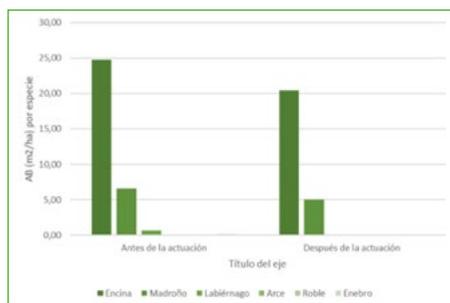
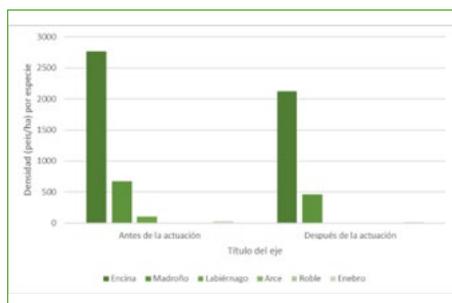
3.5.2.3 Caractérisation quantitative de l'intervention

Pour atteindre les objectifs, une éclaircie a été planifiée par le bas (suivant le modèle ORGEST de référence Qi06) en insistant surtout sur les tiges non inventoriées (CD5 - Classe de diamètre 5 cm – 2,5 à 7,5 cm) et en respectant la proportion Chêne-Arbousier existante.

Effets sur l'ensemble du peuplement



Effet sur les tiges inventoriées (CD10 - Classe de diamètre 7,5 à 12,5 cm) par essence



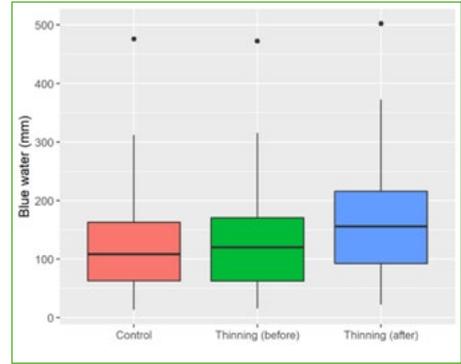
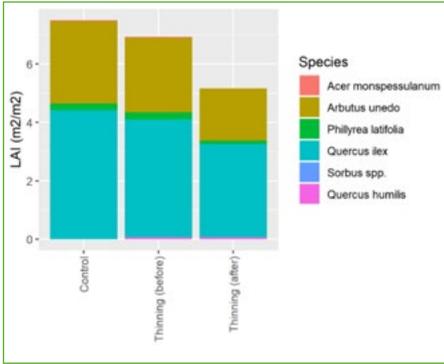
L'intervention requiert l'extraction de 53% des tiges initiales et, plus précisément, la coupe de 964 tiges/ha inventoriées (CD \geq 10) et 2.512 tiges/ha non inventoriées (CD5). L'intervention porte sur 23% de la surface terrière initiale, en laissant un G final de 257m²/ha. Le couvert final est de 75%. L'action a permis de réduire la forte concurrence initiale sans ouvrir la canopée.

La structure de peuplement mixte a également été maintenue (en respectant les essences accompagnantes) et une structure peu vulnérable aux grands incendies de forêt (GIF) a été planifiée.

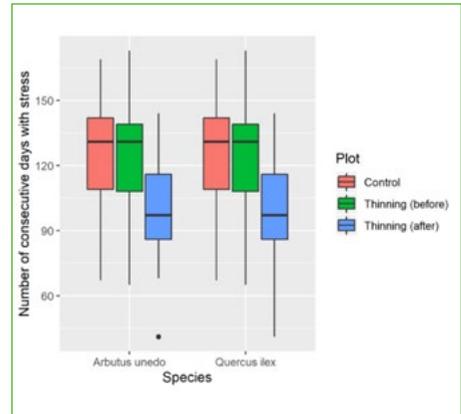
3.5.2.4 Effet de l'intervention sur le bilan hydrique

Ci-après, les résultats d'une étude de simulation du bilan hydrique suivant le modèle *Medfate* (plus de détails à la section 3.2.1.4)

Effets sur le bilan hydrique et le stress dûs à la sécheresse de *Quercus ilex* et *Arbutus unedo*



Selon les halométries du modèle de bilan hydrique, l'intervention supposerait une réduction de l'indice de surface foliaire (LAI) de 6.92 à 5.17 m²/m², du fait, notamment, de la réduction du nombre de tiges. La conséquence sur le bilan hydrique de la placette, prédite plus haut par le modèle, inclut une augmentation moyenne de l'eau exportée de 136 à 172 mm/an. Par ailleurs, le modèle prévoit une réduction de la durée de la période sous stress pour cause de sécheresse de 126 à 101 jours/an, en moyenne, pour *Quercus ilex* et *Arbutus unedo*.



3.5.2.5 Évaluation finale de l'intervention

L'intervention réalisée sur le peuplement avait comme objectifs principaux : (i) l'augmentation de la vitalité du peuplement (plus de résilience), (ii) une plus grande efficacité en consommation d'eau (eau verte), et (iii) un éventuel impact sur le débit (eau bleue). La conservation et l'amélioration de la biodiversité ainsi que la diminution de la vulnérabilité face aux GIF étaient des objectifs secondaires.

L'éclaircie par le bas a permis de réduire la concurrence en favorisant la disponibilité de ressources pour les tiges restantes. On peut espérer que l'amélioration de la vitalité du peuplement se traduira à moyen et à long terme par une augmentation du volume de bois (croissance en diamètre et hauteur) ce qui impliquera une meilleure fixation du carbone à l'échelle individuelle.

Par ailleurs, en maintenant un couvert élevé, on espère contrôler les rejets (non souhaités, puisque l'on recherche une structure régulière moins vulnérable aux GIF, ainsi que la stimulation des tiges monopodiales et celles de plus grande taille).

Les résultats de l'application du modèle théorique MEDFATE semblent indiquer que l'action a permis d'augmenter à court terme l'eau disponible pour la végétation et l'eau qui s'écoule dans le bassin versant grâce à une réduction significative de l'interception initiale.

Les relevés des débits sortants du bassin versant faisant l'objet d'une comparaison avec ceux du bassin versant-contrôle (tous deux évalués), les changements réels survenus après intervention pourront être mesurés dans les prochaines années.

Finalement, le traitement sylvicole a conservé la biodiversité initiale en maintenant les essences initialement présentes et en conservant les tiges singulières (arbres de grandes dimensions, tiges avec micro-habitats et bois mort). Une fois les rémanents de la coupe réduits (dans les années à venir) la structure devrait être peu vulnérable aux GIF.

3.6 EZPROGUI (NAVARRA)

3.6.1 Fiche descriptive du peuplement

Emplacement du peuplement



● Peuplement de l'action



Limites du peuplement



Image du type de peuplement



Partenaire : Gestión Ambiental de Navarra-Nafarroako Ingurumen Kudeaketa



Emplacement de l'action : Navarre, Grupo de Montes de Sabaiza-Patrimonio Forestal de Navarra (Ezprogui))

Formation forestière : Pinède de Pin noir d'Autriche (*Pinus nigra* var. *Austriaca*) provenant de repeuplement

Superficie du peuplement sélectionné : 2 ha

Propriétaire/Gestionnaire : Gouvernement de la Navarre

Date du début de l'intervention : 16/10/2017

Objectifs généraux :

1. Réguler la concurrence en matière de ressource hydrique sur la surface boisée et accroître ainsi la vitalité du peuplement.

Objectifs de l'opération :

La placette sera divisée en deux sous-placettes de même taille pour :

1. Réduire la densité (aprox. 30% de G)
2. Réduire la densité (aprox. 15% de G)
3. Débarder à l'auto-chargeur

État du peuplement avant traitement**État du peuplement après traitement****Résultats attendus de l'intervention**

- Amélioration de l'état hydrique et de la vitalité des tiges restantes après réduction de la densité.
- Diminution de la sensibilité à l'attaque d'agents pathogènes.
- Diminution de l'évapotranspiration du peuplement et amélioration du bilan hydrique avec augmentation de l'infiltration et de la quantité d'eau disponible.

Description détaillée du peuplement faisant l'objet de l'action

Topographie : Le peuplement se trouve sur un versant à pente modérée (22,5°-23°), et orienté à 110°. L'altitude oscille entre 865-900 m.

Climat : Selon la classification de Allué, la montagne de Sabaiza appartient au type phytoclimatique néroméditerranéen authentique, ou méditerranéen de transition, dont les principales caractéristiques sont :

- températures minimales du mois le plus froid ne dépassant pas -7 °C
- durée de la sécheresse : 2 mois (juillet et août)
- précipitations moyennes annuelles : environ 750 mm
- période de gelées probables : plus de 6 mois ; période de gelées sûres < 2 mois

Sol : Selon la Carte géologique de la Navarre 1 :25000 Feuille 174-1, les milieux sont composés de sols remontant à l'Ère Tertiaire. Les sols s'appuient sur une alternance de grès et de lutites ocres.

Les sols sont classés comme superficiels sur du matériel friable (selon la classification de la FAO, Régosols ou d'après la classification américaine, *Xerorthents lithiques*). Ils contiennent des inclusions *Xerorchrept calcixérollique* et de roche dominante.

Il s'agit donc de sols superficiels sur du matériel friable ; ils sont formés d'argiles, de limons et de marnes, avec des grès et des calcaires ; horizons de type A1-B2-Cca, à texture principalement argileuse ou limono-argileuse selon le type de roche mère. Ce sont donc des sols à pierrosité faible ou nulle qui ont une structure granulaire, bien drainés avec un régime hydrique xérique et des calcaires sur tous les horizons.

Végétation : L'essence principale de Sabaiza est le Pin noir d'Autriche qui représente plus du 77% de la superficie des reliefs de Sabaiza. Toute cette surface a été repeuplée artificiellement dans les années 50-60.

Après le Pin noir d'Autriche, l'essence la plus présente est le chêne pubescent qui représente 9% du peuplement. Cette essence est secondaire en nombre sur la surface mais elle est autochtone et mérite donc d'être conservée.

On retrouve également, en moindre proportion, du Pin d'Alep, du Pin sylvestre, des peuplements mixtes de conifères et feuillus, des Hêtres, des mélanges de feuillus, du Chêne faginé, etc.

3.6.2 Description et évaluation quantitative de l'action

3.6.2.1 État initial du peuplement de l'action

Dans cette pinède de plantation à base de Pin laricio, on a observé, ces deux dernières années, que certaines tiges avaient séché à une vitesse hors du commun ou du moins inconnue jusqu'ici, et qu'elles présentaient des symptômes de dépérissement. Les tiges souffrant d'une défoliation sévère provoquée par la processionnaire étaient très affaiblies et notamment celles qui se trouvaient dans les zones les plus hautes, sur des sols moins profonds. Le manque d'eau et les températures élevées de ces derniers automnes et étés, sont à l'origine de la mort de ces tiges déjà affaiblies.

L'essence principale de Sabaiza est le Pin laricio d'Autriche, qui représente plus de 77% de la superficie des forêts de Sabaiza, une surface entièrement repeuplée artificiellement dans les années 50-60.

Après le Pin laricio d'Autriche, le Chêne pubescent, une espèce autochtone, occupe 9% de la surface.

On retrouve aussi, en moindre proportion, d'autres essences comme le Pin d'Alep, le Pin sylvestre, des peuplements mixtes de conifères et de feuillus, du Chêne faginé, etc.

L'état d'origine du peuplement est décrit à partir des données relevées avant intervention sur les parcelles de contrôle et d'action. Il s'agit d'un peuplement issu du reboisement et totalement

dominé par la pinède de Pin noir d'Autriche (*Pinus nigra* var. *Austriaca*). Aucune autre essence n'est présente dans la strate supérieure.

Peuplement ACTION	Densité (>7,5 cm) (tiges/ha)	G (m ² /ha)
A1 : <i>Pinus nigra</i> var. <i>Austriaca</i>	672	25,35
A2 : <i>Pinus nigra</i> var. <i>Austriaca</i>	768	24,5
Peuplement CONTRÔLE	Densité (>7,5 cm) (tiges/ha)	AB (m ² /ha)
C1 : <i>Pinus nigra</i> var. <i>Austriaca</i>	512	25,16
C2 : <i>Pinus nigra</i> var. <i>Austriaca</i>	512	21,26

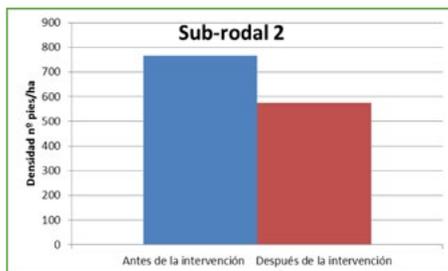
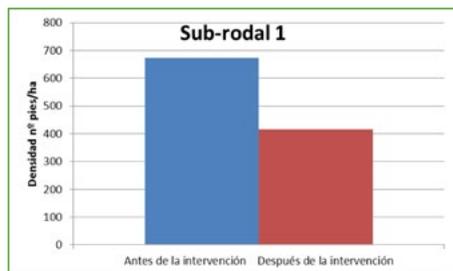
S'il n'y a pas de strate de juvéniles (dbh < 7,5 cm), on trouve en revanche du matériel régénéré de hauteur inférieure à 1,30 mètres, avec une claire prévalence de tiges de *Pinus nigra*, et la présence sur cette strate, quoiqu'en moindre proportion, de tiges de *Quercus faginea*.

Finalement, les strates arbustive et herbacée dominent la couverture herbacée (60-80%). Dans le groupe des arbustives, les *Rubus ulmifolius*, *Buxus sempervirens*, *Rosa Canina*, *Juniperus communis* et *Crataegus monogyna* sont dominants.

3.6.2.2 Caractérisation quantitative de l'intervention

L'effet de l'intervention est décrit à partir des données collectées sur la placette avant et après l'intervention.

Effets sur la strate arborée (dbh > 5 cm). *Quercus pubescens*.

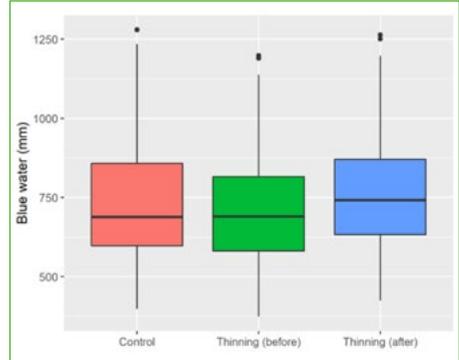
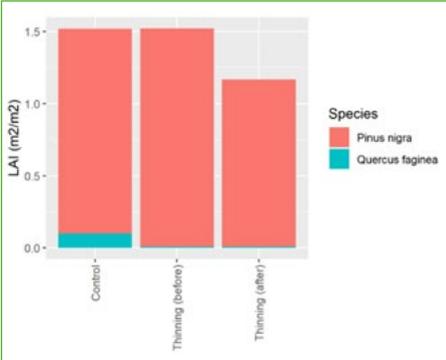


L'intervention a eu un effet modéré sur la strate arborée, composée exclusivement de *Pinus nigra* var. *austriaca* sur la placette mesurée. La densité de cette essence est passée de 672 à 416 tiges/ha sur le sous-peuplement 1, et de 768 à 576 tiges/ha sur le sous-peuplement 2. L'effet sur la surface terrière est plus visible : elle passe de 25,35 à 17,59 m²/ha (sous-peuplement 1) environ 30% de G et de 24,5 à 20,9 m²/ha (sous-peuplement 2) environ 15% de G.

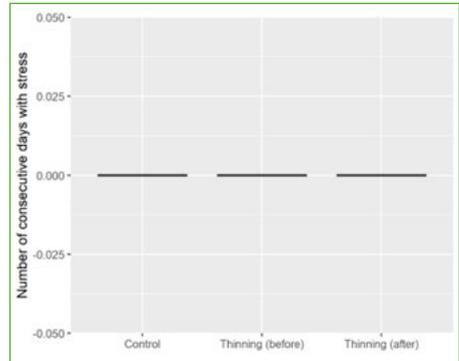
3.6.2.3 Effet de l'intervention sur le bilan hydrique

Ci-après, les résultats d'une étude de simulation du bilan hydrique selon le modèle *Medfate*

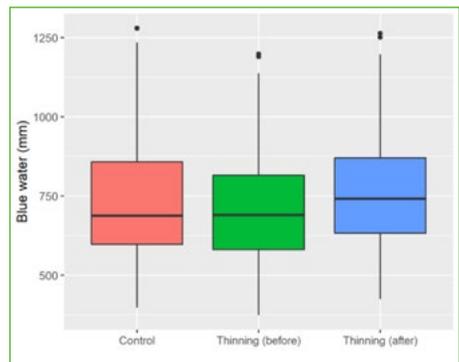
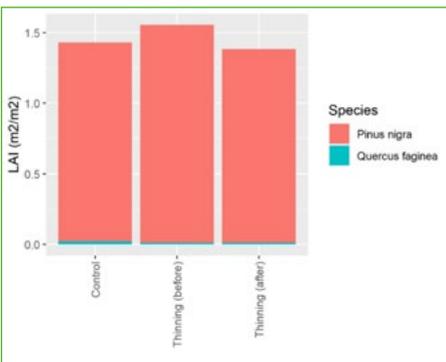
Sous-peuplement 1

Effets sur le bilan hydrique et le stress pour cause de sécheresse de *Pinus nigra*

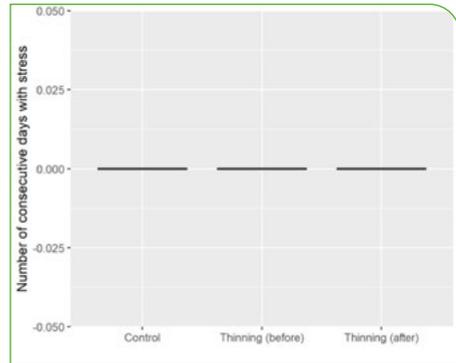
Selon les halométries du modèle de bilan hydrique, l'intervention supposerait une réduction de l'indice de superficie foliaire (LAI) de 1.52 à 1.17 m²/m². La conséquence sur le bilan hydrique de la parcelle, prédite par le modèle inclut une augmentation de l'eau exportée de 732 à 788 mm/an de moyenne. D'autre part, le modèle prédit qu'il n'y a pas de problèmes de stress dû à la sécheresse sur les parcelles, pour *Pinus nigra*.



Sous-peuplement 2

Effets sur le bilan hydrique et le stress dû à la sécheresse de *Pinus nigra*

Selon les halométries du modèle de bilan hydrique, l'intervention représenterait une réduction de l'indice de surface foliaire (LAI) de 1.56 à 1.38 m²/m². La conséquence sur le bilan hydrique de la parcelle, prédite par le modèle inclut une légère augmentation de l'eau exportée de 726 à 752 mm/an de moyenne. D'autre part, le modèle prédit qu'il n'y a pas de problèmes de stress dû à la sécheresse sur les parcelles, pour le *Pinus nigra*.



