

Guide pratique de gestion pour l'adaptation des forêts pyrénéennes au changement climatique



Fiches synthétiques de résultats,
outils et travaux en cours sur le
massif pyrénéen





<https://www.acclimafor.net/>

Partenaires du projet:



Cofinanceurs:



Edition

Centro de la Propiedad Forestal. Departamento de Acción Climática, Alimentación y Agenda Rural
Torreferrussa
Carretera de Sabadell a Santa Perpètua, km. 4,5
Apartado de Correos 240, 08130 Santa Perpètua de Mogoda
Tel.: 93 574 70 39
Courrier électronique : cpf@gencat.cat
Site web: www.cpf.gencat.cat

Citation recommandée : Baiges, T., Delpi, R. (eds.) 2023. Guide pratique de gestion pour l'adaptation des forêts pyrénéennes au changement climatique. Fiches synthétiques de résultats, outils et travaux en cours sur le massif pyrénéen. Projet POCTEFA ACCLIMAFOR.

Design graphique et mise en page : Elizabeth Fernández (Centro de la Propiedad Forestal)

Projet cofinancé à 65% par le Fonds Européen de Développement Régional (FEDER) au travers du programme INTERREG V-A Espagne-France-Andorre.

SOMMAIRE

1. Introduction : Besoins d'informations et sources actuelles

- 1.1 Besoins d'informations : Quels défis pour les gestionnaires forestiers pyrénéens confrontés au changement climatique ? 1
- 1.2 Sources d'information : Réseaux et projets sur le changement climatique dans les Pyrénées. Contenu du guide pratique. 5

2. Indicateurs et effets du changement climatique dans les forêts pyrénéennes

- 2.0 Indicateurs forestiers du changement climatique dans les Pyrénées..... 8
- 2.1 Evolution phénologique des espèces arborées pyrénéennes..... 11
- 2.2 Evolution de l'état sanitaire des forêts pyrénéennes 17
- 2.3 Evolution de la composition floristiques des forêts pyrénéennes 21
- 2.4 Utilisation de la télédétection comme outils de suivi des effets du changement climatique dans les forêts pyrénéennes 27
- 2.5 Exemple d'utilisation de la télédétection en Navarre : suivi phénologique de quatres espèces forestières 28
- 2.6 Exemple d'utilisation de la télédétection en Catalogne : suivi de la vigueur de la végétation (NDVI)..... 35
- 2.7 Exemple d'utilisation de la télédétection au Pays basque : suivi de la défoliation dans les pineraies..... 40

3. Capacité adaptative et changements dans la distribution des espèces

- 3.0 Changements dans la distribution des espèces et la capacité d'adaptation - Informations et outils disponibles..... 45
- 3.1 Pin sylvestre - Auto-écologie et compatibilité climatique actuelle et future. Difficultés de régénération. 47
- 3.2 Le Pin sylvestre au Pays basque : Auto-écologie, menaces et stratégies d'adaptation..... 55
- 3.3 Le Pin sylvestre en Navarre : Auto-écologie, menaces et stratégies d'adaptation..... 59
- 3.4 Le Pin sylvestre en Catalogne : Auto-écologie, menaces et stratégies d'adaptation..... 61

4. Sylviculture adaptative

- 4.1 Stratégies d'adaptation appliquées aux forêts pyrénéennes 68
- 4.2 Plantations démonstratives pour l'adaptation au changement climatique des forêts pyrénéennes..... 74

ACCLIMAFOR
OPCC

 RÉPUBLIQUE
 FRANÇAISE
 Liberté
 Égalité
 Fraternité

 FONDS NATIONAL
 D'AMÉNAGEMENT
 ET DE DÉVELOPPEMENT
 DU TERRITOIRE
 Massif des Pyrénées


 PRÉFET
 DE LA RÉGION
 OCCITANIE
 Liberté
 Égalité
 Fraternité

 Interreg
 POCTEFA


BESOINS D'INFORMATIONS : QUELS DÉFIS POUR LES GESTIONNAIRES FORESTIERS CONFRONTÉS AU CHANGEMENT CLIMATIQUE ?

Le deuxième rapport sur le changement climatique dans les Pyrénées (OPCC, 2020) inclut les dernières projections climatiques réalisées dans le cadre du projet CLIMPY. Tous les modèles corroborent une augmentation significative des températures maximales et minimales quotidiennes en toutes saisons de l'année et dans toute la zone des Pyrénées, progressivement au cours du 21^{ème} siècle. A l'horizon 2030, l'augmentation de la valeur annuelle moyenne des températures maximales par rapport à la période de référence (1961-1990) est, en moyenne pour les Pyrénées, comprise entre 1°C et 2,7°C. En revanche, aucun changement significatif n'est modélisé pour le volume annuel de précipitations, bien que leur future répartition saisonnière soit inconnue.