3.6.2.4 Évaluation finale de l'intervention

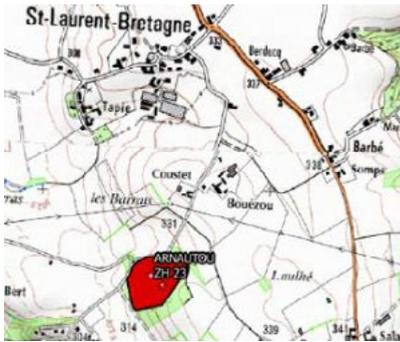
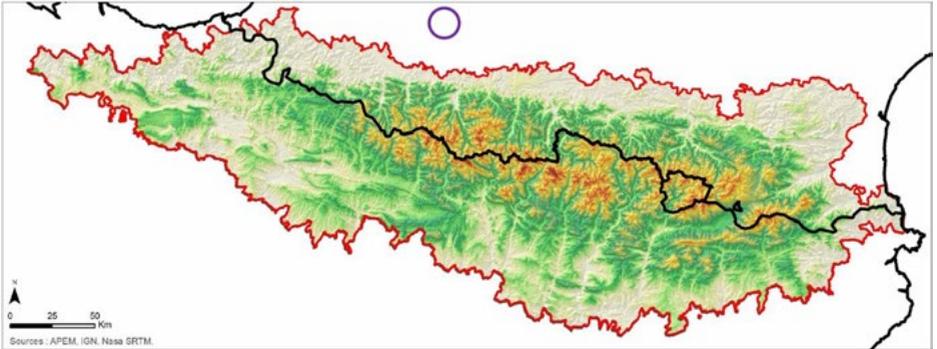
L'intervention réalisée sur le peuplement avait pour objectif principal de réguler la concurrence entre les arbres en matière de ressource hydrique, et d'accroître la vitalité du peuplement.

La mise en œuvre du traitement a permis de réduire la densité - plus intensément d'un côté et plus légèrement de l'autre - et donc la concurrence exercée dans la strate supérieure.

3.7 SAINT LAURENT BRETAGNE (PYRENEES ATLANTIQUES)

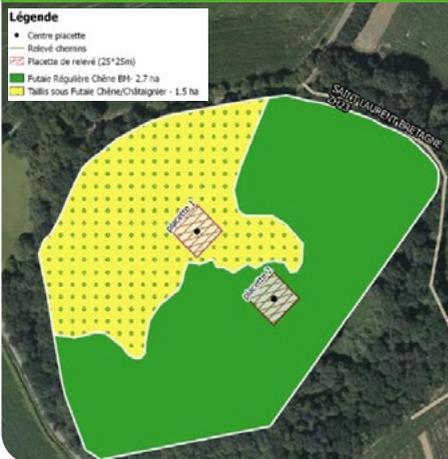
3.7.1 Fiche descriptive du peuplement

Emplacement de l'essai



Coordonnées centre placette	X RFG93	Y RFG93
Placette 1 : TSF	440608.3	6258146.1
Placette 2: FR	440660	6258103

Plan de l'essai



Type de peuplement





Partenaire : Centre Régional de la Propriété Forestière de Nouvelle- Aquitaine

Emplacement de l'essai : Pyrénées atlantiques, (64), Saint Laurent Bretagne

Peuplement forestier : Mélange futaie taillis (Chêne, Châtaignier)
Futaie de Chêne pédonculé

Surface de la parcelle sélectionnée : 4,2 ha

Propriétaire/Gestionnaire : F. Arnautou

Date de début de l'intervention : Mars 2014

Objectifs généraux :

1. Comparer les bilans hydriques et leurs évolutions en fonction du régime des peuplements : taillis de châtaignier avec réserves de chêne pédonculé d'une part et futaie régulière de chêne pédonculé d'autre part.
2. Réduire la densité du peuplement
3. Améliorer le potentiel de production du peuplement

Description de l'intervention :

1. Eclaircie du peuplement au cours de l'hiver 2014 de manière à :
 - préserver une partie en mélange futaie-taillis (témoin)
 - convertir le peuplement vers la futaie régulière sur une seconde partie via un balivage et une coupe forte du taillis
2. Installation d'un site de suivi au printemps 2017 : relevés « topographie, peuplement, végétation ».

Etat de l'essai avant traitement



Etat de l'essai post-traitement



Résultats attendus

- Identifier la structure du peuplement ayant la meilleure résistance ou résilience face aux sécheresses.
- Appréhender l'impact que peuvent avoir la structure des peuplements et le mélange des essences sur l'évolution du bilan hydrique, afin de concevoir une gestion adaptative aux effets du changement climatique.
- Dynamisation de la sylviculture afin de favoriser la croissance du Chêne pédonculé (et du Châtaignier), en situation pédologique limite.
- Evaluation de la production de bois d'œuvre de qualité (défauts de forme, volumes...)
- Comparaison des résultats obtenus selon différents modèles de bilans hydriques journaliers.

Description détaillée de l'essai

Topographie : La parcelle est située en haut de versant, orientée à l'Ouest. L'altitude est de 320 m.

Climat : Les données climatiques trentenaires de la période 1981-2010 mettent en évidence une température moyenne de 13°C et une pluviosité annuelle soutenue (1050 mm). Les précipitations sont bien réparties sur l'année.

Sol : Humus de forme mésomull. Sol à texture argilo limoneuse à limono argileuse, moyennement profond (limité par la présence de silex à 40 cm) et présentant une certaine acidité (pH de 5), sol plutôt séchant, ce qui peut être un facteur limitant pour le Chêne pédonculé.

Végétation : Située entre le piémont pyrénéen et les collines de l'Adour, cette parcelle de haut de versant est localisée au sein de la région IFN Coteaux du Nord Est –Béarn (SER F52- Collines de l'Adour).

3.7.2 Description et évaluation quantitative de l'action

3.7.2.1 Description des mesures réalisées

Cet état Zéro est effectué sur les deux modalités étudiées : mélange taillis/futaie et futaie.

L'étude du peuplement se fait à partir d'une placette de 25 x 25 m, soit 625 m². Les 4 angles sont placés aux quatre points cardinaux à la boussole (100 grades pour l'est, 200 grades pour le sud, 300 grades pour l'ouest et 400 grades pour le nord) et le centre est enregistré au GPS afin que le périmètre de la placette soit facilement identifiable.

On relève alors les données suivantes :

- Strate arborée :
 - Surface terrière (tour relascopique).
 - Espèce et diamètre de tous les arbres ayant un diamètre normal > 7.5 cm sur les parcelles de 25 x 25 m.
 - Espèce et nombre de tiges des individus ayant une hauteur > 130 cm et diamètre com-

pris entre 2.5 et 7.5 cm sur une sous parcelle de 5 m de rayon.

- Espèce et estimation de la densité des individus ayant un diamètre < 2.5 cm et/ou hauteur < 130 cm sur une sous parcelle de 5 m de rayon.
- Position des arbres ayant un diamètre > 7.5 cm dans l'espace.
- Strate arbustive : Couverture (%) et hauteur moyenne de chaque espèce.
- Strate herbacée : Couverture (%) par groupe biologique (graminées ou non-graminées). On note si possible l'espèce la plus abondante.

L'étude du sol se fait à partir d'une fosse pédologique, réalisée à l'intérieur de la placette. On décrit les différents horizons rencontrés. Pour cela, on utilise la structure, la texture (% sable, % limon, % argile) et la pierrosité (% en volume de niveau occupé par les pierres supérieur à 10 x 10 cm de superficie).

Le bilan hydrique

Deux modèles seront utilisés pour analyser l'influence du régime forestier sur le bilan hydrique de deux peuplements :

- Le modèle de bilan hydrique journalier BILJOU,
- Le modèle MEDFATE.

L'analyse du bilan hydrique des deux peuplements se fait à partir :

- de l'étude du sol pour comprendre le stockage de l'eau et les réserves disponibles pour le peuplement.
- de la description du peuplement qui permet de caractériser l'utilisation et la consommation de l'eau du peuplement
- de données météo journalières qui proviennent des stations de Lembeye ou Pau-Uzein.

Suivi du site

Les mesures seront poursuivies annuellement jusqu'à n+5 puis tous les deux ans. Lors de chaque passage on relèvera selon le protocole déjà décrit :

- les diamètres, afin de comparer l'accroissement annuel.
- La surface terrière, afin de comparer l'évolution de la richesse du peuplement.
- le bilan hydrique, pour comparer la consommation en eau.

3.7.2.2 État initial du peuplement d'action

L'état initial est effectué le 22 avril 2017, après l'intervention sylvicole décrite ci-après.

Mars 2017	Essences	Densité	Surface terrière
Mélange taillis futaie balivé	Chêne et Châtaignier	672 tiges/ha	12 m ² /ha
Mélange taillis futaie témoin (non balivé)	Chêne et Châtaignier	1 059 tiges/ha	19.5 m ² /ha
Futaie	Chêne sessile et Chêne pédonculé	385 tiges/ha	20 m ² /ha

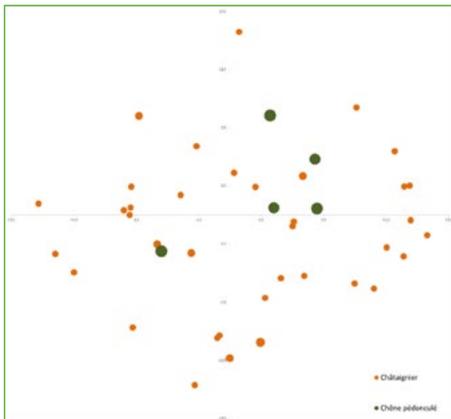
Le mélange taillis/futaie se compose principalement de deux essences. Le Châtaignier est présent en forte densité dans l'étage inférieur et le Chêne pédonculé occupe l'étage supérieur.

Pour la futaie, on observe le phénomène inverse avec un peuplement composé en majorité de Chêne pédonculé et accompagné par diverses essences feuillues.

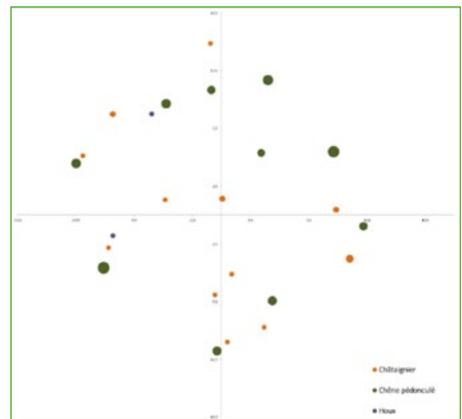
Les surfaces terrières sont élevées malgré l'intervention récente (janvier 2014).

Positionnement des arbres dans les deux placettes

Le positionnement est établi en relevant les distances et azimuts de chaque arbre par rapport au centre de la placette. La taille et la couleur des bulles dépendent de l'essence et du diamètre des arbres.



Futaie



Mélange taillis futaie balivé

3.7.2.3 Caractérisation quantitative de l'intervention

Durant l'hiver 2014 une coupe d'extraction de taillis a été mise en place. Cette exploitation était mécanisée avec l'utilisation d'un sécateur monté sur une pelle mécanique. Les prélèvements ont été effectués dans la partie mélange taillis futaie essentiellement (25-30 % du volume de taillis et 70t/ha) et se sont concentrés sur les brins de taillis concurrents de moindre qualité. Une zone témoin (« sans prélèvement ») a été conservée dans le mélange taillis futaie.

Dans la partie considérée aujourd'hui comme futaie régulière, le Chêne était dense et formait un couvert suffisamment important pour empêcher la régénération du taillis de Châtaignier.

Sur la partie mélange taillis/futaie, les réserves de Chêne étaient moins présentes ce qui a permis une régénération dynamique du Châtaignier par rejets de souche et l'apparition de francs-pieds issus de la germination de châtaignes.

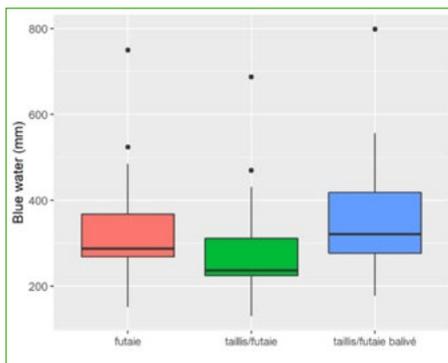
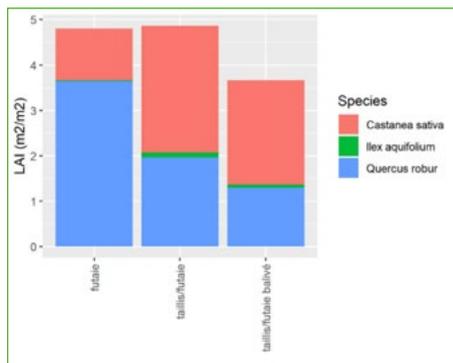
La gestion mise en place dans chacun des peuplements nécessitera les interventions sylvicoles suivantes :

- Un balivage dans la partie mélange futaie/taillis à n+5.

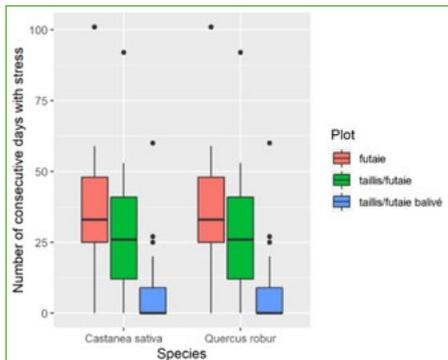
La poursuite des éclaircies et coupes d'amélioration sur la futaie de Chêne, à n+7.

3.7.2.4 Effet de l'intervention sur le bilan hydrique

Ci-après, les résultats d'une étude de simulation du bilan hydrique réalisée suivant le modèle *Medfate*



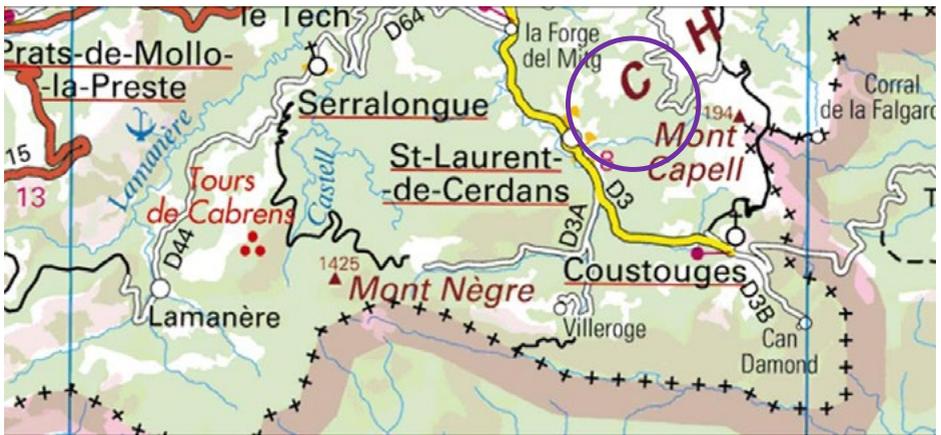
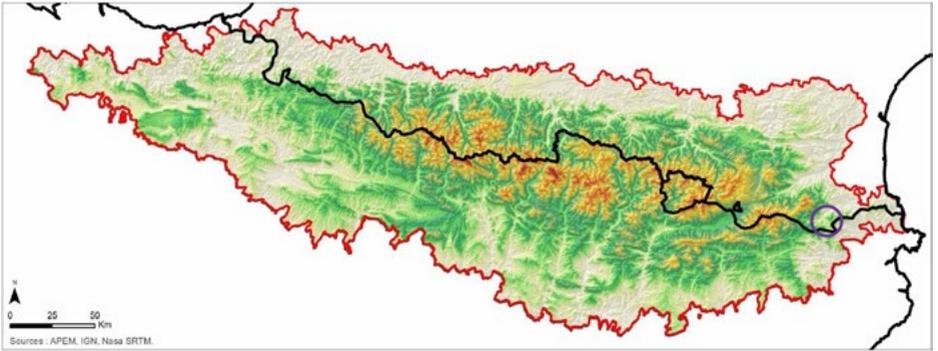
Selon les halométries du modèle de bilan hydrique, l'intervention entraînerait une réduction de l'indice de surface foliaire (LAI) de 4.86 à 3.67 m²/m². La conséquence prédite par le modèle sur le bilan hydrique de la placette consiste en une augmentation moyenne de l'eau exportée de 230 à 325 mm/an. Par ailleurs, le modèle prédit une réduction moyenne de la durée de la période sous stress pour cause de sécheresse de 30 à 10 jours/an, tant pour *Quercus robur* que pour *Castanea sativa*, même si cette estimation n'envisage pas la croissance post-intervention.



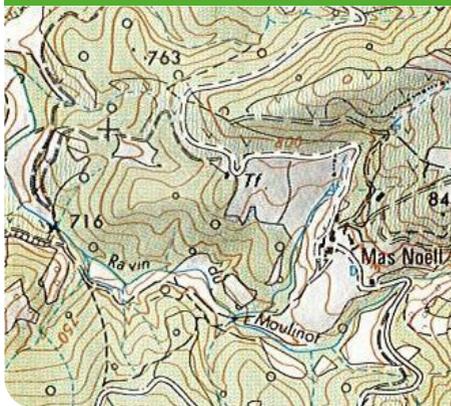
3.8 SAINT LAURENT DE CERDANS (PYRENEES ORIENTALES)

3.8.1 Fiche descriptive du peuplement

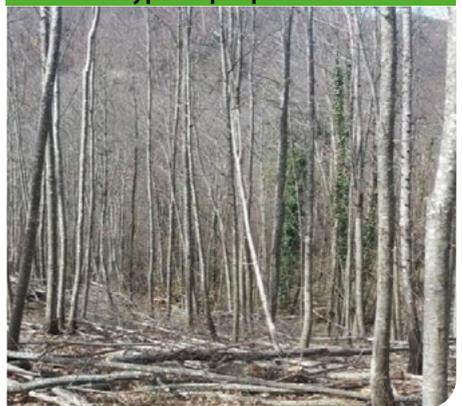
Emplacement de l'essai



Plan de l'essai



Type de peuplement





Partenaire : Centre Régional de la Propriété Forestière d'Occitanie

Emplacement de l'essai : Occitanie, Pyrénées-Orientales (66), Saint-Laurent de Cerdans

Peuplement forestier : Taillis de châtaignier

Surface de la parcelle sélectionnée : 2 ha

Propriétaire/Gestionnaire : SCI du Noell

Date de début de l'intervention : 2017

Objectifs généraux :

1. Réduction de la densité au profit des brins vigoureux (état sanitaire, croissance) dans l'optique d'un peuplement plus résistant et résilient
2. Favoriser le mélange avec le robinier et diverses autres essences présentant moins de signes de dépérissement

Description de l'intervention :

1. Eclaircie du peuplement au cours de l'hiver 2016-2017 par balivage (repérage de tiges d'avenir) et détourage (suppression des tiges directement concurrentes).
2. Relevés de terrain des placettes Témoin et Eclaircie en août 2017.

Etat de l'essai avant traitement



Etat de l'essai post-traitement



Résultats attendus de l'intervention

- Peuplement plus résistant aux extrêmes climatiques du fait du mélange d'essences et de la présence du robinier plus résistant que le châtaignier à la sécheresse.
- Peuplement plus résilient pour les mêmes raisons.
- Moindre taux de dépérissement.
- Régulation de la consommation en eau.
- Evaluation de la production de bois d'œuvre de qualité.

Description détaillée de l'essai

- Topographie :** La parcelle est située dans une combe sur un versant (15-20%), orientée au Sud-Ouest (SO). L'altitude varie entre 715 et 775 m.
- Climat :** Les données climatiques trentenaires de la période 1981-2010 attestent d'une température moyenne de 12,6°C et surtout d'une pluviosité annuelle correcte (1050 mm). Sur la saison de végétation (d'avril à octobre), la pluviosité moyenne est de l'ordre de 650 mm et le mois le plus sec est le mois de juillet.
- Sol :** Située sur une arène granitique profonde (supérieure à 60 cm), le sol est de texture sableuse, avec une faible réserve en eau, une acidité prononcée.
- Végétation :** Située dans la vallée de la Tech, cette parcelle est au cœur de la région IFN du Vallespir. Le guide des stations (CRPF, 2012) permet d'en déterminer la station : G12 – Stations de l'étage supraméditerranéen en conditions moyennes. En termes d'habitat, les parcelles plantées il y a très longtemps sont le domaine du châtaignier (code Corinne Biotope 41.9). Avant l'intervention sylvicole, le peuplement forestier était un taillis dominé très largement par le châtaignier de 15 à 20 ans. Certaines des cépées montrent des signes d'épuisement par manque de renouvellement sexué et de nombreux châtaigniers présentent des signes de dépérissements.
- Dans le but d'améliorer l'état sanitaire du peuplement et le potentiel de production, une éclaircie a permis de sélectionner les tiges les plus vigoureuses et de favoriser le mélange en privilégiant par le balivage les robiniers mais également des érables, tilleuls, frênes ou chênes...