Les changements de température attendus ont des conséquences sur les forêts, que l'on commence déjà à observer, parmi lesquelles :

- Modification de la diversité et de la répartition de diverses communautés végétales et espèces forestières.

- Effets sur la productivité des forêts et leur capacité à fixer le CO₂ atmosphérique par photosynthèse.
- Altération des conditions sanitaires de la forêt et déséquilibre éventuel du fait de la multiplication d'agents pathogènes et insectes ravageurs.
- Réduction de la capacité des forêts à nous protéger de certains risques naturels typiques des zones de montagne.
- Augmentation du nombre et de l'intensité des incendies de forêt dans les Pyrénées.

Face à cette situation et à l'incertitude qui lui est associée, quels sont les besoins en information des gestionnaires forestiers pour décider aujourd'hui de la gestion des forêts pyrénéennes de demain ?



Principaux défis identifiés par les gestionnaires forestiers des Pyrénées en relation avec le changement climatique

Afin de répondre spécifiquement à cette question, dans le cadre du projet ACCLIMAFOR, les 7 organisations partenaires du projet (CTFC, CPF, GAN-NIK, HAZI Fundazioa, CNPF, ONF, FORESPIR) ont décidé d'orienter de façon plus effective les axes de travail et de transfert du projet, en complétant leurs propres travaux par une consultation destinée à un groupe de gestionnaires et de techniciens, publics-privés, qui travaillent quotidiennement à la gestion des forêts pyrénéennes dans les régions participant au projet (Navarre, Pays basque, Catalogne, Aragon et Occitanie).

À cette fin, une enquête a été menée avec une question ouverte : "Si le projet devait répondre à deux questions essentielles en matière de gestion forestière et d'adaptation au changement climatique, quelles seraient-elles selon vous ?"

Des réponses supplémentaires ont été obtenues provenant de 16 gestionnaires forestiers pyrénéens, 8 espagnols et 8 français, identifiant ces enjeux et besoins essentiels, que nous avons classés en 3 groupes principaux de demandes d'information.

1. Impacts concrets du changement climatique sur les forêts pyrénéennes.
 2. Capacité d'adaptation des différentes espèces arborées.
 3. Sylviculture et autres moyens d'adaptation.
- Le changement climatique et l'expansion des ravageurs forestiers sur les Pyrénées.

1. Impacts et preuves du changement climatique sur les forêts pyrénéennes

Le besoin en matière de données concrètes sur les forêts pyrénéennes a été l'une des préoccupations prioritaire mise en avant par le plus grand nombre de gestionnaires interviewés. Cela indique la nécessité de mieux communiquer sur les aspects suivants, pour lesquels de nombreuses informations sont déjà disponibles :

- Les projections climatiques régionalisées et les outils de modélisation développés.
- Les résultats du suivi des données et des indicateurs existants, tels que les séries phénologiques ou les réseaux de surveillance des dommages forestiers.
- Les impacts potentiels de la combinaison des perturbations (par exemple : sécheresse et augmentation de la période de végétation).

Exemple de questions posées :

- De quelles données concrètes et réelles disposons-nous sur l'impact du changement climatique sur les forêts dans les Pyrénées ? ?
- Une meilleure connaissance des impacts sur les différentes espèces présentes dans les Pyrénées.

2. Capacité d'adaptation et changements au niveau de la distribution des espèces arborées. Quelles espèces favoriser ?

Sur cette thématique, les demandes sont orientées vers la capacité propre des forêts en matière de résilience, et on distingue l'une des principales difficultés du gestionnaire forestier : quelles espèces favoriser ? Pour répondre à cette question, il est nécessaire d'avoir des connaissances relatives :

- à l'autoécologie des espèces et leurs limites écologiques (pluviométrie, température,...).
- aux projections sur les changements de formations forestières liées à l'évolution des températures et des régimes hydriques.
- à la possibilité de substituer des espèces par d'autres économiquement équivalentes dans le cadre de ces nouvelles conditions climatiques.
- à l'introduction des espèces autochtone vs espèces indigènes (dans le temps ou géographiquement).

Exemples de questions posées :

- Aujourd'hui quelle est la capacité génétique des peuplements naturels à résister aux pires scénarios du changement climatique ?
- Quelle serait la distribution ou le changement de distribution attendu pour les espèces ou formations forestières actuellement en place ?

- Quelle information et critères doit-on prendre en compte pour recommander l'implantation d'une espèce en particulier (plus adaptée au changement climatique) ?
- Quelles sont les communautés que nous considérons comme climaciques face à une perturbation qui modifie les formations forestières existantes ? L'exemple des grands incendies près des Pyrénées dans les années 1990 est cité, où la régénération des arbres a été très rare et de très mauvaise qualité dans les stations les moins fertiles, laissant place à des formations de type broussailles, ou maquis.
- Devons-nous réellement nous limiter aux espèces considérées aujourd'hui comme autochtone ou pouvons-nous nous orienter vers des espèces qui auraient pu être présentes dans les Pyrénées à l'échelle de temps géologique ?
- Devons-nous prendre les incendies et autres perturbations comme des opportunités d'adaptation au changement climatique ?
- Impacts et dynamiques observés sur le Pin Sylvestre. Quelle espèce peut le substituer sans perte de rendement économique sur les exploitations forestières ? Chercher des alternatives économiques rentables sur la base de nouveaux usages pour les espèces remplaçantes.
- Les mycorhizes influencent-elles la capacité d'adaptation des écosystèmes forestiers ?

3. Sylviculture adaptative et autres moyens d'adaptation

Ce groupe est le plus diversifié en termes de défis considérés comme prioritaires par les gestionnaires forestiers pyrénéens. En d'autres termes, chacun des thèmes a été mentionné comme prioritaire par une seule personne (ils ne pouvaient indiquer que 2 thèmes qu'ils considéraient comme essentiels), ce qui indique la forte dépendance du contexte des stratégies d'adaptation sylvicole et l'importance de partager des exemples de mesures appliquées dans les différents environnements qui composent le massif pyrénéen. En général, ils peuvent être résumés comme suit :

- Changements à introduire dans les pratiques sylvicoles habituelles.
- Mesures pour accompagner l'(auto)adaptation des forêts.
- Gestion forestière préventive face aux perturbations majeures (incendies, ravageurs, inondations), et les effets combinés entre eux, et face à d'autres menaces.
- Financement de la sylviculture adaptative. Quantification des coûts et risques.



Exemples de questions posées :

- Comment gérer nos forêts pour favoriser la succession naturelle d'espèces adaptées au changement climatique (aider le changement en fonction de la succession naturelle pour éviter des coûts économiques élevés) ?
- Accompagnement des peuplements actuels à l'adaptation au changement (modèles de gestion et actions complémentaires d'appui).
- Quelles mesures de gestion forestière peuvent aider à minimiser les effets de la sécheresse ?
- Impact des la gestion sur le changement climatique (choix sylvicoles, travaux, méthodes d'exploitations).
- Revitaliser nos peuplements en appliquant une gestion de base (éclaircie, amélioration et régénération naturelle dès que les parcelles le permettent). Une population dynamique et en bonne santé résistera mieux aux contraintes qui peuvent se présenter.
- Il existe une tension permanente entre l'activité agricole/l'élevage (qui est importante pour le maintien du milieu rural, de la mosaïque qu'il génère, des systèmes sylvo-pastoraux, etc.) et la gestion conservatoire. Il serait intéressant d'inclure et de promouvoir d'autres activités rurales en tant que réponse au changement climatique.
- Dans les Pyrénées, l'impact des ongulés sauvages sur la régénération des arbres est un facteur qui aggrave les conséquences du changement climatique. Comment le limiter ?
- Comment l'eau douce sera-t-elle répartie entre un environnement de montagne a priori toujours pluvieux et la plaine, où la disponibilité en eau sera chroniquement insuffisante ?
- Compte tenu des fréquents épisodes de fortes pluies, est-il possible de mener une action sylvicole pour réduire ou minimiser les effets des inondations ?
- Quantification des coûts et des risques d'échec des différentes stratégies d'adaptation (plantation de nouvelles espèces, irrégularisation).