3.8.2 Description et évaluation quantitative de l'action

3.8.2.1 Description des mesures relevées

Le peuplement initial et le peuplement éclairci ont fait l'objet d'un inventaire (placette carrée de 25 m de côté) de sorte à disposer de données quantitatives et qualitatives sur le peuplement forestier, le couvert des espèces arborées, arbustives et herbacées (graminées et non-graminée). Le renouvellement et la régénération ont été évalués sur une sous-placette circulaire de 5m de rayon.

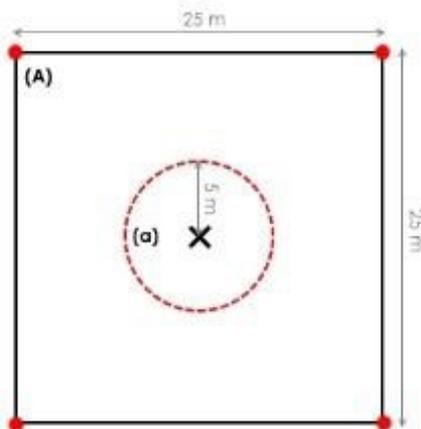


Figure 6 Configuration des parcelles d'inventaire, avec une placette (A) carrée de 25 x 25 mètres, dans laquelle sont inventoriés tous les arbres de diamètre à 1,3m > 5 cm ; et une sous-placette (a) circulaire de 5 mètres de rayon dans laquelle sont inventoriés tous les arbres de diamètre à 1,3m < 5 cm.

3.8.2.2 État initial du peuplement de l'action

Le peuplement initial est un mélange jeune taillis dense (1056 tiges/ha) dominé par *Castanea sativa* (656 tiges/ha) d'un diamètre quadratique moyen de 16,33 cm (Tableau 1). Dans la strate supérieure, *Robinia pseudoacacia* et *Acer platanoides* complètent le peuplement. Les rejets de *Castanea sativa* présentent des signes de perte de vitalité (dessèchement) imputable au vieillissement de l'ensouchement mais également aux modifications climatiques.

Les arbres inférieurs à 5 cm de diamètre à 1,3 m sont encore nombreux de fait des cépées mais nombre d'entre eux n'ayant que très peu d'accès à la lumière sont dépérissants.

Enfin, la strate herbacée présente un couvert d'environ 70 %. Les graminées couvrent environ 50% et sont dominée par *Deschampsia flexuosa*. Dans les 20 % restants, *Quercus pubescens* est l'espèce dominante.

Tableau 4 Caractéristiques dendrométriques principales du peuplement avant l'intervention

Variable	<i>C. sativa</i>	<i>R.pseudoacacia</i>	Autres
Densité des arbres adultes ⁵ (tiges/ha)	656	384	16
Surface terrière (m ² /ha)	13,74	7,75	0,28
Diamètre quadratique moyen (cm)	16,33	16,02	15
Densité des jeunes arbres ⁶ h>1,3 m (tiges/ha)	509	127	254
Densité des jeunes arbres h<1,3 m (tiges/ha)	0	0	254

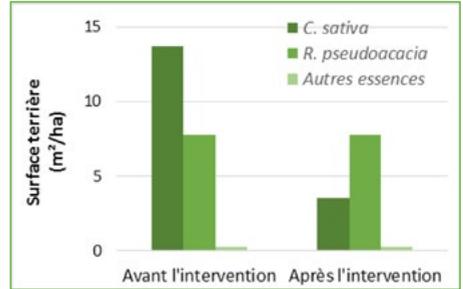
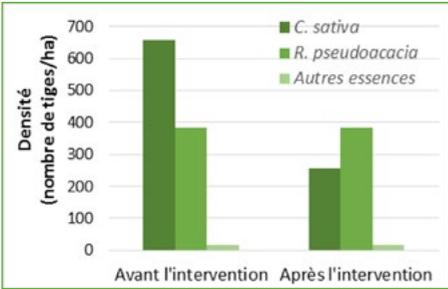
3.8.2.3 Caractérisation quantitative de l'intervention

L'intervention a consisté en un balivage (sélection des tiges les plus vigoureuses) et un détournage de sorte à supprimer les tiges directement concurrentes. Lors du choix des arbres, *Robinia pseudoacacia*, a été favorisé pour rééquilibrer le mélange d'essences.

⁵ Individus adultes : diamètre à 1,3m > 5 cm

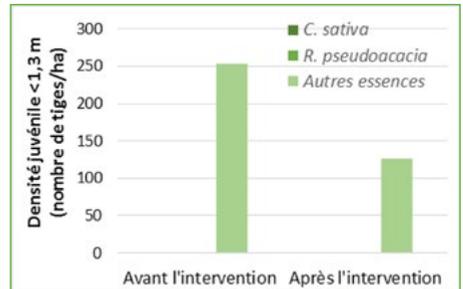
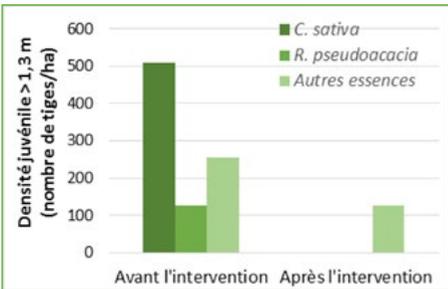
⁶ Individus jeunes : diamètre à 1,3m < 5 cm

Effets sur la strate arborée (diamètre à 1,3m > 5 cm).



L'intervention a eu une influence forte sur la strate arborée, notamment en ciblant *Castanea sativa* et principalement les tiges dépérissantes. La densité globale est passée de 1056 à 656 tiges/ha, soit une réduction de près de 38%. L'effet est encore plus marqué sur la surface terrière qui est passé de 21,77 à 11,60 m²/ha, soit 46,71% de prélèvement. Cette intervention peut paraître très forte, mais elle est intervenue sur un peuplement jeune dans sa phase de croissance la plus importante et on peut donc espérer que le peuplement se refermera rapidement. En outre, le rééquilibrage entre les deux essences dominantes est effectif et *Robinia pseudoacacia* se retrouve même majoritaire après exploitation.

Effets sur la strate arbustive et le renouvellement (diamètre à 1,3m < 5 cm)

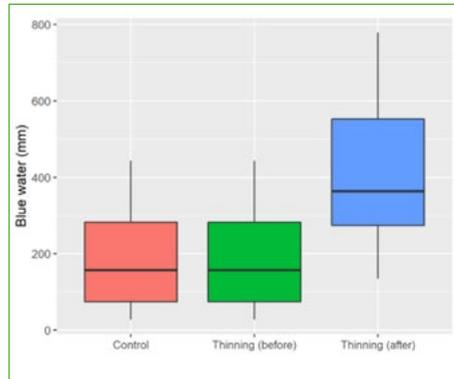
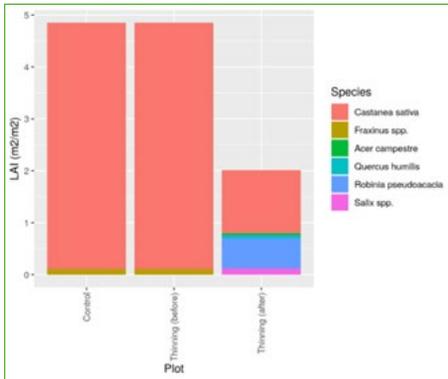


L'intervention a souvent individualisé les plus belles tiges sur leur cépée. Ainsi, les tiges dominées de la cépée ont été exploitées d'où la diminution très importante des tiges de *Castanea sativa* inférieures à 5 cm de diamètre. La régénération (hauteur inférieure à 1,3m) était initialement peu présente sur la parcelle en raison de son couvert fermé et à sa densité importante ; l'intervention n'a donc pas ciblé cette strate de la végétation.

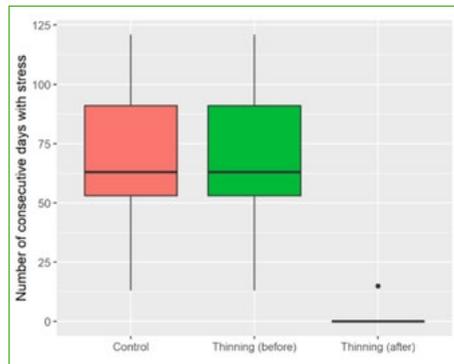
3.8.2.4 Effet de l'intervention sur le bilan hydrique

Ci-dessous, les résultats d'une étude de simulation du bilan hydrique réalisée selon le modèle *Medfate*.

Effets sur le bilan hydrique et le stress dû à la sécheresse de *Castanea sativa*



Selon les halométries du modèle de bilan hydrique, l'intervention entraînerait une réduction moyenne de l'indice de la surface foliaire (LAI) de 4.85 à 1.98 m²/m². La conséquence sur le bilan hydrique de la placette, prédite par le modèle consiste en une augmentation moyenne de l'eau exportée de 199 à 410 mm/an. Par ailleurs, le modèle prédit une réduction moyenne de la durée de la période de stress hydrique de 60 à 0 jours/an, pour *Castanea sativa*, même si cette estimation n'envisage pas la croissance post-intervention.



3.8.2.5 Évaluation finale de l'intervention

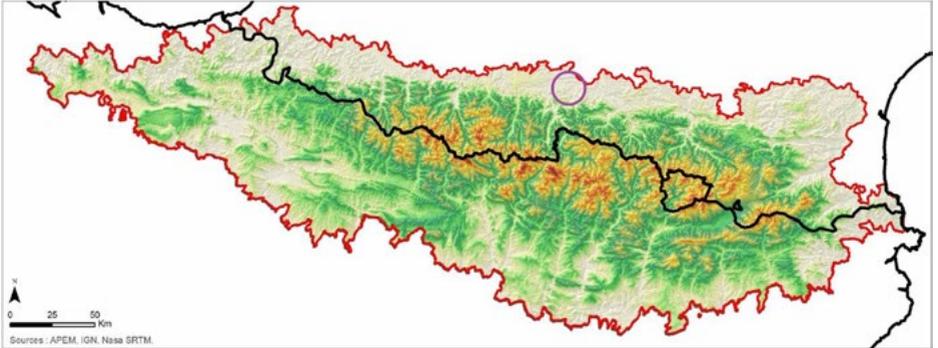
Les choix sylvicoles opérés sur cette parcelle visent à : (i) diminuer la densité du peuplement forestier, (ii) rééquilibrer le mélange d'essences et (iii) minimiser les risques face aux conditions climatiques incertaines sélectionnant les tiges les plus vigoureuses au moment de l'éclaircie.

L'intervention étant encore trop récente, il n'est pour le moment pas possible de conclure définitivement et il faudra attendre la prochaine éclaircie pour juger du bienfondé de cette intervention et de ses résultats, notamment sur l'état sanitaire et la productivité. Dans l'immédiat, les modélisations issues du modèle Medfate tendent à un résultat tout-à-fait bénéfique pour le peuplement, se traduisant par une réduction très significative du nombre de jours de stress hydrique, et une augmentation de la quantité d'eau exportée.

3.9 RIEUCAZÉ (HAUTE-GARONNE)

3.9.1 Fiche descriptive du peuplement

Emplacement de l'essai



Plan de l'essai



Type de peuplement





Partenaire : Centre Régional de la Propriété Forestière d'Occitanie

Emplacement de l'essai : Occitanie, Haute-Garonne (31), Rieucazé

Peuplement forestier : Jeune plantation de douglas

Surface de la parcelle sélectionnée : 2 ha

Propriétaire/Gestionnaire : GF Famille JULLIA Gilbert

Date de début de l'intervention : 2018

Objectifs généraux :

1. Comparer des provenances de douglas par rapport à leur résistance aux sécheresses estivales
2. Comparer le peuplement naturel au peuplement planté de douglas

Description de l'intervention :

1. Coupe rase du peuplement initial (hiver 2017-2018)
2. Préparation du sol (potets travaillés) et broyage en novembre 2018
3. Plantation à 780 plants/ha de trois blocs (luzette pur, californien pur et mélange par ligne californien-luzette) en janvier 2019
4. Protection des plants contre le gibier (janvier 2019)

Etat de l'essai avant traitement



Etat de l'essai post-traitement



Résultats attendus de l'intervention

- Identifier une provenance ayant une meilleure résistance face aux sécheresses.
- Identifier une provenance ayant un faible taux de dépérissement.
- Régulation de la consommation en eau par une densité de plantation faible.
- Evaluation de la production de bois d'œuvre de qualité (défauts de forme, volumes...).

Description détaillée de l'essai

- Topographie :** La parcelle est située en bas de versant (15-25%), orientée au Sud-Est (SE). L'altitude varie entre 400 et 450 m.
- Climat :** Les données climatiques trentenaires de la période 1981-2010 mettent en évidence une température moyenne de 12,1°C et surtout une pluviosité annuelle modérée (800 mm). Sur la saison de végétation (d'avril à octobre), la pluviosité moyenne est de l'ordre de 470 mm avec un déficit hydrique important au mois de juillet (mois subsec).
- Sol :** Située sur flysch, le sol, à texture argilo-limoneuse, est assez riche, épais (60 cm et plus) et d'acidité modérée (pH de 5,5).
- Végétation :** Située au plein cœur du piémont pyrénéen, cette parcelle de fond de vallon est située au sein de la région IFN des Petites-Pyrénées. Le guide pratique de reconnaissance des milieux (GONIN, 2001) permet d'en déterminer la station : Chênaie-Frênaie-Hêtraie fraîche de versant de vallon - 3V. En termes d'habitat, le peuplement d'origine correspond à une Hêtraie à Androsème (code Corinne Biotope 41.1). Avant l'intervention sylvicole, le peuplement forestier était un mélange taillis-futaie dominée par des réserves principalement de chêne et de hêtre de 80 à 100 ans. Le taillis d'une trentaine d'années était relativement lâche et majoritairement constitué de châtaignier et de charme. Dans le but de diversifier sa forêt, le propriétaire a souhaité tester une essence non encore présente sur sa propriété : le douglas. En limite de station (faible altitude, précipitations limitées) et au regard du changement climatique, il a été conseillé de diversifier les provenances en testant notamment la provenance californienne des douglas dans l'optique de diminuer les risques.

3.9.2 Description et évaluation quantitative de l'action

3.9.2.1 Description des mesures relevées

Au sein des trois modalités de plantation (provenance Luzette pure, provenance Californie pure et mélange par ligne des deux provenances), un échantillon de 80 arbres est suivi dans le temps (soit des placettes d'environ 720m² chacune : 12m sur 60m).

Le suivi de l'essai est focalisé pour les premières années sur le taux de reprise, les défauts de forme, et la croissance des arbres. Les relevés de terrain sont ainsi prévus pour l'année de plantation n , ainsi que les années $n+1$, $n+2$, $n+3$ et $n+5$ (statut de l'arbre, hauteur totale, état sanitaire, défaut de croissance), puis tous les 5 ans (circonférence à 1,3m).

En ce qui concerne le peuplement initial, un inventaire a été réalisé avant l'intervention de sorte à disposer de données quantitatives et qualitatives concernant le peuplement adulte (placette carrée de 25 m de côté), le renouvellement et la régénération (sous-placette circulaire de 5m de rayon), ainsi que le couvert des espèces arborées, arbustives et herbacées (graminées et non-graminées).

3.9.2.2 État initial du peuplement de l'action

Le peuplement initial est un mélange taillis-futaie dominé par des réserves de *Quercus petraea* d'un diamètre quadratique moyen de 40,95 cm pour environ 208 tiges/ha (Tableau 15). Dans la

strate supérieure (20 à 26m), *Fagus sylvatica* et *Prunus avium* complètent le peuplement de futaie. Le taillis occupe une strate inférieure (14 à 20m) et est dominé par *Carpinus betulus*, *Castanea sativa* et *Acer campestre*.

Le peuplement adulte étant fermé avec un couvert important, il ne laisse passer que très peu de lumière limitant ainsi la strate arbustive et la régénération à quelques rares pieds de *Carpinus betulus*, *Ilex aquifolium* et *Crataegus monogyna*.

Enfin, la strate herbacée présente un couvert d'environ 65 %. Les graminées couvrent environ 15% et sont dominées par *Carex flacca* et *Mélica uniflora*. Dans les 50 % restants, *Ruscus aculeatus* est l'espèce dominante et sa densité parfois importante peut gêner la régénération.

Tableau 5 Caractéristiques dendrométriques principales du peuplement avant l'intervention

Variable	Q. petraea	F.sylvatica	C. betulus	Autres
Densité des arbres adultes ⁷ (tiges/ha)	208	48	432	368
Surface terrière (m ² /ha)	27,39	1,25	5,46	7,84
Diamètre quadratique moyen (cm)	40,95	18,19	12,68	16,48
Densité des jeunes arbres ⁸ h>1,3 m (tiges/ha)	0	0	64	80
Densité des jeunes arbres ² h<1,3 m (tiges/ha)	75	50	400	175

3.9.2.3 Description de l'intervention sylvicole

L'intervention a consisté en une transformation du peuplement qui est passé par une coupe rase du peuplement initial.

Un broyage en plein des rémanents et de la végétation a permis de faciliter l'accès aux planteurs mais également de limiter la vitalité de la végétation concurrente (en eau et en lumière) lors de la première année de plantation. L'installation des plants a elle été facilitée par une préparation des sols localisée par la mise en œuvre de potets travaillés sur une profondeur de 50cm. Cette opération a permis d'ameublir le sol pour faciliter l'enracinement des plants ; elle peut, sans l'avoir vérifié, également avoir amélioré la rétention en eau localement par effet « cuvette » dans le sol.

⁷ Individus adultes : diamètre à 1,3m > 5 cm

⁸ Individus jeunes : diamètre à 1,3m < 5 cm

La densité de plantation a elle-même été modulée vers le bas par rapport aux plantations traditionnelles dans l'espoir de minimiser la concurrence pour l'eau des futurs arbres ; ainsi au lieu d'une densité traditionnelle à 1100 plants/ha, la parcelle a été plantée à 780 plants/ha soit 29 % de moins. La trame de plantation a en outre été adaptée pour prévoir directement des cloisonnements d'exploitation de 5m de large de sorte à éviter à l'avenir les éclaircies systématiques en faveur des éclaircies sélectives.

Enfin, une attention particulière a été portée au choix du matériel végétal de plantation en diversifiant les provenances. Or la traditionnelle provenance Luzette, le choix s'est porté sur la provenance californienne dont on espère que les capacités de résistance et de résilience aux sécheresses et canicules soient meilleures. En outre, le fait de mélanger plusieurs provenances permet de diversifier les patrimoines génétiques dans l'espoir de minimiser les risques face à des évènements climatiques extrêmes.

3.9.2.4 Effet de l'intervention sur le bilan hydrique

Les peuplements avant intervention et après intervention sont tellement différents pour le moment (hors les espèces, un peuplement est adulte et l'autre très jeune) qu'une comparaison à l'heure actuelle du bilan hydrique s'avère peu judicieuse.

En revanche, d'ici une quarantaine d'année, il sera possible d'étudier l'état sanitaire et le bilan hydrique entre le témoin naturel et le peuplement planté de douglas. Enfin, sans attendre 40 ans, une comparaison de croissance et d'état sanitaire des deux provenances de douglas pourra également nous apporter des enseignements intéressants.

3.9.2.5 Bilan de l'intervention sylvicole

Les choix sylvicoles opérés sur cette parcelle visaient à : (i) diversifier les essences en place, (ii) comparer des provenances de douglas notamment quant à leurs caractères de résistance-résilience et (iii) minimiser les risques face aux conditions climatiques incertaines en mélangeant les essences et provenances.

La nouvelle plantation étant encore trop jeune pour obtenir des conclusions notoires, il faudra patienter a minima une dizaine d'années pour obtenir des premiers enseignements ; notamment sur le taux de reprise à la plantation, la mortalité dans les 5 premières années mais également de potentielles différences d'accroissement juvénile et leurs répercussions sur la productivité.

3.10 VILLANÚA (ARAGÓN)

3.10.1 Fiche descriptive du peuplement

Emplacement de l'essai



Plan de l'essai



Type de peuplement



Partenaire : Instituto Pirenaico de Ecología (CSIC)

Emplacement de l'action : Aragón, Huesca, Villanúa

Formation forestière : Sapinière de montagne.

Superficie du peuplement sélectionné : 4.93 ha

Propriétaire/Gestionnaire : Mairie de Villanúa/Gouvernement d'Aragon

Date du début de l'intervention : Juin 2017



Objectifs généraux :

1. Réduction de la concurrence du peuplement au moyen de l'extraction d'individus dont l'avenir peut être compromis.
2. Réaliser l'intervention avec une technique qui minimiserait ses effets négatifs.

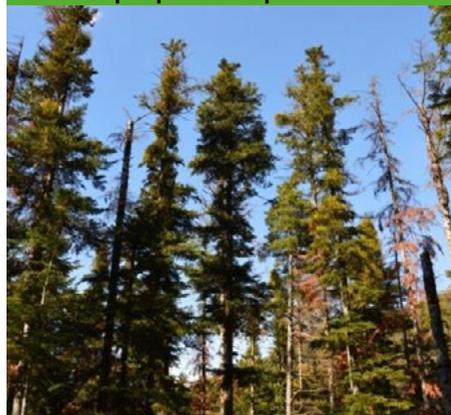
Objectifs de l'opération

1. Sélection d'individus à l'avenir compromis.
2. Abattage de ces individus.
3. Tronçonnement des rémanents de bois.
4. Transport du bois et réparation des accès.

État du peuplement avant traitement



État du peuplement après traitement



Résultats attendus de l'intervention

On peut s'attendre à ce que les arbres exercent moins de concurrence entre eux après l'intervention, ce qui ira probablement de pair avec une stimulation de la croissance et une amélioration de la vitalité à court terme tant à l'échelle individuelle que sur l'ensemble de la forêt. Par ailleurs, une moindre densité d'individus implique une meilleure disponibilité des ressources hydriques et donc l'atténuation du stress dû à la sécheresse ou, du moins, la diminution de ses effets négatifs. Finalement, ces actions permettront de déterminer l'impact de la gestion forestière face aux impacts dérivés du changement climatique dans les sapinières pyrénéennes.

Description détaillée du peuplement

Topographie : Altitude=1200-1350m.

Orientation=20-25°

Pente :10-15%

Climat : Même si le climat est tempéré dans la zone d'étude, avec une température moyenne annuelle de 8,5 °C et des précipitations de 1310 mm, la sapinière du Paco de Villanúa souffre malgré tout des sécheresses, comme l'indique l'indice de précipitation-évapotranspiration standardisé (SPEI, sigle anglais signifiant "Standardised Precipitation- Evapotranspiration Index"; <http://spei.csic.es/>). Extrêmement utile pour déterminer les effets des sécheresses sur les forêts, le SPEI rapporte des valeurs négatives (conditions sèches) et positives (conditions humides) à différentes échelles temporelles. Ainsi donc, ces dernières décennies, nous avons observé des périodes particulièrement sèches, comme 1994-1995, 2003-2005 et 2009-2012 selon l'indice SPEI d'août calculé sur une échelle de 4 mois.

Sol : Sols basiques. De type limoneux ou limoneux-sablonneux avec un pourcentage d'humidité d'environ $26 \pm 9\%$.

Végétation : Les parcelles sont dominées par *Abies alba* avec une présence faible de *Pinus sylvestris*. Sur la strate arbustive il y a présence d'essences telles que *Buxus sempervirens*, *Crataegus monogyna*, *Corylus avellana* ou encore *Ilex aquifolium*

3.10.2 Description et évaluation quantitative de l'action

3.10.2.1 Description mesures réalisées

1. Communication des objectifs de l'action aux partenaires et usagers (commune, touristes, gestionnaires, scientifiques) ;
2. Sélection et marquage de Sapins et de quelques Pins sylvestres selon les critères cités au point précédent ;
3. Relevé des caractéristiques dendrométriques de base : hauteur, diamètre, état sanitaire ;
4. Abattage des arbres sélectionnés. En général, on passe d'une densité d'environ 800 tiges/ha à 650 tiges/ha et la surface terrière prélevée est d'environ 19% du peuplement initial ;
5. Débardage des bois sous forme de grumes de dimensions réduites et débusquage au moyen d'un skidder depuis la piste ou depuis d'anciens sentiers ;
6. Tronçonnage sur place des rémanents pour atténuer l'impact visuel de la coupe ;
7. Traitement sanitaire des tiges éventuellement endommagées pendant l'intervention ainsi que des souches pour éviter les attaques potentielles de champignons pathogènes ;
8. Transport du bois et remise en état de la piste d'accès.

3.10.2.2 État initial du peuplement avant intervention

Avant l'intervention sur le peuplement on a constaté une nette prépondérance du sapin avec 680 tiges/ha. Le Pin sylvestre est aussi présent dans la strate arborée avec une densité de 104 tiges/

ha. En outre, dans la strate arborée nous retrouvons des tiges de *Corylus avellana* et *Crataegus monogyna*.

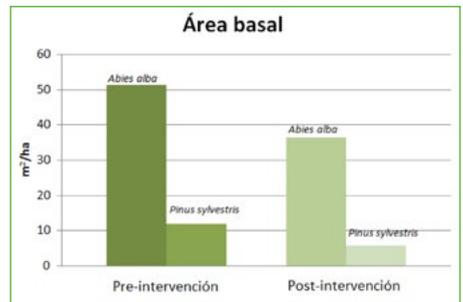
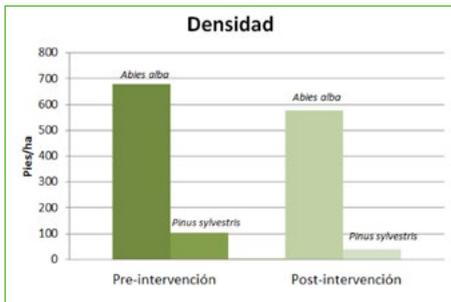
Dans la strate arbustive nous retrouvons *Crataegus monogyna*, *Buxus sempervirens* et *Ilex aquifolium*.

Essence	Densité (individu de diamètre > 7,5 cm) (tiges/ha)	Surface terrière (m ² /ha)
<i>Abies alba</i>	680	51
<i>Pinus sylvestris</i>	104	12
TOTAL	784	63

3.10.2.3 Description de l'intervention sylvicole

Ci-après, description de l'effet de l'intervention à partir des données relevées avant et après intervention sur la placette.

Effets sur la strate arborée (dbh > 5 cm).

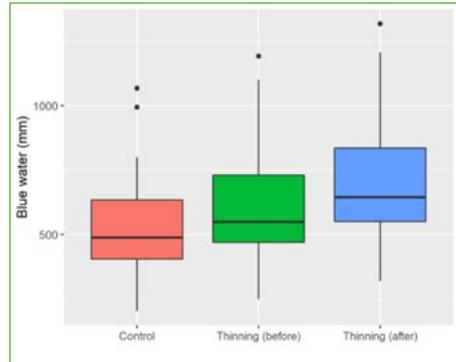
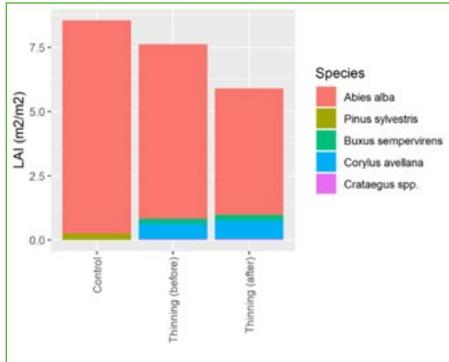


L'intervention a réduit la densité des sapins de 680 tiges/ha à 576 pieds/ha, correspondant à un passage de 51 à 36 m²/ha de surface terrière. Dans le cas du Pin sylvestre on est passé de 104 à 40 tiges/ha, avec une réduction de la surface terrière de 12 à 5.8 m²/ha.

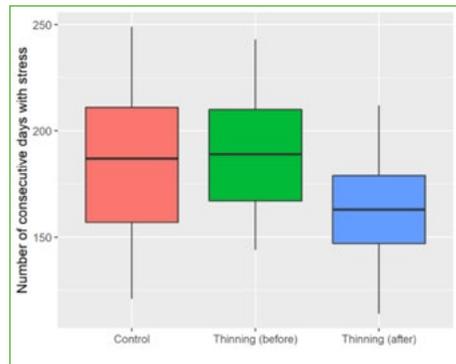
3.10.2.4 Effet de l'intervention sur le bilan hydrique

Ci-après, les résultats de l'étude de simulation du bilan hydrique réalisée selon le modèle *Medfate*.

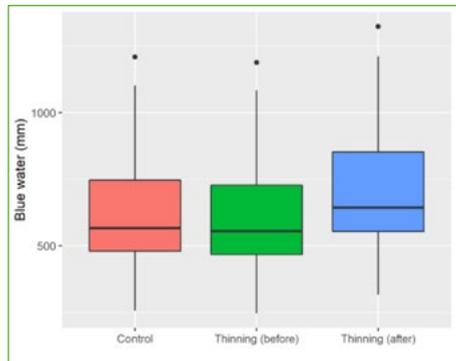
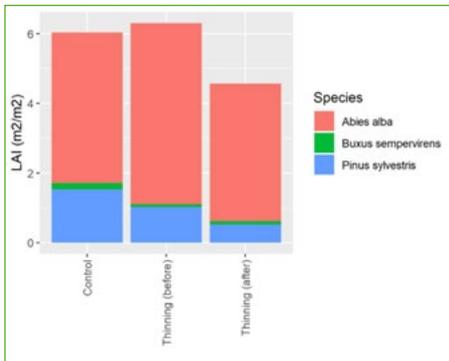
Placette 1

Effets sur le bilan hydrique et le stress dû à la sécheresse pour *Abies alba*

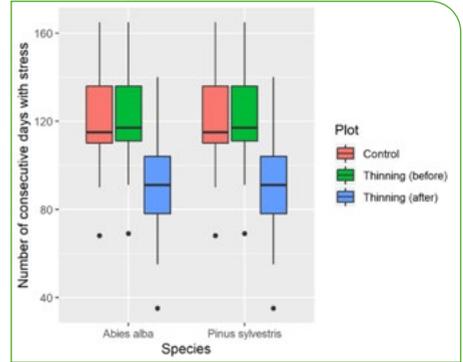
Selon les halométries du modèle de bilan hydrique, l'intervention entraînerait une réduction moyenne de l'indice de la surface foliaire (LAI) de 7.61 à 5.90 m²/m². La conséquence sur le bilan hydrique de la placette, prédit par le modèle, consiste en une augmentation moyenne de l'eau exportée de 613 à 704 mm/an. Par ailleurs, le modèle prédit une réduction de la durée moyenne de la période de stress hydrique dû à la sécheresse de 190 à 187 jours/an, pour *Abies alba*, même si les deux valeurs semblent surestimées.



Placette 2

Effets sur le bilan hydrique et le stress dû à la sécheresse pour *Abies alba* et *Pinus sylvestris*

Selon les halométries du modèle de bilan hydrique, l'intervention entraînerait une réduction moyenne de l'indice de la surface foliaire (LAI) de 6.30 à 4.57 m²/m². La conséquence sur le bilan hydrique de la placette, prédit par le modèle, consiste en une augmentation moyenne de l'eau exportée de 602 à 705 mm/an. Par ailleurs, le modèle prédit une réduction moyenne de la durée de la période de stress dû à la sécheresse de 122 à 92 jours/an, pour *Abies alba* et *Pinus sylvestris*.



3.10.2.5 Bilan de l'intervention sylvicole

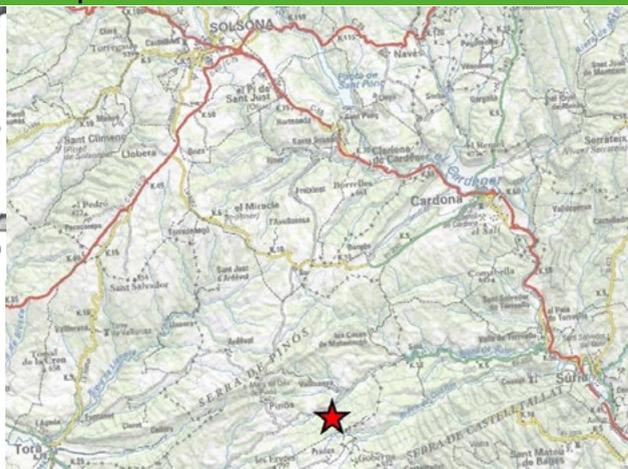
L'intervention réalisée sur la sapinière de Paco de Villanúa est parvenue à réduire la densité d'arbres et à atténuer la concurrence vis à vis des ressources hydriques. La densité de l'essence dominante (Sapin) et de l'essence secondaire (Pin sylvestre) a été réduite, tout en maintenant la densité des essences secondaires.

Par ailleurs, l'installation de panneaux d'information est perçue positivement par les personnes venant visiter la sapinière.

3.11 ENCAMP (ANDORRA)

3.11.1 Fiche descriptive du peuplement

Emplacement de l'essai



Plan de l'essai



Type de peuplement



Partenaire : Centre d'Estudis de la Neu i de la Muntanya d'Andorra - Institut d'Estudis Andorrans

Emplacement de l'action : Principauté d'Andorre, Parroquia de Encamp.

Formation forestière : Forêt de Pin sylvestre et Pin à crochets (sous-bois de Buis et Genévrier) avec rôle de protection contre les avalanches,

Superficie du peuplement sélectionné : 1 ha.

Propriétaire/Gestionnaire : Honorable Comú d'Encamp.

Date du début de l'intervention : 2018.

Objectifs généraux :

1. Diminuer le risque de départ d'incendies de forêt,
2. En cas d'incendies, diminuer leur virulence et leur sévérité.

Objectifs de l'opération :

Diverses coupes ont été faites :

1. Coupe du sous-bois pour obtenir un couvert arbustif inférieur à 30%.
2. Coupe des branches des Pins situées à une hauteur inférieure à deux mètres.
3. Coupe des arbres dominés, malades et/ou morts pour favoriser les plus vigoureux.

État du peuplement avant traitement**État du peuplement après traitement****Résultats attendus de l'intervention**

- Diminuer la vulnérabilité de la forêt face aux incendies de houppiers et entraver la montée d'un éventuel incendie de surface dans les houppiers des Pins.
- Améliorer la vitalité et augmenter la survie des arbres en cas d'incendie de forêt.
- Améliorer les connaissances sur l'évolution après traitement des principales essences arbustives présentes dans la forêt.

Description détaillée du peuplement de l'action

Topographie : La parcelle se trouve sur un versant à forte pente (plus de 50%), orientation sud (S). L'altitude au centre de la placette est de 1900 m.

Climat : La parcelle se trouve dans une zone de climat sous-continentale à tendance méditerranéenne, avec des influences sous-océaniques du nord-ouest (selon l'OPCC). La plupart des précipitations tombe surtout aux mois de mai, juin, novembre et décembre. Les températures oscillent entre -4°C en janvier et 21°C en juillet. Une partie des précipitations (environ 250 mm) tombe sous forme de neige durant l'hiver.

Sol : Peu profond, de 25-30cm, c'est un sol siliceux de type ranker, caractéristique des flancs de montagne tendant à l'érosion.

Végétation : La parcelle se trouve sur la commune d'Encamp, plus précisément dans la zone de forêt du Rep dans la vallée des Cortals de Encamp. La forêt du Rep est une forêt de protection contre les avalanches, comme de nombreuses forêts de la Principauté d'Andorre (75% du total de la superficie de forêts).

En l'an 2000, un incendie de forêt a brûlé 14 ha et ses conséquences sont visibles aujourd'hui encore (photo des limites de la placette). Les forêts de protection contre les avalanches sont très importantes dans un territoire montagneux comme celui de la Principauté d'Andorre, car elles jouent un rôle important pour fixer les manteaux neigeux et réduire les dépôts d'avalanches.

La parcelle est surtout composée de Pins sylvestres (*Pinus sylvestris*) avec quelques Pins à crochets (*Pinus uncinata*) sur la partie basse. Le sous-bois est composé de buissons de montagne caractéristiques des versants Sud comme le Buis (*Buxus sempervirens*), le Genévrier (*Juniperus communis*) ou le Chèvrefeuille noir (*Lonicera nigra*). On trouve, dans la strate herbacée, une abondance de plantes propres aux prés et aux prairies mésophiles sous-alpins (*Pulsatilla alpina*, *Valeriana*, ou *Polygala*...). Le peuplement forestier de la parcelle a une structure irrégulière, formée de bosquets homogènes avec tangence de houppiers et couvert d'environ 60%. L'âge des tiges les plus importantes est d'environ 110-120 ans.

Suite à la caractérisation comme forêt de protection, en 2010, il a été conclu que la forêt du Rep présente une structure ou typologie forestière du type H – Peuplement irrégulier non équilibré tendant à la régularisation, avec une surface terrière où les pieds sont répartis de manière homogène. Cette typologie présente un niveau de fixation du couvert acceptable.

En ce qui concerne la partie de la forêt de protection brûlée en l'an 2000, les bois sont en train de recoloniser l'espace car l'incendie a généré une mortalité élevée de la strate arborée. La parcelle brûlée présente un niveau de protection ou de fixation du manteau neigeux faible. Il a donc été conclu que la structure forestière correspondant à cette zone ou celle que l'on aurait connue s'il n'y avait pas eu d'incendie, serait très similaire ou pratiquement la même à ce jour aux alentours de la zone affectée par l'incendie, comme la placette qui a été définie pour cette intervention.

3.11.2 Description et évaluation quantitative de l'action

3.11.2.1 Description des mesures relevées

Pour cette action, deux placettes ont été définies, qui feront l'objet d'un inventaire de suivi : une placette d'action et une placette de contrôle, conformément à l'homogénéité du peuplement et à sa petite taille (1ha). Les principales variables dendrométriques nécessaires à la caractérisation du peuplement ont donc été établies pour les deux cas de figure, tout comme la gestion à mettre en place. Ont également été fixés, sur la placette à intervenir, les différentes micro-parcelles et 3 transects de 10 mètres de long pour déterminer le couvert et la robustesse du Buis.

3.11.2.2 État initial du peuplement de l'action

La description de l'état initial du peuplement de l'action est fondée sur les données relevées en août 2017 sur les parcelles à traiter. La parcelle est formée d'un peuplement de Pin sylvestre au diamètre moyen quadratique de 32,75 cm (Tableau 1). La structure de la parcelle est irrégulière et distribuée par bosquets homogènes avec tangence de houppiers et un couvert d'environ 60%. La densité moyenne de Pins dans la parcelle est de 512 tiges/ha. On présume que l'âge des tiges les plus âgées (diamètre >50cm) est d'environ 110-120 ans.

Le couvert du Buis donne une valeur moyenne de 25,17% et une hauteur moyenne de 1,09m. Le couvert moyen de la strate herbacée est de 15,58% et celui des mousses de 5,50%.