Pour plus d'informations

OPCC 2020. Résumé exécutif du rapport Le changement climatique dans les Pyrénées : impacts, vulnérabilités et adaptation Bases de connaissances pour la future stratégie d'adaptation au changement climatique dans les Pyrénées: <https://www.opcc-ctp.org/sites/default/files/documentacion/opcc-resumen-fr-print.pdf>



SOURCES D'INFORMATION : RÉSEAUX ET PROJETS SUR LES FORÊTS ET LE CHANGEMENT CLIMATIQUE DANS LES PYRÉNÉES - CONTENU DU GUIDE PRATIQUE



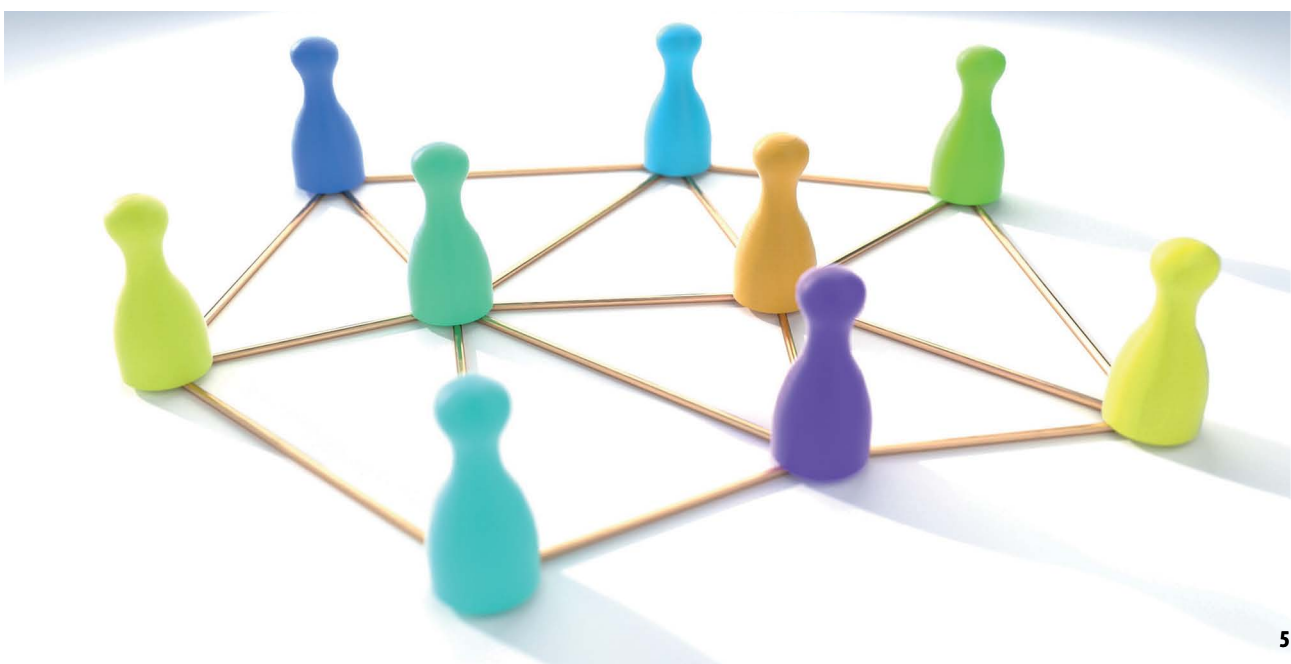
En collaboration avec l'**Observatoire Pyrénéen du Changement Climatique (OPCC)**, les projets INTERREG POCTEFA **OPCC2**, **CANOPEE** et les projets postérieurs **ACCLIMAFOR** et **ADAPYR** (2019-2022) constituent le principal réseau transfrontalier de suivi du changement climatique dans les forêts pyrénéennes. Cependant, des deux côtés de la chaîne des Pyrénées, il existe plusieurs réseaux et projets de référence visant à mieux comprendre l'ampleur du changement climatique ou à tester des stratégies de gestion forestière adaptative qui présentent également un intérêt pour les forêts pyrénéennes.

L'un des objectifs du projet ACCLIMAFOR a été de faciliter le transfert actif des vastes connaissances existantes sur les impacts du changement climatique sur les forêts et la gestion forestière adaptative entre les différents acteurs impliqués dans la gestion forestière sur les Pyrénées.

A cette fin, les partenaires du projet ont identifié les principaux réseaux et projets qui travaillent sur les forêts et le changement climatique de part et d'autre du massif. L'information a été structurée afin de faciliter sa consultation, disponible sur le site internet de Forespir et celui de l'OPCC.

Cette action, ainsi que l'identification des besoins des gestionnaires forestiers, a permis de déterminer les lacunes à combler en matière de connaissances dans les nouveaux projets partagés. Il a également facilité l'échange de connaissances et de matériel de diffusion entre les projets permettant le transfert ultérieur aux acteurs forestiers des différents territoires.