Tableau 6 Caractéristiques dendrométriques de base du peuplement d'action avant l'intervention

Variable	Pinus sylvestris
Densité adultes (tiges/ha)	512
Surface terrière (m ² /ha)	42,10
Hauteur dominante (m)	15
Hauteur moyenne (m)	10
Diamètre quadratique moyen (cm)	32,75

3.11.2.3 Caractérisation quantitative de l'intervention

A l'échelle globale, sur tout l'ensemble du peuplement de l'intervention (1ha) on a procédé à un débroussaillage généralisé de la strate arbustive et une coupe en hauteur globale de la strate arborée. L'objectif était de diminuer la vulnérabilité à l'incendie des houppiers par rapport à la structure forestière initiale sans altérer sa capacité de fonction protectrice face aux avalanches.

Pour ce faire, un débroussaillage sélectif a permis d'éliminer les buissons d'une hauteur inférieure à 1,3m de hauteur. Quant aux buissons de plus de 1,3m un élagage des branches du tiers inférieur a été réalisé. Les tiges de Pin sylvestre ont été élaguées jusqu'à 2,5m de hauteur et, ponctuellement, les pieds moribonds et/ou extrêmement dominés et sans avenir ont été abattus, moyennant une éclaircie par le bas. Cependant, le couvert a été maintenu au-delà de 60%, la surface terrière n'est pas tombée non plus à moins 30m²/ha. Ces valeurs limites permettront d'assurer la continuité de la fonction de protection contre les avalanches, mais devraient aussi limiter les repousses du buisson héliophile dérivées de l'effet de régulation lumineuse qu'exerce la canopée sur la surface (en particulier la fraction de densité couvert).

Tous les rémanents ont été tronçonnés sur place à des longueurs inférieures à 0.5m et répartis de manière homogène dans le peuplement, en utilisant au mieux les zones d'éclaircies et les ouvertures de la canopée.

Illustrations des situations initiale et finale de la strate arbustive



État initial et final du peuplement objet de l'action. Photo de gauche : structure forestière d'origine et état de la strate arbustive, générant une vulnérabilité modérée au feu d'intensité élevée – structure type B7. Photo de droite : situation après traitement de la strate arbustive (droite) générant une structure de faible vulnérabilité au feu de houppiers – type C10 – après traitements.

3.11.2.4 Bilan de l'intervention sylvicole

La mise en œuvre des traitements de prévention et, notamment, la réduction du combustible superficiel et l'augmentation de la distance entre celui-ci et la base de la canopée, a permis de réduire la vulnérabilité de la structure face aux incendies d'intensité élevée et en particulier face au comportement des feux de houppiers. En l'occurrence, la forêt de Rep présentait une vulnérabilité modérée aux incendies de houppiers, de typologie B7 selon la méthodologie de Piqué *et al.* (2011), tandis que la structure finale parvient à baisser la vulnérabilité à un niveau faible du type C10. La typologie C10 se caractérise par un couvert de combustible de surface inférieur à 30%, et de combustible d'échelle inférieur à 25%, avec un couvert de 50 à 70%, et une distance entre le combustible superficiel et l'aérien inférieure à 4m.

Une simulation du comportement du feu pré et post traitement, à l'aide de l'application Be-havePlus 6.0.0. a donné des résultats conformes à ce qui a été dit plus haut. En ce sens, les résultats de la simulation du scénario initial montrent que, même sans feux de houppiers actifs, la structure et surtout les combustibles d'échelle, sont capables de déclencher l'apparition d'activité de houppiers et de feux de cime. Soit, si on ajoute à cela la hauteur de la flambée, une probabilité de mortalité moyenne de la strate arborée de 74%. Une fois l'action mise en œuvre, nous avons constaté que la situation changeait. On suppose en effet que les rémanents des coupes se sont partiellement minéralisés et on peut prévoir un modèle de combustible superficiel dominé par les aiguilles, les mousses et un peu de graminées superficielles (modèle 8). Dans ces conditions, l'activité des houppiers disparaît et nous avons essentiellement un feu de surface. La hauteur de la flambée diminue drastiquement par rapport

au scénario initial, et passe de 3.3m à 0.1m, la mortalité moyenne estimée se situant alors aux alentours de 55% des tiges.

Ces résultats montrent une diminution importante de la vulnérabilité de la forêt de protection face aux incendies de forêt d'intensité élevée. Il faut être conscients du fait qu'il s'agit de simulations et donc de résultats qui ne sont pas réels. L'on peut toutefois espérer qu'en cas d'incendie la situation serait très proche de celle de la simulation.

3.12 VITORIA (ÁLAVA)

3.12.1 Fiche descriptive du peuplement

Emplacement des peuplements de l'action



Limites du peuplement– Hueto

Partenaire : HAZI

Emplacement de l'action : Vitoria/Gasteiz, Alava (Pays Basque)

Formation forestière : Tallis de Chênes à l'état de bas-perchis, avec présence ponctuelle de Genévrier

Superficie du peuplement sélectionné : 0,1 ha

Propriétaire/Gestionnaire : Concejo de Hueto Abajo

Date du début de l'intervention : 2018

Type de peuplement

Objectifs généraux :

1. Réguler la concurrence entre les rejets de Chênes pour la ressource hydrique et augmenter ainsi la vitalité du peuplement.
2. Provoquer la diversification du peuplement.

Objectifs de l'opération :

Un traitement d'éclaircie sélectif mixte servira à :

1. Réduire la densité des rejets de Chêne
2. Débroussailler le sous-étage
3. Débardage manuel et tronçonnage des rejets de Chênes extraits pour une utilisation comme bois-énergie (bois bûche)

État du peuplement 1 avant traitement



État du peuplement 1 après traitement



Limite du peuplement 2– Gometxa

Partenaire : HAZI

Emplacement de l'action : Vitoria/Gasteiz, Alava (Pays Basque)

Formation forestière : Taillis de Chênes à l'état de bas-perchis, avec présence ponctuelle de genévrier

Superficie du peuplement sélectionné : 0,1 ha

Propriétaire/Gestionnaire : Concejo de Gometxa

Date du début de l'intervention : 2018

Type de peuplement

Objectifs généraux :

1. Réguler la concurrence entre les rejets de Chêne faginé pour les ressources hydriques et augmenter ainsi la vitalité du peuplement.
2. Provoquer la diversification du peuplement.

Objectifs de l'opération :

Un traitement d'éclaircie sélective mixte servira à :

1. Réduire la densité des rejets de Chênes
2. Débroussailler le sous-étage
3. Débardage manuel et tronçonnage des rejets de Chênes extraits pour une utilisation comme bois-énergie (bois bûche)

État du peuplement 2 avant traitement



État du peuplement 2 après traitement



Résultats attendus de l'intervention

- Augmentation de la croissance en diamètre des rejets de Chênes, amélioration de leur alimentation hydrique et de leur vitalité.
- Diversification de la composition de la strate arborée et du sous-bois
- Diminution de l'évapotranspiration du peuplement et amélioration du bilan hydrique grâce à l'augmentation de l'infiltration et de la quantité d'eau bleue.

Description détaillée du peuplement

Topographie : Les deux peuplements se trouvent sur un flanc à pente modérée (10-20%), orienté Nord (N). L'altitude oscille entre 620-690 m.

Climat : Les deux peuplements se trouvent dans une zone au climat humide (indice de Thornthwaite), caractérisé par des précipitations de 700mm/an et une température moyenne de 12°C. Les précipitations se concentrent en général sur les mois d'automne et d'hiver. Durant l'été des orages convectifs fréquents apportent des quantités de précipitations significatives (une moyenne d'environ 100 mm).

Sol : Le sol est formé à partir de roches carbonatées (marnes et calcaires surtout). Sol de faible profondeur à texture argileuse (peuplement 1) et limono-argileuse (peuplement 2).

Végétation : Les deux peuplements se trouvent dans des forêts publiques de montagne, sur des communes situées à l'ouest de la ville de Vitoria (Álava). Ils sont représentatifs des grands peuplements continus de Chêne vert (*Quercus ilex*) de la Sierra de Badaia, et de Chêne faginé (*Quercus faginea*) des montagnes de Vitoria, issus d'anciens peuplements traités en taillis.

Depuis la décennie 1950-60, ces peuplements ne fournissent plus ni bois, ni combustible aux villages propriétaires. Ils sont en phase de capitalisation du volume sur pied et ne fournissent que ponctuellement du bois au voisinage des zones les plus accessibles. Le mauvais état initial de ce peuplement, résultat de siècles de recépage, entraîne une stagnation de sa croissance, une fructification faible ou nulle, et une capacité infime de résilience face aux perturbations (attaques d'agents biotiques, sécheresse, neiges).

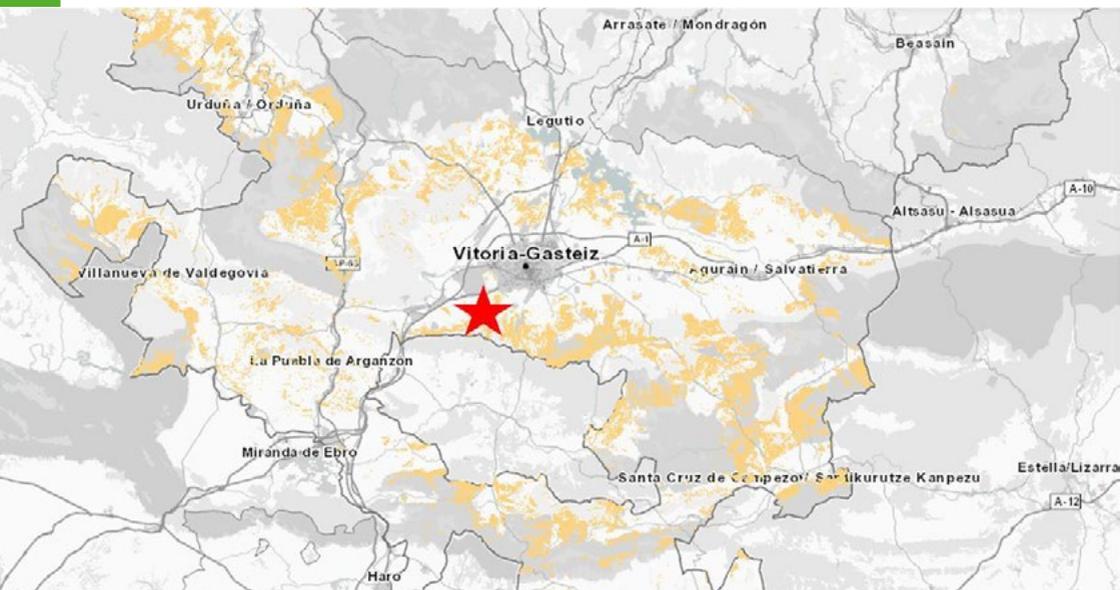
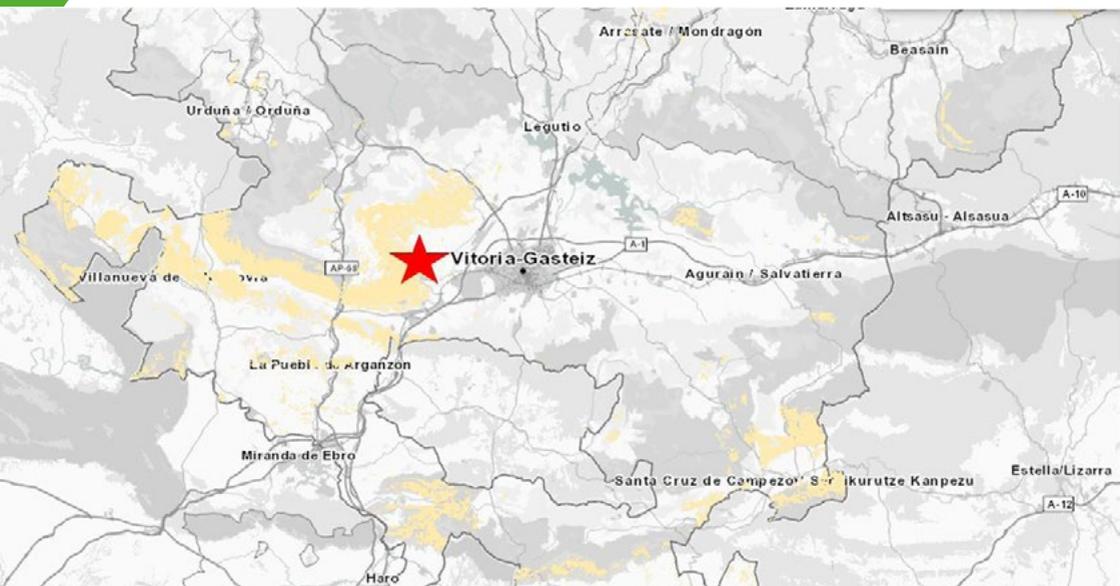
3.12.2 Description et évaluation quantitative de l'action

3.12.2.1 Description des mesures relevées

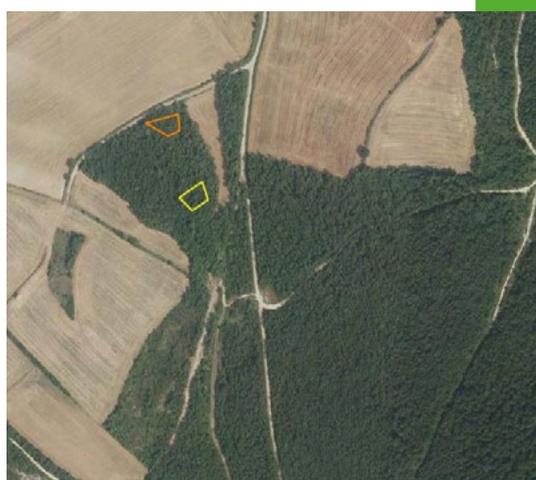
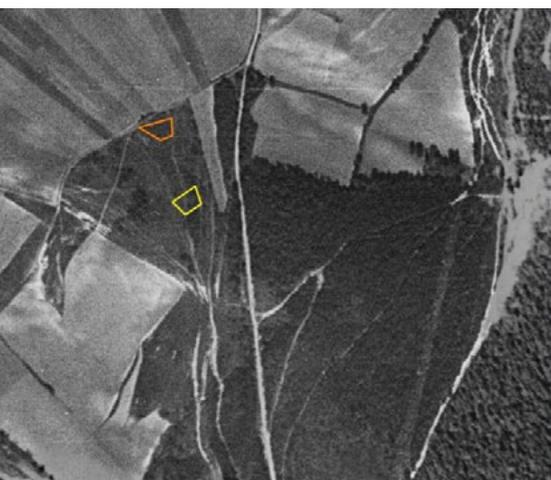
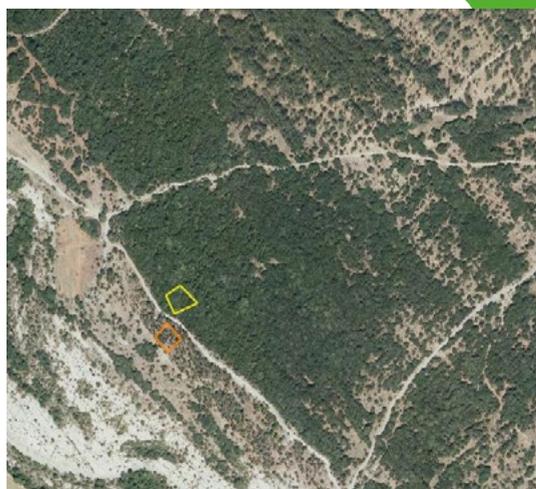
La commune de Vitoria compte de vastes peuplements de Chênes. C'est, de fait, la commune la plus importante du Pays Basque concernant les Chênes à feuilles caduques et la troisième concernant les Chênes verts. D'une manière générale, les deux types de peuplements présentent de faibles croissances moyennes annuelles en volume (1-1,5 m³/ha-an) et en hauteur dominante (10-15 cm/an).

Espèce dominante	Superficie (ha)	Volume moyen (m ³ /ha)	Surf.terrière moyenne (m ² /ha)	Densité moyenne (tiges/ha)
Chênaies vertes	2.454	41	21	941
Chênaies caducifoliées	3.425	54	18	637

Partant de ces chiffres, deux parcelles de Chêne vert et de Chêne faginé ont été identifiées, qui allaient être soumises à un traitement de coupes d'éclaircies pour le bois de chauffage communal pendant les premiers mois de 2018. Ces parcelles - Hueto Abajo et Gometxa - sont choisies en veillant à délimiter, à proximité dans les deux cas, des placettes-témoin ayant une même surface et comparables du point de vue sylvicole, afin d'évaluer les futurs changements.



Carte des chênaies vertes (en haut) et de chênaies caducifoliées (en bas) d'Alava, indiquant la localisation des peuplements respectifs



Evolutions constatées sur ces placettes, selon l'orthophotographie noir et blanc de 1957 et celle plus récente de 2018. Dans les deux cas, Hueto (en haut) et Gometxa (en bas), on constate l'évolution d'une surface sans arbre et pâturée, vers une forêt dense.

Pour l'évaluation quantitative du traitement, l'inventaire réalisé a permis de comparer les états avant et après intervention, tant sur le peuplement que sur le sous-étage, aussi bien en zone d'intervention qu'en zone témoin. Une placette d'environ 15 x 15m a été délimitée pour chacun d'entre eux, sur lesquelles on a mesuré - avant et après l'intervention - la surface terrière, l'essence, le diamètre de tous les arbres ayant un *diamètre* > 5 cm, le couvert (%), la hauteur moyenne de chaque essence arbustive et le couvert (%) par groupes biologiques d'essences herbacées (graminées et non-graminées). Les pieds ont également été comptabilisés pour les *diamètres* < 5 cm de chaque essence, en différenciant les hauteurs > 130 cm et < 130 cm.

Changements constatés sur la placette de Hueto, d'après l'orthophoto de 2017 (avant intervention) et l'orthophoto récente de 2018 (après intervention).



3.12.2.2 État initial du peuplement

L'état initial du peuplement est décrit à partir des données relevées avant intervention sur les placettes de contrôle et d'action. Il s'agit dans les deux cas de taillis clairement dominé par des arbres du genre *Quercus* à l'état de bas-perchis, avec un diamètre moyen quadratique < 12 cm et une densité moyenne élevée (Tableau 1). La présence d'autres espèces dans la strate dominante est faible.

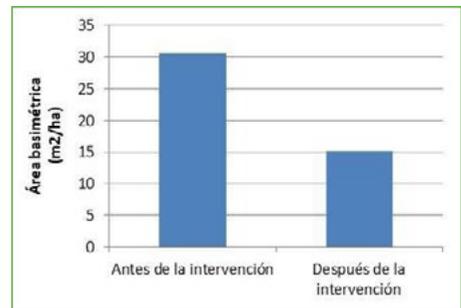
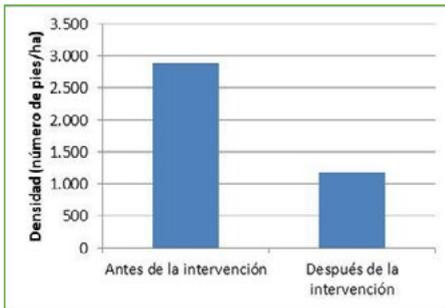
Tableau 7 Caractéristiques dendrométriques de base des peuplements avant intervention

Variable	Q. ilex	Q. faginea
Densité adultes ⁹ (pieds/ha)	2.894	3.278
Surface terrière (m ² /ha)	30,6	36,45
Diamètre quadratique moyen (cm)	11,60	11,90
Densité juvéniles ² d<5 cm (tiges/ha)	239	382

3.12.2.3 Caractérisation quantitative de l'intervention

L'effet de l'intervention est décrit à partir des données relevées avant et après celle-ci sur la placette d'action.

Effets sur la strate arborée (diamètre > 5 cm). *Quercus ilex* (peuplement 1).

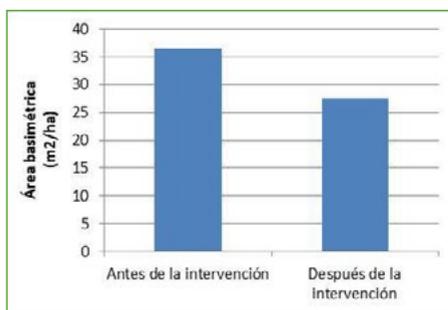
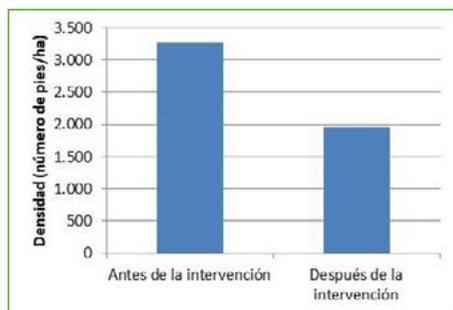


L'intervention a eu un effet important sur la strate arborée, composée exclusivement de *Quercus ilex* sur la placette. La densité de l'essence est passée de 2.894 à 1.180 tiges/ha, diminuant de 59,2%. L'effet sur la surface terrière est également important, passant de 30,6 à 15,14 m²/ha, soit 50,5% de moins. Le diamètre quadratique est passé de 11,6 à 12,5 cm du fait de l'intervention.



9 Individus adultes : diamètre > 5 cm

Effets sur la strate arborée (diamètre > 5 cm). *Quercus faginea* (peuplement 2).



L'intervention a eu un effet important sur la strate arborée, composée exclusivement de *Quercus ilex* sur la placette. La densité de l'essence est passée de 3.278 à 1.962 tiges/ha, soit une diminution de 40,15%. L'effet sur la surface terrière est également important, passant de 36,45 à 27,58 m²/ha, soit 24,33% de moins. Le diamètre quadratique est passé de 11,9 à 13,4 cm du fait de l'intervention.

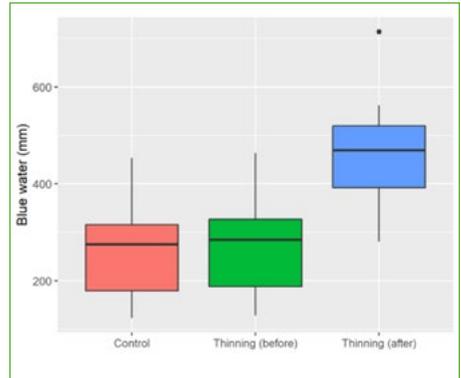
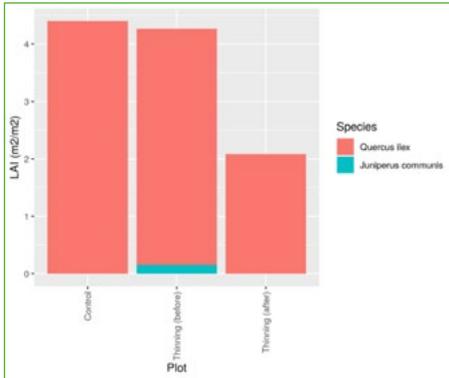


3.12.2.4 Effet de l'intervention sur le bilan hydrique

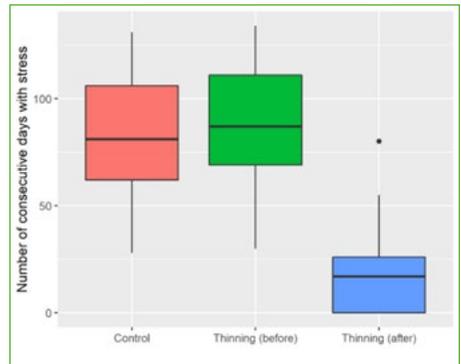
Ci-après, les résultats de la simulation du bilan hydrique réalisée selon le modèle *Medfate*.

Peuplement 1 (chênaie)

Effets sur le bilan hydrique et le stress dû à la sécheresse pour *Quercus ilex*

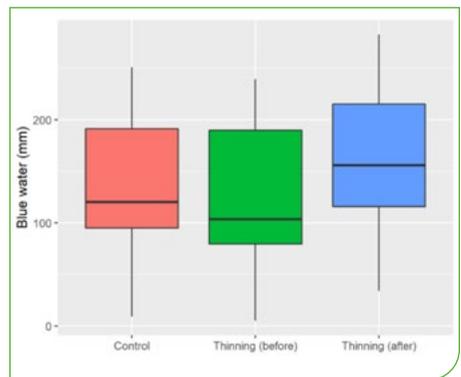
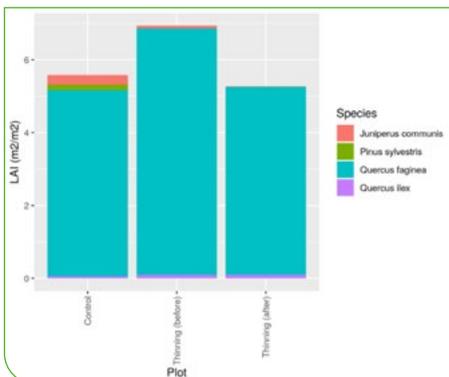


Selon les halométries du modèle de bilan hydrique, l'intervention entraînerait une réduction moyenne de l'indice de la surface foliaire (LAI) de 4.21 à 2.07 m²/m². La conséquence sur le bilan hydrique de la placette, prédit par le modèle, consiste en une augmentation moyenne de l'eau exportée de 265 à 459 mm/an. Par ailleurs, le modèle prédit une réduction moyenne de la durée de la période de stress par sécheresse de 88 à 20 jours/an, pour *Quercus ilex*, même si cette estimation ne tient pas compte de la croissance après-intervention.

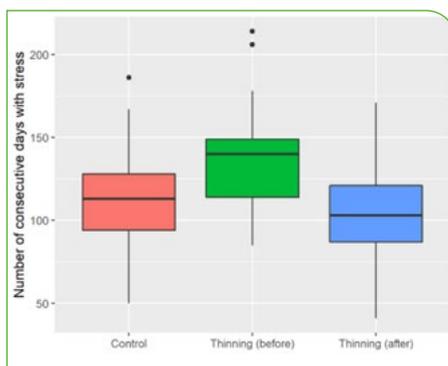


Peuplement 2 (Chêne faginé)

Effets sur le bilan hydrique et le stress dû à la sécheresse pour *Quercus faginea*



Selon les halométries du modèle de bilan hydrique, l'intervention entraînerait une réduction moyenne de l'indice de la surface foliaire (LAI) de 6.85 à 5.11 m²/m², soit une valeur finale encore très élevée. La conséquence sur le bilan hydrique de la placette, prédit par le modèle, consiste en une augmentation moyenne de l'eau exportée de 124 à 166 mm/an. Par ailleurs le modèle prédit une réduction moyenne de la durée de la période de stress dû à la sécheresse de 137 à 103 jours/an, pour *Quercus faginea*.



3.12.2.5 Bilan de l'intervention sylvicole

L'intervention réalisée sur le peuplement ciblait essentiellement : (i) la régulation de la concurrence entre les repousses de chêne pour la ressource hydrique et donc l'augmentation de la vitalité du peuplement et (ii) la stimulation de la diversification du peuplement.

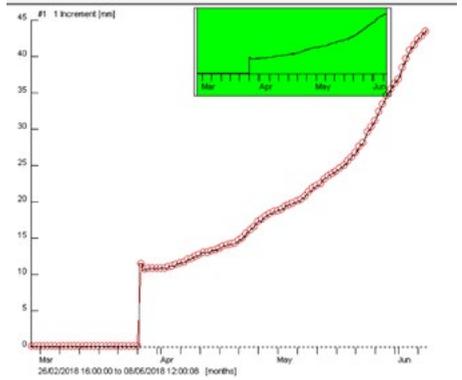
La mise en œuvre du traitement d'éclaircie sélective mixte a permis, d'une part, de réduire sensiblement la densité et par conséquent la compétition sur la strate dominante et, d'autre part, une réduction plus importante de la densité des pousses de Chêne vert et Chênes dominés de sous-étage (recensés comme juvéniles), obtenant ainsi une amélioration générale de la robustesse du peuplement.

La diversification du peuplement s'est trouvée stimulée par l'intervention. Les individus ayant un meilleur aspect et une réelle vitalité ont été favorisés et les conditions de leur développement améliorées grâce à l'élimination de la concurrence autour de chacun d'entre eux, débroussailllements de la strate arbustive inclus.

À l'avenir, le suivi de ces parcelles se fera, en principe, sur la base de trois méthodes :

a. Mesures de la couverture arborée relevées directement.

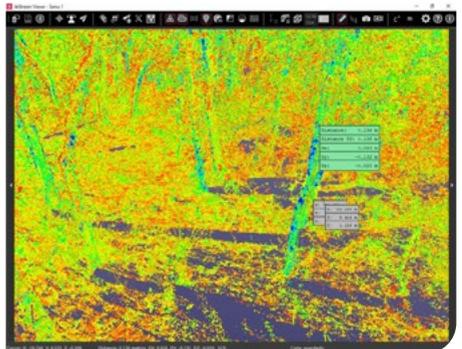
Installation d'une série de capteurs de croissance ou dendromètres à hauteur de poitrine (1,3m) sur des arbres représentatifs de chaque placette éclaircie et sur les placettes témoins. Le but est de pouvoir évaluer à tout moment la croissance du diamètre de ces arbres. Celui-ci peut varier en fonction de la concurrence des individus voisins mais aussi de la climatologie ou des éventuelles perturbations. Les relevés de mesures ponctuelles de ces dendromètres peuvent être associés à celles d'autres capteurs automatiques, plus exactes, et collectées tout au long de l'année, installés sur un Chêne vert et sur un séquoia situés à Arkaute, à quelques kilomètres de ces placettes.



b. Scannage 3D de l'espace arboré.

Les lasers scanners permettent de collecter des données sur toutes les zones d'un espace arboré et, en comparant deux numérisations multi-temporelles, de mesurer les différentes parties de l'arbre, sa croissance ou la perte de branches ou de cimes.

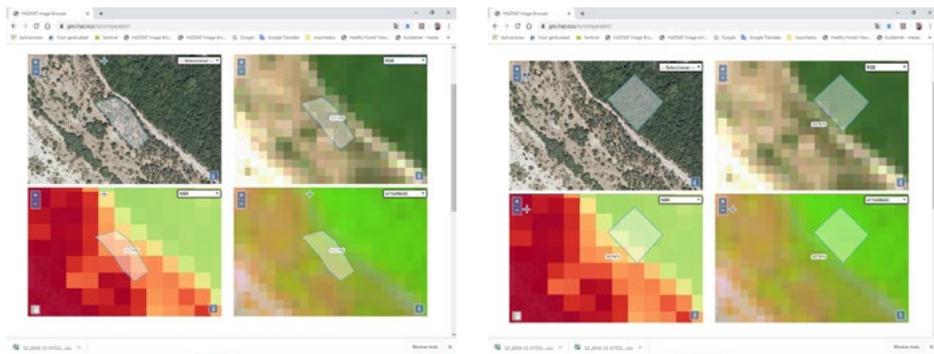
Un scannage réalisé début 2019 sur la placette éclaircie de la chênaie de Gometxa (peuplement 2) permettra d'apprécier les changements de physionomie de chacun de ces chênes.

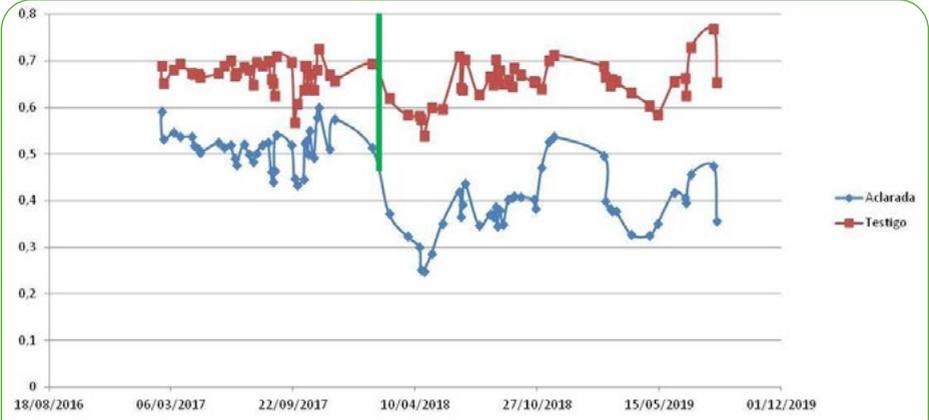


c. Télédétection.

Enfin, HAZI propose une série d'outils ou de visualisateurs *web* créés à partir d'images gratuites provenant des satellites Sentinel 2 et Landsat. Ces outils permettent, de manière numérisée ou visuelle, de faire un suivi continu de l'état phytosanitaire, de la phénologie et de la vigueur de n'importe quelle parcelle ou surface arborée.

- <https://geo.hazi.eus/rs/comparador/> (comparateur de données et d'images)
- <https://geo.hazi.eus/rs/animations/> (générateur d'animations à partir d'images multitemporelles)





Variation des indices NDVI (en haut) et NBR (en bas) du peuplement 1 d'après les relevés de Sentinel 2. En vert, période de la coupe d'éclaircie (février 2018)



4 CONCLUSIONS

Les forestiers sont confrontés à un défi majeur, comparable à un redoutable effet de ciseaux : d'un côté le savoir-faire forestier s'acquiert généralement dans un pas de temps représentant plusieurs décennies, le cycle de vie des arbres étant souvent proche du siècle. D'autre part, le changement climatique peut avoir pour conséquence un changement brutal d'environnement, requérant une réaction aussi rapide qu'efficace.

Heureusement, face à ce défi, une réelle dynamique est à l'œuvre. Les forestiers pyrénéens s'organisent, mènent des recherches en commun, partagent leurs connaissances, résultats.

L'objectif poursuivi est de commencer à constituer, dès aujourd'hui, une « boîte à outils », aussi opérationnelle que possible.

Pour ce faire, un niveau de connaissances élevé est nécessaire, en particulier en ce qui concerne :

- le phénomène du changement climatique en lui-même,
- ses impacts, variables selon les essences et régions, et à fort niveau d'incertitude (d'après CLIMPY, l'augmentation des températures maximales serait entre 1.9 et 7.1 °C d'ici 2100),
- les capacités adaptatives des peuplements, les méthodes d'adaptation et leur efficacité.

Le projet CANOPEE s'est attaché à apporter des premiers éléments de réponse sur les deux derniers axes. Le présent guide a vocation à partager les connaissances acquises particulièrement sur le dernier.

En effet, beaucoup de sylvicultures aujourd'hui à l'œuvre demanderont à être modifiées pour s'adapter aux contraintes nouvelles.

Cette adaptation, en fonction des contextes locaux, pourra être faite selon différents gradients, depuis la mise en place d'ajustements techniques (*i.e* intensité des éclaircies, modification de

l'âge d'exploitabilité), jusqu'à des changements plus radicaux d'objectifs sylvicoles (*i.e* changement et/ou diversification des essences-cibles, introduction de nouvelles provenances).

Le présent guide visait à partager des bases techniques et scientifiques, aussi robustes que possible, à la communauté forestière pour construire une stratégie d'adaptation efficace, au travers de test locaux qui permettent de moduler des recommandations générales.

Ces réponses se basent sur :

- l'établissement du réseau de sites démonstratifs, qui a fait l'objet des fiches-exemple dans lequel diverses actions d'adaptation ont été appliquées,
- l'analyse des impacts de ces actions sur la ressource hydrique *in situ*.

Ces productions constituent une base solide qu'il conviendra de continuer à édifier pour permettre l'adaptation des forêts pyrénéennes au changement climatique. En effet, le défi auquel elles doivent faire face est considérable, tant il représente de possibilités et de situations particulières. La communauté forestière pyrénéenne est à pied d'œuvre pour y répondre.

5 BIBLIOGRAPHIE

AGEE, J.K. ; SKINNER, C.N. : "Basic principles of forest fuel reduction treatments", [en línea] Forest Ecology and Management, ISSN-03781127, DOI-10.1016/j.foreco.2005.01.034, 211(1-2) : 83-96, 2005.

ALBERTO, F.J., AITKEN, S.N., ALIA, R. GONZALEZ-MARTINEZ, S., HÄNNINEN, H., KREMER, A., LEFÈVRE, F., LENORMAND, T., YEAMAN, S., WHETTEN, R., SAVOLAINEN, O., 2013. Potential for Evolutionary Responses to Climate Change-Evidence From Tree Populations. Global Change Biology 19, 1645–1661. doi :10.1111/gcb.12181.

ALDEA, J. ; BRAVO, F. ; BRAVO-OVIEDO, A. ; RUIZ-PEINADO, R. ; RODRÍGUEZ, F. ; DEL RÍO, M. : "Thinning enhances the species-specific radial increment response to drought in Mediterranean pine-oak stands", [en línea] Agricultural and Forest Meteorology, ISSN-01681923, DOI-10.1016/j.agrformet.2017.02.009, , 2017.

ÁLVAREZ, P. ; BARRIO, M. ; CASTEDO, F. ; DÍAZ, R. ; FERNÁNDEZ, J.L. ; MANSILLA, P. ; PÉREZ, R. ; PINTOS, C. ; RIESGO, G. ; RODRÍGUEZ, R. : Manual de selvicultura del castaño en Galicia, 2000,

AMEZTEGUI, A. ; CABON, A. ; DE CÁCERES, M. ; COLL, L. : "Managing stand density to enhance the adaptability of Scots pine stands to climate change : A modelling approach", [en línea] Ecological Modelling, ISSN-03043800, DOI-10.1016/j.ecolmodel.2017.04.006, 356 : 141-150, julio de 2017. Disponible en : <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0304380016307931> [Consulta : 29 de agosto de 2017].

AMÉZTEGUI, A.; BROTONS, L.; COLL, L. Land-use changes as major drivers of mountain pine (*Pinus uncinata* Ram.) expansion in the Pyrenees. *Global Ecology and biogeography*, 19, pp. 632-641, 2010.