Enfin, un document pratique a été élaboré avec une information actualisée et générée dans le cadre des projets CANOPEE et ACCLIMAFOR. Les différents aspects du suivi et de la gestion adaptative étudiés sur les deux projets sont présentés sous forme de fiches récapitulatives.



Principaux réseaux et projets identifiés par les partenaires du projet ACCLIMAFOR sur la gestion forestière et l'adaptation au changement climatique présentant un intérêt pour les forêts pyrénéennes.



Contenus du guide pratique de gestion adaptative du projet ACCLIMAFOR

Le guide pratique élaboré dans le cadre du projet POCTEFA ACCLIMAFOR vise à apporter une réponse opérationnelle aux 3 défis majeurs mis en avant à travers le projet par les gestionnaires pyrénéens. A cette fin, l'information recueillie dans le cadre des projets CANOPEE et ACCLIMAFOR a été structurée dans un format pratique, et a été complétée par d'autres informations pertinentes, recueillies par les différents partenaires du projet.

Contenus du guide pratique ACCLIMAFOR

- **Indicateurs et preuves du changement climatique dans les forêts pyrénéennes**

Les premières conclusions de l'analyse des parcelles de suivi phénologique, de la défoliation et de la composition floristique réalisées au cours de la dernière décennie dans le cadre des projets OPCC-1, CANOPEE (2016-2018) et ACCLIMAFOR (2019-2022) sont présentées de façon conjointe pour l'ensemble du massif pyrénéen.

L'utilisation de la télédétection est évoquée pour le suivi des changements dans la phénologie et la santé/vitalité des peuplements forestiers, en complément des informations provenant des réseaux de parcelles, comme un des exemples d'utilisation dans le travail quotidien des gestionnaires forestiers pyrénéens.

- **Capacité d'adaptation et changements dans la répartition des espèces forestières. Le cas du pin sylvestre.**

Un état des outils cartographiques existants des deux côtés des Pyrénées est proposé pour comprendre l'impact du changement climatique sur la distribution et la vulnérabilité des différentes espèces, ainsi que d'autres informations disponibles pertinentes.

Le cas du pin sylvestre (*Pinus sylvestris*) est pris comme exemple et est illustré à travers certaines des stratégies que les gestionnaires forestiers mettent déjà en œuvre dans le but de faire face aux différents défis auxquels cette espèce est confrontée dans les différentes régions.

- **Silviculture adaptative**

D'une part, il résume les stratégies d'adaptation sylvicole développées en détail dans le guide CANOPEE, et d'autre part, il aborde la question des plantations forestières dans le contexte du changement climatique, en intégrant les nouvelles connaissances générées par les partenaires du projet ACCLIMAFOR au cours des 3 dernières années. Ces deux aspects sont illustrés par des exemples de nouvelles actions qui ont été intégrées dans le réseau de parcelles expérimentales et démonstratives établies par les partenaires du projet depuis 2016.

Pour plus d'information

<https://www.acclimafor.net/>

<https://forespir.com/>

<https://www.opcc-ctp.org/fr/sector/forets>

<https://www.opcc-ctp.org/es/proyecto/acclimafor>





INDICATEURS FORESTIERS DU CHANGEMENT CLIMATIQUE DANS LES PYRÉNÉES



ACCLIMAFOR
OPCC



RÉPUBLIQUE
FRANÇAISE
Liberté
Égalité
Fraternité

FONDS NATIONAL
D'AMÉNAGEMENT
ET DE DÉVELOPPEMENT
DU TERRITOIRE
Massif des Pyrénées



PRÉFET
DE LA RÉGION
OCCITANIE
Liberté
Égalité
Fraternité



Occitanie
Pyrénées - Méditerranée

Interreg
POCTEFA



UNION EUROPÉENNE

Le Changement Climatique est en cours comme en attestent les différents rapports de synthèse du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du Climat (GIEC) qui se succèdent et apportent chaque fois plus de preuves.

Le sixième rapport a été récemment publié, et confirme encore les pires craintes des précédents. Si les projections climatiques futures restent sujettes à discussions et hypothèses en fonction des scénarii d'émissions de gaz à effets de serre, les impacts des

émissions passées sont déjà perceptibles tant sur le climat lui-même que sur les écosystèmes naturels.