ANDIVIA MUÑOZ, E., NATALINI, F., ALEJANO MONGE, R., FERNÁNDEZ MARTÍNEZ, M., VÁZQUEZ PIQUÉ, J. (2017). Respuesta de dos procedencias de encina a eventos de sequía : una aproxima-

- mación dendroecológica. En : Actas del 7º Congreso Forestal Español. 26-30 junio, Plasencia, Cáceres.
- BADEAU, V. DUPOUEY, JL., CLUZEAU, C., DRAPIER, J., LE BAS, C., 2010. Climate Change and the Biogeography of French Tree Species : First Results and Perspectives ? in Loustau D. (éd.) Forest, Carbon Cycle and Climate Change, Editions Quae, Versailles, 231–252.
- BAIGEST.; COLL L.; CASALS P. (2019) Tractaments de regeneració en boscos de pi roig en un context de canvi climàtic. En : Tusell, J. M.; Beltrán, M. (Coords.). 2019. XXXVI Jornades Tècniques Silvícoles Emili Garolera. CFC. 86 p.
- BARBEITO, I. ; PARDOS, M. ; CALAMA, R. ; CAÑELLAS, I. : "Effect of stand structure on Stone pine (*Pinus pinea* L.) regeneration dynamics", [en línea] Forestry, DOI-10.1093/forestry/cpn037, 81(5) : 617-629, 2008.
- BELLAMY CH.; BARSOUM N.; COTTRELL J.; WATTS K. (2018) Encouraging biodiversity at múltiple scales in suport of resilient woodlands. Reserch note. Forestry comission. UK.
- BENITO, M.; ALÍA, R.; ROBSON, T. M.; ZABALA, M. A. (2011). Intraspecific variability and plasticity influence potential tree species distributions under climate change. *Global Ecology and Biogeography*, 20 (5), p.766-778.
- BERTRAND, R. LENOIR, J., PIEDALLU, C., RIOFRÍO-DILLON, G., DE RUFFRAY, P., VIDAL, C., PIERRAT, JC., GÉGOUT, JC., 2011. Changes in Plant Community Composition Lag Behind Climate Warming in Lowland Forests. *Nature* 479, 517–520. doi :10.1038/nature10548.
- BRÄUTIGAM, K., VINING, KJ., LAFON-PLACETTE, C. FOSDAL, CG., MIROUZE, M., MARCOS, JG., FLUSCH, S., FRAGA, MF, GUEVARA, MA., ABARCA, D., JOHNSEN, O., MAURY, S., STRAUSS, SH., CAMPBELL, MM., ROHDE, A., DÍAZ-SALA, C., CERVERA, M., 2013. Epigenetic Regulation of Adaptative Respsnes of Forest Tree Species to the Environnement. *Ecology and Evolution* 3(2), 399–415. doi :10.1002/ece3.461.
- BRÉDA, N., BRUNETTE M., 2014. Réduire l'âge d'exploitabilité : une stratégie d'adaptation économiquement acceptable face aux risques induits par la sécheresse ?. *Forêt entreprise* 217.
- BRONCANO, M. ; RIBA, M. ; RETANA, J. : "Seed germination and seedling performance of two Mediterranean tree species, holm oak (shape *Quercus ilex* L.) and Aleppo pine (shape *Pinus halepensis* Mill.) : a multifactor experimental approach", [en línea] *Plant Ecology*, DOI-10.1023/A :1009784215900, 138(1) : 17-26, 1998. Disponible en : <http://dx.doi.org/10.1023/A%3A1009784215900>
- BROTONS, LL. (2007) Biodiversidad en mosaicos forestales mediterráneos : el papel de la heterogeniedad y del contexto paisajístico. En : Camprodon J. y Plana E. (eds.). *Conservación de la biodiversidad, fauna vertebrada y gestión forestal*. Universitat de Barcelona, p.137-157.

- CAMARERO, J.J.; GUTIÉRREZ, E. Response of *Pinus uncinata* recruitment to climate warming and changes in grazing pressure in an isolated population of the Iberian system (NE Spain). *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*, 39, pp. 210-217, 2007.
- CAMERON, A.D. : "Importance of early selective thinning in the development of long-term stand stability and improved log quality : A review", [en línea] *Forestry*, ISSN-0015752X, DOI-10.1093/forestry/75.1.25, , 2002.
- CANELLAS, I. :; DEL RIO, M. :; ROIG, S. :; MONTERO, G. : "Growth response to thinning in *Quercus pyrenaica* Willd. coppice stands in Spanish central mountain", *Annals of Forest Science*, 61(3) : 243-250, 2004.
- Carraro, G., Klötzli, F., Walther, GR., Gianoni, P., Mossi, R., 1999. Observed changes in vegetation in relation to climate warming. vdf, Hochschulverlag AG an der ETH Zürich, Zürich.
- CARRIÓN, J.S. :; MUNUERA, M. :; NAVARRO, C. :; SÁEZ, F. : "Paleoclimas e historia de la vegetación cuaternaria en España a través del análisis polínico. Viejas falacias y nuevos paradigmas.", *Complutum*, 11 : 115-142, 2000.
- COELLO, J.; BELTRÁN, M.; PIQUÉ, M.; CERVERA, T.; BAIGES, T. (2017). Plantacions (forestals i agroforestals) de noguera, cirerer i freixe. Requeriments i models de gestió. Sèrie : Fitxes tècniques ORGEST. CPF. DARP.
- COELLO, J.; SERRA, S.; NAVARRO, SONIA. (2019) Plantacions d'enriquiment de boscos. En : Tusell, J. M.; Beltrán, M. (Coords.). 2019. XXXVI Jornades Tècniques Silvícoles Emili Garolera. CFC. 86 p.
- CORTIJO, S., WARDENAAR, R., COLOMÉ-TATCHÉ, M. GILLY, A., ETCHEVERRY, M., LABADIE, K., CAILLIEUX, E., HOSPITAL, F., AURY, JM., WINCKER, P., ROUDIER, F., JANSEN, RC., COLOT, V., JOHANNES, F., 2014. Mapping the epigenetic Basis of Complex Traits. *Science* 343, 1145–1148. doi:10.1126/science.1248127.
- CRECENTE-CAMPO, F. :; POMMERENING, A. :; RODRÍGUEZ-SOALLEIRO, R. : "Impacts of thinning on structure, growth and risk of crown fire in a *Pinus sylvestris* L. plantation in northern Spain", [en línea] *Forest Ecology and Management*, ISSN-03781127, DOI-10.1016/j.foreco.2009.02.009, , 2009.
- DE CÁCERES, M. :; MARTÍNEZ-VILALTA, J. :; COLL, L. :; LLORENS, P. :; CASALS, P. :; POYATOS, R. :; PAUSAS, J.G. :; BROTONS, L. : "Coupling a water balance model with forest inventory data to predict drought stress : the role of forest structural changes vs. climate changes", [en línea] *Agricultural and Forest Meteorology*, DOI-10.1016/j.agrformet.2015.06.012, 213 : 77-90, 2015. Disponible en : <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0168192315001914>
- DE-DIOS-GARCÍA, J. :; PARDOS, M. :; CALAMA, R. : "Interannual variability in competitive effects in mixed and monospecific forests of Mediterranean stone pine", [en línea] *Forest Ecology and*

Management, ISSN-03781127, DOI-10.1016/j.foreco.2015.09.014, 358 : 230-239, diciembre de 2015.

DEL CAMPO, A.D. : ; GONZÁLEZ-SANCHIS, M. : ; GARCÍA-PRATS, A. : ; CEACERO, C.J. : ; LULL, C. : "The impact of adaptive forest management on water fluxes and growth dynamics in a water-limited low-biomass oak coppice", [en línea] *Agricultural and Forest Meteorology*, ISSN-01681923, DOI-10.1016/j.agrformet.2018.10.016, 264(Febuary 2018) : 266-282, 2019a. Disponible en : <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2018.10.016>

DEL CAMPO, A.D. : ; GONZÁLEZ-SANCHIS, M. : ; MOLINA, A.J. : ; GARCÍA-PRATS, A. : ; CEACERO, C.J. : ; BAUTISTA, I. : "Effectiveness of water-oriented thinning in two semiarid forests : The redistribution of increased net rainfall into soil water, drainage and runoff", [en línea] *Forest Ecology and Management*, ISSN-0378-1127, DOI-10.1016/J.FORECO.2019.02.020, 438 : 163-175, 15 de abril de 2019b. Disponible en : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378112718323533> [Consulta : 6 de marzo de 2019].

DÍAZ-DELGADO, R.; LLORET, F.; PONS, X.; TERRADAS, J. Satellite evidence of decreasing resilience in Mediterranean plant communities after recurrent wildfires. *Ecology*, 83, pp. 2293- 2303, 2002.

FAUSTMANN, M., 1849. Calculation of the value which forest land and immature stands possess for forestry (Traduit par Linnard, 1968). Dans : Martin Faustmann and the evolution of discounted cash flow. Commonwealth Forestry Institute, University of Oxford, Oxford. pp. 27-55.

GAMFELDT L. ; SNÄLL T. ; BAGCHI R. ; JONSSON M. ; GUSTAFSSON L. ; KJELLANDER P. ; RUIZ-JAEN M. ; FRÖBERG M. ; STENDAHL J. ; PHILIPSON CH. ; MIKUSIŃSKI G. ; ANDERSSON E. ; WESTERLUND B. ; ANDRÉN H. ; MOBERG F. ; MOEN J. ; BENGTTSSON J. (2013) Higher levels of multiple ecosystem services are found in forests with more tree species. *Nature Communications* 4 :1340.

GARBER, S. : ; MAGUIRE, D. : "Stand productivity and development in two mixed-species spacing trials in the central Oregon Cascades", *Forest Science*, 50(1) : 92-105, 2004.

GARCÍA-GÜEMES, C. : ; CALAMA, R. : "La práctica de la selvicultura para la adaptación al cambio climático", edit. M.A. Zavala, Los bosques y la biodiversidad frente al cambio climático : Impactos, Vulnerabilidad y Adaptación en España, ISBN-978-84-491-0038-3, pp. 12, Ed. Ministerio para la Transición Ecológica, Madrid, Spain, 2015.

GARCIA-RUIZ, J.M. : ; LASANTA, T. : ; RUIZ-FLAÑO, P. : ; ORTIGOSA, L. : ; WHITE, S. : ; GONZALEZ, C. : ; MARTI, C. : ; RUIZFLANO, P. : ; ORTIGOSA, L. : ; WHITE, S. : ; GONZALEZ, C. : ; MARTI, C. : "Land-use changes and sustainable development in mountain areas : A case study in the Spanish Pyrenees", [en línea] *Landscape Ecology*, ISSN-0921-2973, DOI-10.1007/BF02059854, 11(5) : 267-277, 1996.

GRACIA, M. : ; RETANA, J. : ; ROIG, P. : "Mid-term successional patterns after fire of mixed pine-oak forests in NE Spain", [en línea] *Acta Oecologica*, DOI-[http://dx.doi.org/10.1016/S1146-609X\(02\)01169-4](http://dx.doi.org/10.1016/S1146-609X(02)01169-4), 23(6) : 405-411, 2002.

- GUSTAFSSON L., BAKER S.; BAUHHUS J.; BEESE W.; BRODIE A.; KOUKI J.; LINDENMAYER D.; LÖHMUS A.; MARTÍNEZ PASTUR G.; MESSIER C.; NEYLAND M.; PALIK B.; SVERDRUP-THYGESON A.; VOLNEY W.; WAYNE A.; FRANKLIN J. (2012). Retention Forestry to Maintain Multifunctional Forests : A World Perspective. *BioScience*, Volume 62 (7). 633–645.
- JACTEL, H. ; BRANCO, M. ; GONZALEZ-OLABARRIA, J. ; GRODZKI, W. ; LÅNGSTRÖM, B. ; MOREIRA, F. ; NETHERER, S. ; NICOLL, B. ; ORAZIO, C. ; PIOUS, D. ; SANTOS, H. ; SCHELHAAS, M.J. ; TOJIC, K. ; VODDE, F. : Forest stands management and vulnerability to biotic and abiotic hazards, 2011.
- JACTEL, H. ; NICOLL, B.C. ; BRANCO, M. ; GONZALEZ-OLABARRIA, J.R. ; GRODZKI, W. ; LÅNGSTRÖM, B. ; MOREIRA, F. ; NETHERER, S. ; ORAZIO, C. ; PIOUS, D. ; SANTOS, H. ; SCHELHAAS, M.J. ; TOJIC, K. ; VODDE, F. : "The influences of forest stand management on biotic and abiotic risks of damage", [en línea] *Annals of Forest Science*, ISSN-1286-4560, DOI-10.1051/forest/2009054, 66(7) : 701-701, enero de 2009.
- KOLLERT W. (2014) EuroCoppice Conference : Innovative management and multifunctional utilization of traditional coppice forests. COST Action FP1301. Florence. 26 feb.
- KREMER, A., RONCE, O., ROBLEDÓ-ARNUNCIÓ, J.J., GUILLAUME, F., BOHRER, G., NATHAN, R., BRIDLE, JR., GOMULKIEWICZ, R., KLEIN, EK., RITLAND, K., KUPARINEN, A., GERGER, S., SCHUELER, S., 2012. Long-Distance Gene Flow and Adaptation of Forest Trees to Rapid Climate Change. *Ecology Letters* 15, 378–392. doi :10.1111/j.1461-0248.2012.01746.x.
- LADIER, J., 2016. Forêts méditerranéennes face au changement climatique : Les actions engagées en forêt publique. *Forêt méditerranéenne*, t. XXXVII, n° 4.
- LARRIEU L. Y GONIN P. (2012) L'Indice de biodiversité potentielle (IBP) : un indicateur composite pour intégrer la diversité taxonomique ordinaire dans la gestion forestière. In : Nivet C., Bonhême I., Peyron JL (Coord.). *Les indicateurs de biodiversité forestière. Synthèse des réflexions issues du programme de recherche «Biodiversité, gestion forestière et politiques publiques»*. Paris, GIP Ecofor-MEDDE, 2012, p. 73-78.
- LASANTA-MARTINEZ, T. ; VICENTE-SERRANO, S.M. ; CUADRAT-PRATS, J.M. : "Mountain Mediterranean landscape evolution caused by the abandonment of traditional primary activities : a study of the Spanish Central Pyrenees", [en línea] *Applied Geography*, DOI-DOI 10.1016/j.apgeog.2004.11.001, 25(1) : 47-65, 2005.
- LEDO, A. ; CAÑELLAS, I. ; BARBEITO, I. ; GORDO, F.J. ; CALAMA, R. ; GEA-IZQUIERDO, G. : "Species coexistence in a mixed Mediterranean pine forest : Spatio-temporal variability in trade-offs between facilitation and competition", [en línea] *Forest Ecology and Management*, ISSN-03781127, DOI-10.1016/j.foreco.2014.02.038, 322 : 89-97, marzo de 2014.

- LEGAY, M., 2011. Les grandes orientations d'adaptation au changement climatique : point d'étape. forêt méditerranéenne t. XXXII, n° 2.
- LEGAY, M., 2014. Adaptation au changement climatique et gestion forestière. Rapport ONERC au Premier ministre et au Parlement : L'arbre et la forêt à l'épreuve d'un climat qui change, 33–64.
- LEGAY, M., MORTIER, F., Office National des Forêts, 2006. La forêt face au changement climatique : adapter la gestion forestière. Collection dossiers forestiers, n°16.
- LENOIR, J., GÉGOUT, JC., MARQUET, PA. DE RUFFRAY, P., BRISSE, H., 2008. A significant Upward Shift in Plant Species Optimum Elevation During the 20th Century. *Science* 320, 1768–1771. doi:10.1126/science.1157704.
- LINDNER, M. ; MAROSCHEK, M. ; NETHERER, S. ; KREMER, A. ; BARBATI, A. ; GARCIA-GONZALO, J. ; SEIDL, R. ; DELZON, S. ; CORONA, P. ; KOLSTRÖM, M. ; LEXER, M.J. ; MARCHETTI, M. : "Climate change impacts, adaptive capacity, and vulnerability of European forest ecosystems", [en línea] *Forest Ecology and Management*, ISSN-03781127, DOI-10.1016/j.foreco.2009.09.023, , 2010.
- LOOKINGBILL, T.R. ; ZAVALA, M.A. : "Spatial pattern of *Quercus ilex* and *Quercus pubescens* recruitment in *Pinus halepensis* dominated woodlands", [en línea] *Journal of Vegetation Science*, DOI-10.2307/3246590, 11(4) : 607-612, 2000. Disponible en : <http://dx.doi.org/10.2307/3246590>
- MAIORANO, L., CHEDDADI, R., ZIMMERMANN, NE., PELLISSIER, L., PETITPIERRE, B., POTTIER, J., LABORDE, H., HURDU, BI., PEARMAN, PB., PSOMAS, A., SINGARAYER, JS., BROENNIMANN, P., VITTOZ, P., DUBUIS, A., EDWARDS, ME., BINNEY, HA., GUISAN, A., 2012. Building the niche through time : using 13,000 years of data to predict the effects of climate change on three species in Europe. *Global Ecology and Biogeography*. doi :10.1111/j.1466-8238.2012.00767.x.
- MANSO, R. ; PARDOS, M. ; KEYES, C.R. ; CALAMA, R. : "Modelling the spatio-temporal pattern of primary dispersal in stone pine (*Pinus pinea* L.) stands in the Northern Plateau (Spain)", [en línea] *Ecological Modelling*, ISSN-03043800, DOI-10.1016/j.ecolmodel.2011.11.028, 226 : 11-21, febrero de 2012.
- MARQUÉS, L. ; CAMARERO, J.J. ; GAZOL, A. ; ZAVALA, M.A. : "Drought impacts on tree growth of two pine species along an altitudinal gradient and their use as early-warning signals of potential shifts in tree species distributions", [en línea] *Forest Ecology and Management*, ISSN-03781127, DOI-10.1016/j.foreco.2016.09.021, 381 : 157-167, diciembre de 2016.
- MARTELL, D.L. *Forest Fire Management*. In : JOHNSON, E.A. (Ed.), *Forest Fires Behaviour and Ecological Effects*. Academic Press, Orlando, USA, pp. 527-575, 2001.

- MARTÍN-ALCÓN S., COLL L., AMEZTEGUI A. (2016) Diversifying sub-Mediterranean pinewoods with oak species in a context of assisted migration : responses to local climate and light environment. *Applied Vegetation Science* 19 : 254-267.
- MARTÍN-ALCÓN S., COLL L., SALEKIN S. (2015) Stand-level drivers of tree-species diversification in Mediterranean pine forests after abandonment of traditional practices. *Forest Ecology and Management* 353 : 107-117.
- MARTÍN-ALCÓN, S. : ; COLL, L. : ; SALEKIN, S. : "Stand-level drivers of tree-species diversification in Mediterranean pine forests after abandonment of traditional practices", [en línea] *Forest Ecology and Management*, ISSN-03781127, DOI-10.1016/j.foreco.2015.05.022, 353 : 107-117, 2015.
- MARTÍN-ALCÓN, S. : ; COLL, L. : "Unraveling the relative importance of factors driving post-fire regeneration trajectories in non-serotinous *Pinus nigra* forests", [en línea] *Forest Ecology and Management*, ISSN-03781127, DOI-10.1016/j.foreco.2015.11.006, 361, 2016.
- MARTIN-ALCÓN, S.; AMEZTEGUI, A.; COLL, L. (2017). Plantaciones de enriquecimiento de pinares submediterráneos con frondosas rebrotadoras en un contexto de migración asistida. *Actes SECF. Plasencia*. 26-30 juny.
- MARTIN-BENITO, D. : ; DEL RIO, M. : ; HEINRICH, I. : ; HELLE, G. : ; CANELLAS, I. : "Response of climate-growth relationships and water use efficiency to thinning in a *Pinus nigra* afforestation", [en línea] *Forest Ecology and Management*, DOI-10.1016/j.foreco.2009.12.001, 259(5) : 967-975, 2010.
- MÁTYÁS C., 2010. Forecasts needed for retreating forests. *Nature* 464, 1271. doi:10.1038/4641271a.
- MÁTYÁS C., BERKI, I., CZÚCZ, B., GÁLOS, B., MÓRICZ, N., RASZTOVITS, E., 2010. Future of beech in Southern Europe from the perspective of evolutionary ecology. *Acta Silvatica & Lingaria Hungarica* 6, 91–110. doi :10.1038/4641271.
- MESSIER C, BAUHHUS J, DOYON F, MAURE F, SOUSA-SILVA R, NOLET P, MINA M, AQUILUÉ N, FORTIN MJ AND PUETTMANN K (2019). The functional complex network approach to foster forest resilience to global changes. *Forest Ecosystems* 6 :21.
- MESSIER C; PUETTMANN KJ. (2011). Forests as complex adaptive systems : implications for forest management and modelling. *L'Italia Forestale e Montana* : 66 (3) : 249-258.
- MINNICH, R.A. Landscapes, land-use and fire policy : where do large fires come from? In : Moreno J.M. (Ed.), *Large Forest Fires*, Backhuys, Leiden, Netherlands, pp. 133-158, 1998.
- MORENO, J.M. Riesgo de incendios forestales en Evaluación preliminar de los Impactos en España por efecto del cambio climático, Proyecto ECCE, Informe final, pp. 581-616, 2005.

- MUELLER, JM., HELLMANN, JJ., 2008. An assessment of invasion risk from assisted migration. *Conservation Biology* 22(3), 562–567. doi :10.1111/j.1523-1739.2008.00952.x.
- NICOTRA, AB., ATKIN, OK., BONSER, SP. DAVIDSON, AM., FINNEGAN, EJ., MATHESIUS, U., POOT, P., PURUGGANAN, MD., RICHARDS, CL., VALLADARES, F., VAN KLEUNEN, M., 2010. Plant Phenotypic Plasticity in Changing Climate. *Trends in Plant Science* 15, 684–692.
- OPCC. Main climatological regions of the Pyrenees. 2013. Available from : http://www.opcc-ctp.org/index.php?option=com_content&view=article&id=4%3Aregions-climatiques&catid=7%3Ales-pyrenees-le-territoire-daction&Itemid=7&lang=fr
- PAUSAS, J.G. ; LLOVET, J. ; RODRIGO, A. ; VALLEJO, R. : Are wildfires a disaster in the Mediterranean basin? A review, [en línea] 2008,
- PEÑUELAS, J., BOADA, M., 2003. A global Change-Induces Biome Shift in the Montseny Mountains (NE Spain). *Global Change Biology* 9, 131–140.
- PEÑUELAS, J.; BOADA, M. A global change-induced biome shift in the Montseny mountains (NE Spain). *Global Change Biology*, 9, pp. 131-140, 2003.
- PERMAN, PB., RANDIN, CF., BROENNIMANN, P., VITTOZ, P., VAN DER KNAAP, WO., ENGLER, R., LE LAY, G., ZIMMERMANN, NE., GUISAN, A., 2008. Prediction of plant species distributions across six millennia. *Ecology Letters* 11, 357–369. doi :10.1111/j.1461-0248.2007.01150.x.
- PETERSON, D. ; JOHNSON, M. ; AGEE, J. ; JAIN, T. ; MCKENCIE, D. ; REINHARD, E. : Forest structure and fire hazard in dry forests of the western United States, Gen. Tech. Rep. PNW-GTR-628. Portland, OR : U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Pacific Northwest Research Station, 2005.
- PEYRON, J-L., 2014. Les apports de l'économie aux choix sylvicoles et d'investissements forestiers. RDV techniques n°45-46.
- PEYRON, J-L, TERREAUX, J-P, CALVET, P., GUO, B. 1998. Principaux critères économiques de gestion des forêts : analyse critique et comparative. *Annales des sciences forestières*, 55 (5), pp.523-551.
- PIEDALLU, C., GÉGOUT, JC., LEBOURGEOIS, F., SEYNAVE, I., 2016. Soil aeration, water deficit, nitrogen availability, acidity and temperature all contribute to shaping tree species distribution in temperate forests. *Journal of Vegetation Science* 27(2), 397–399. doi :10.1111/jvs.12370.
- PIEDALLU, C., GÉGOUT, JC., PEREZ, V., LEBOURGEOIS, F., 2013. Soil water balance performs better than climatic water variables in tree species distribution modelling. *Global Ecology and Biogeography* 22, 470–482. doi :10.1111/geb.12012.

- Piqué, M.; Beltrán, M.; Vericat, P.; Cervera, T.; Farriol, R.; Baiges, T. 2011. Models de gestió per als boscos de pi roig (*Pinus sylvestris* L.) : producció de fusta i prevenció d'incendis forestals. Sèrie : Orientacions de gestió forestal sostenible per a Catalunya (ORGEST). Centre de la Propietat Forestal. Departament d'Agricultura, Ramaderia, Pesca, Alimentació i Medi Natural. Generalitat de Catalunya.
- PUERTA-PIÑERO, C. : ; ESPELTA, J.M. : ; SÁNCHEZ-HUMANES, B. : ; RODRIGO, A. : ; COLL, L. : ; BROTONS, L. : "History matters : Previous land use changes determine post-fire vegetation recovery in forested Mediterranean landscapes", [en línia] *Forest Ecology and Management*, ISSN-03781127, DOI-10.1016/j.foreco.2012.05.020, 279 : 121-127, 2012.
- PUETTMANN KJ. (2011) Silvicultural challenges and options in the context of global change : simple fixes and opportunities for new management approaches". *Journal of forestry*, 109 (6) :321-331.
- PUETTMANN, K.J. : ; MESSIER, C. : ; COATES, K.D. : "Managing forests as complex adaptive systems", edit. C Messier, K J Puettmann, y K D Coates, *Managing forests as complex adaptive systems : building resilience to the challenge of global change.*, Ed.The earthscan forest library, NY, 2013.
- QUINE, C. : ; COUTTS, M. : ; GARDINER, B. : ; PYATT, G. : *Forests and wind : Management to minimize damage.*, edit. Forestry Commission Bulletin, 1995,
- REED, W. J., 1984. The effects of the risk of fire on the optimal rotation of a forest. *Journal of Environmental Economics and Management* 11 (2), 180–190.
- RIOU-NIVERT, P., 2014. Adaptation au changement climatique et gestion forestière. Rapport ONERC au Premier ministre et au Parlement : L'arbre et la forêt à l'épreuve d'un climat qui change, 77–108.
- RODRIGO, A. : ; RETANA, J. : ; PICÓ, F.X. : "Direct Regeneration Is Not the Only Response of Mediterranean Forests To Large Fires", [en línia] *Ecology*, DOI-10.1890/02-0492, 85(3) : 716-729, 2004. Disponible en : <http://www.esajournals.org/doi/abs/10.1890/02-0492>
- ROVELLI, E., 1995. La distribuzione dell'abete (*Abies alba* Mill.) sull'Appennino. *Monti e Boschi* 6, 5–13.
- SÁENZ-ROMERO C., LINDIG-CISNEROS, RA., JOYCE, DG., BEAULIEU, J., ST CLAIR, JB., JAQUISH, BC., 2016. Assisted migration of forest populations for adapting trees to climate change. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente* 22(3), 303–323. doi :10.5154/r.rchscfa.2014.10.052.
- SÁNCHEZ-PINILLOS, M. : ; AMEZTEGUI, A. : ; KITZBERGER, T. : ; COLL, L. : "Relative size to resprouters determines post-fire recruitment of non-serotinous pines", [en línia] *Forest Ecology and Management*, ISSN-03781127, DOI-10.1016/j.foreco.2018.07.009, , 2018.

- SANZ-ELORZA, M.; DANA, E.D.; GONZÁLEZ, A.; SOBRINO, E. Changes in the high-mountain vegetation of the central Iberian peninsula as a probable sign of global warming. *Annals of Botany*, 92, pp.273-280, 2003.
- SCHELHAAS, M.-J. ; HENGVELD, G. ; MORIONDO, M. ; REINDS, G.J. ; KUNDZEWICZ, Z.W. ; MAAT, H. ; BINDI, M. : "Assessing risk and adaptation options to fires and windstorms in European forestry", [en línea] *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, DOI-10.1007/s11027-010-9243-0, 15(7) : 681-701, 2010.
- SCHWARTZ, MW., HOEKSEMA, JD., GEHRING, CA., JOHNSON, NC., KLIRONOMOS, JN., ABBOTT, LK., PRINGLE, A., 2006. The promise and the potential consequences of the global transport of mycorrhizal fungal inoculum. *Ecology Letters* 9, 501–515. doi :10.1111/j.1461-0248.2006.00910.x.
- SERRADA R. (2011). Apuntes de selvicultura. FUCOVASA, EUTIF, madrid. 502 p.
- SJÖLUND MJ Y JUMP A. (2013) The benefits and hazards of exploiting vegetative regeneration for forest conservation management in a warming world. *Forestry*, 86, 5 : 503-513.
- STE-MARIE, C., NELSON, EA., DABROS, A., BONNEAU, ME., 2011. Assisted migration : Introduction to a multifaceted concept. *The ForesTry chronicle* 87 (6), 724–730.
- STEPHENS SL.; MILLAR CI.; COLLINS BM. (2010). Operational approaches to managing forests of the future in Mediterranean regions within a context of changing climates. *Environmental Research Letters*, 5 : 1-9.
- TACCOEN, A., PIEDALLU, C., SEYNAVE, I., PEREZ, V., GÉGOUT-PETIT, A., NAGELEISEN, LM., BONTEMPS, JD, 2019. Background mortality drivers of European tree species : climate change. in press.
- TINNER, W., COLOMBAROLI, D., HEIRI, O., HENNE, PD., STEINACHER, M., UNTENECKER, J., VESCOVI, E., ALLEN, JM., CARRARO, G., CONEDERA, M., JOOS, F., LOTTER, AF., LUTERBACHER, J., SAMARTIN, S., VALSECCHI, V., 2013. The past ecology of *Abies alba* provides new perspectives on future responses of silver fir forests to global warming. *Ecol. Monogr* 83(4), 419–439.
- URBIETA, I.R. ; GARCÍA, L. V. ; ZAVALA, M.A. ; MARAÑÓN, T. : "Mediterranean pine and oak distribution in southern Spain : Is there a mismatch between regeneration and adult distribution?", [en línea] *Journal of Vegetation Science*, ISSN-11009233, DOI-10.1111/j.1654-1103.2010.01222.x, 22(1) : 18-31, 2011.
- VENNETIER, M., VILA, B., LIANG, ER, GUIBAL, F., RIPERT, C., CHANDIOUX, O., 2007. Impact du changement climatique et de la canicule de 2003 sur la productivité et l'aire de répartition du pin sylvestre et du pin d'Alep en région méditerranéenne. ONF, Rendez-vous techniques, hors-sé-rie n°3, 67–73.

VICENTE, E. ; VILAGROSA, A. ; RUIZ-YANETTI, S. ; MANRIQUE-ALBA, À. ; GONZÁLEZ-SANCHÍS, M. ; MOUTAHIR, H. ; CHIRINO, E. ; DEL CAMPO, A. ; BELLOT, J. : "Water Balance of Mediterranean *Quercus ilex* L. and *Pinus halepensis* Mill. Forests in Semiarid Climates : A Review in A Climate Change Context", [en línea] *Forests*, DOI-10.3390/f9070426, 9(7) : 426, 2018.

VICENTE-SERRANO, S.M. ; LASANTA, T. ; ROMO, A. : "Analysis of spatial and temporal evolution of vegetation cover in the spanish central pyrenees : Role of human management", [en línea] *Environmental Management*, DOI-10.1007/s00267-003-0022-5, 34(6) : 802-818, 2005. Disponible en : [internal-pdf:/2005_Vicente-Serrano.pdf](#)



6 TABLE DE MATIÈRES

1	INTRODUCTION : LE PROJET CANOPEE	5
2	BASES TECHNIQUES ET ÉCOLOGIQUES DES TRAITEMENTS DE GESTION POUR L'ADAPTATION.....	7
2.1	ÉCLAIRCIES ET DÉPRESSAGES	7
2.1.1	Aspects généraux.....	7
2.1.2	Les traitements par éclaircie, un mécanisme d'adaptation	9
2.1.3	Le cas particulier des peuplements mixtes de Pinus et Quercus régénérés après incendie dans le contexte subméditerranéen	12
2.2	ADAPTATION DU DIAMETRE D'EXPLOITABILITE	15
2.2.1	Dans quel cas l'adaptation du diamètre d'exploitabilité est-elle pertinente ?.....	15
2.2.1.1	Cas des dépérissements constatés (ou vulnérabilité future) ne remettant pas en cause le choix de l'essence objectif	15
2.2.1.2	Cas des peuplements peu mélangés en essence et sans possibilité technique ou financière de réaliser une transformation par plantation	15
2.2.2	Le principe théorique de l'adaptation du diamètre d'exploitabilité en fonction du risque.....	15
2.2.2.1	Analyse technico-économique sans prendre en compte le facteur risque.....	15
2.2.2.2	Analyse technico-économique intégrant le facteur risque.....	17
2.2.3	Les conséquences pratiques sur le choix du diamètre d'exploitabilité en fonction du risque.....	18
2.2.3.1	Cas particulier de la futaie régulière.....	18

2.2.3.2 Cas particulier de la futaie irrégulière.....	19
2.2.3.3 Cas particulier du taillis.....	20
2.2.4 Vers une nécessité d'associer le diamètre et l'âge comme optimum de récolte ?.....	20
2.3 CHOIX DES ESSENCES ET DES PROVENANCES LORS DES PLANTATIONS.....	20
2.3.1 Les Bases écologiques.....	20
2.3.1.1 Migration assistée des populations.....	21
2.3.1.2 Expansion assistée de l'espèce.....	21
2.3.1.3 Migration assistée « longue-distance ».....	21
2.3.2 Une méthode sujette à débats.....	21
2.3.3 Mise en œuvre de la migration assistée.....	22
2.3.4 L'exemple du sapin, espèce emblématique des Pyrénées.....	22
2.4 RÉDUCTION DU RISQUE D'INCENDIE.....	23
2.4.1 Les forêts de montagne et le risque d'incendie de forêt.....	23
2.4.2 Traitements de réduction de la continuité et de la charge de combustible forestier.....	25
2.5 DIVERSIFICATION.....	26
2.5.1 Aspects généraux.....	26
2.5.1.1 Diversification génétique.....	27
2.5.1.2 Diversification d'essences.....	27
2.5.1.3 Diversification structurelle (horizontale).....	28
2.5.2 Traitements de diversification.....	28
2.5.2.1 Promotion de la diversité (de composition et de structure verticale) dans des forêts déjà mixtes.	28
2.5.2.2 Incorporation de nouvelles essences dans des peuplements peu diversifiés.....	30
2.5.2.3 Pratiques qui favorisent la diversité et l'adaptation génétique du peuplement.....	32
3 PLACETTES DÉMONSTRATIVES ET RÉSULTATS DES TRAITEMENTS	33
3.1 CARTE DE LOCALISATION DES PLACETTES DÉMONSTRATIVES.....	34
3.2 PINÓS (LLEIDA).....	36
3.2.1 Fiche descriptive du peuplement.....	36
3.2.2 Description et évaluation quantitative de l'action.....	38
3.2.2.1 Description des mesures réalisées.....	38
3.2.2.2 État initial du peuplement.....	39
3.2.2.3 Caractérisation quantitative de l'intervention.....	39
3.2.2.4 Effet de l'intervention sur le bilan hydrique.....	40
3.3 BOUCHEVILLE (PYRÉNÉES-ORIENTALES).....	42
3.3.1 Description et évaluation quantitative de l'action.....	42

3.3.1.1 État initial du peuplement de l'action.....	42
3.3.1.2 Caractérisation quantitative de l'intervention	42
3.3.1.3 Évaluation finale de l'intervention	43
3.3.2 Fiche descriptive du peuplement.....	44
3.4 ESPEZEL (AUDE)	47
3.4.1 Fiche descriptive du peuplement.....	47
3.4.2 Description et évaluation quantitative de l'action	49
3.4.2.1 État initial du peuplement de l'action.....	49
3.4.2.2 Caractérisation quantitative de l'intervention	50
3.4.2.3 Effet de l'intervention sur le bilan hydrique	50
3.4.2.4 Évaluation finale de l'intervention	51
3.5 POBLET (TARRAGONA).....	52
3.5.1 Fiche descriptive du peuplement.....	52
3.5.2 Description et évaluation quantitative de l'action	54
3.5.2.1 Description des relevés de mesures réalisées.....	54
3.5.2.2 État initial du peuplement	55
3.5.2.3 Caractérisation quantitative de l'intervention	56
3.5.2.4 Effet de l'intervention sur le bilan hydrique	56
3.5.2.5 Évaluation finale de l'intervention	57
3.6 EZPROGUI (NAVARRA).....	59
3.6.1 Fiche descriptive du peuplement.....	59
3.6.2 Description et évaluation quantitative de l'action	61
3.6.2.1 État initial du peuplement de l'action.....	61
3.6.2.2 Caractérisation quantitative de l'intervention	62
3.6.2.3 Effet de l'intervention sur le bilan hydrique	62
3.6.2.4 Évaluation finale de l'intervention	64
3.7 SAINT LAURENT BRETAGNE (PYRENEES ATLANTIQUES)	65
3.7.1 Fiche descriptive du peuplement.....	65
3.7.2 Description et évaluation quantitative de l'action	67
3.7.2.1 Description des mesures réalisées.....	67
3.7.2.2 État initial du peuplement d'action	68
3.7.2.3 Caractérisation quantitative de l'intervention	69
3.7.2.4 Effet de l'intervention sur le bilan hydrique	70
3.8 SAINT LAURENT DE CORDANS (PYRENEES ORIENTALES).....	71
3.8.1 Fiche descriptive du peuplement.....	71
3.8.2 Description et évaluation quantitative de l'action	73
3.8.2.1 Description des mesures relevées	73
3.8.2.2 État initial du peuplement de l'action.....	74
3.8.2.3 Caractérisation quantitative de l'intervention	74
3.8.2.4 Effet de l'intervention sur le bilan hydrique	75
3.8.2.5 Évaluation finale de l'intervention	76

3.9 RIEUCAZÉ (HAUTE-GARONNE)	77
3.9.1 Fiche descriptive du peuplement	77
3.9.2 Description et évaluation quantitative de l'action	79
3.9.2.1 Description des mesures relevées	79
3.9.2.2 État initial du peuplement de l'action.....	79
3.9.2.3 Description de l'intervention sylvicole.....	80
3.9.2.4 Effet de l'intervention sur le bilan hydrique	81
3.9.2.5 Bilan de l'intervention sylvicole.....	81
3.10 VILLANÚA (ARAGÓN).....	82
3.10.1 Fiche descriptive du peuplement.....	82
3.10.2 Description et évaluation quantitative de l'action	84
3.10.2.1 Description mesures réalisées.....	84
3.10.2.2 État initial du peuplement avant intervention	84
3.10.2.3 Description de l'intervention sylvicole	85
3.10.2.4 Effet de l'intervention sur le bilan hydrique	85
3.10.2.5 Bilan de l'intervention sylvicole	87
3.11 ENCAMP (ANDORRA).....	88
3.11.1 Fiche descriptive du peuplement.....	88
3.11.2 Description et évaluation quantitative de l'action	90
3.11.2.1 Description des mesures relevées	90
3.11.2.2 État initial du peuplement de l'action	91
3.11.2.3 Caractérisation quantitative de l'intervention	91
3.11.2.4 Bilan de l'intervention sylvicole	92
3.12 VITORIA (ÁLAVA).....	94
3.12.1 Fiche descriptive du peuplement	94
3.12.2 Description et évaluation quantitative de l'action	97
3.12.2.1 Description des mesures relevées	97
3.12.2.2 État initial du peuplement	100
3.12.2.3 Caractérisation quantitative de l'intervention	101
3.12.2.4 Effet de l'intervention sur le bilan hydrique	102
3.12.2.5 Bilan de l'intervention sylvicole	104
4 CONCLUSIONS	109
5 BIBLIOGRAPHIE	111
6 TABLE DES MATIÈRES.....	123



Socios, Socios asociados y Cofinanciadores



El proyecto CANOPEE ha sido cofinanciado al 65% por el Fondo Europeo de Desarrollo Regional (FEDER) a través del Programa Interreg V-A España-Francia-Andorra (POCTEFA 2014-2020). El objetivo del POCTEFA es reforzar la integración económica y social de la zona fronteriza España-Francia-Andorra. Su ayuda se concentra en el desarrollo de actividades económicas, sociales y medioambientales transfronterizas a través de estrategias conjuntas a favor del desarrollo territorial sostenible.