Pour autant, le GIEC lui-même insiste sur le fait que l'intensité des effets ne se fait pas ressentir de la même façon partout sur la planète et que certains écosystèmes ou domaines d'activité risquent d'être plus impactés que d'autres. Cela milite en conséquence pour un suivi des écosystèmes adapté aux enjeux de chaque territoire.



Photographie: Andoni MUGICA - CRPF Occitanie ©CNPF.

L'Observatoire Pyrénéen du Changement Climatique

L'Observatoire Pyrénéen du Changement Climatique (OPCC) est une initiative de coopération transfrontalière entre la France, l'Espagne et l'Andorre lancée en 2010 par la Communauté de Travail des Pyrénées.

Son objectif est de contribuer au suivi et à la bonne compréhension du changement climatique dans les Pyrénées afin d'aider les territoires à s'adapter à ses impacts. Il constitue ainsi une plateforme de référence en matière de connaissances (séries temporelles climatiques) mais également d'initiatives d'adaptation tant des écosystèmes (glaciers, flore, faune, forêts...) que des activités (tourisme, agropastoralisme...) de montagne.

Les nombreux partenaires alimentent par leurs actions, projets, suivis, productions diverses les travaux et résultats de l'OPCC, conférant à cet outil unique un rôle centralisateur important.

Concernant plus spécifiquement la forêt (59% de la surface du massif pyrénéen), plusieurs projets, soutenus entre autres par le Fonds Européen de Développement Régional dans le cadre du programme INTERREG POCTEFA, l'Etat Français, les Régions Occitanie et Nouvelle-Aquitaine, ont permis de mieux appréhender les phénomènes en cours.

Aussi, depuis la création de l'OPCC, ce sont succédés 5 générations de projets, portés par FORESPIR et les professionnels forestiers de chaque territoire, dédiés à l'adaptation des forêts du Massif au changement climatique (OPCC, OPCC2, CANOPEE, ADAPYR et ACCLIMAFOR).

Indicateurs

Nous l'avons vu : assurer un bon suivi des phénomènes en cours est essentiel pour anticiper et adapter nos mesures de gestion sylvicole au plus près des effets constatés. Ainsi, le choix des indicateurs est une étape primordiale car il constitue un compromis entre plusieurs critères parfois antagonistes :

- Variables qui sont fortement (voire uniquement) liées au phénomène observé,
- Ayant une réponse rapide pour anticiper les aggravations,
- Et ciblant les dommages prévisibles.

Pour cela, il faut avoir une idée des risques encourus tant pour les écosystèmes que pour l'activité économique qui y est liée, mais également une bonne perception des interactions entre des phénomènes combinés.

Dans le cadre de nos travaux, notre choix s'est arrêté sur trois indicateurs :

Evolution phénologique

- *Observe-t-on un décalage phénologique de la strate arborée (pour le hêtre, le sapin pectiné, le pin sylvestre, le pin à crochets, le pin noir ou encore le chêne sessile) ?*
- *Peut-on différencier ce décalage phénologique des arbres selon l'essence, l'altitude, l'exposition ou encore selon le gradient Méditerranée-Atlantique*

> Indicateur à **court terme**

> Ne dépend que des conditions climatiques.

Il s'agit de voir la réalité et l'importance du changement en cours.

Evolution des pathologies et faiblesses

- *Observe-t-on une dégradation de l'état de santé des arbres dans le temps pour les principales essences représentatives du massif ?*
- *Peut-on différencier une dégradation de l'état sanitaire des arbres selon l'essence, l'altitude, l'exposition ou encore le gradient Méditerranée-Atlantique ?*

> Indicateur à **moyen terme**

> Multifactoriel

Il s'agit de percevoir l'intensité des dommages affectant les arbres.

Evolution des aires de distribution des espèces

- *Observe-t-on une remontée en altitude, des changements d'exposition ou une progression/régression vers l'Ouest des essences arborées ou des espèces herbacées forestières ?*

> Indicateur de **long terme**

> Multifactoriel, dont anthropique

Il s'agit d'appréhender les modifications des écosystèmes

Pour chacun de ces indicateurs, il existe des bases de données qui ont été compilées, analysées et parfois complétées pour mieux refléter la variabilité des écosystèmes pyrénéens.

10 premières années de résultats du réseau de surveillance pyrénéen

Trois indicateurs de suivi du changement climatique ont été mis en place depuis 2013. Deux sont représentatifs des deux versants des Pyrénées. Ils visent à mesurer régulièrement :

- L'évolution phénologique des principales essences forestières des Pyrénées. 63 parcelles, réparties sur la chaîne pyrénéenne, sont suivies annuellement.
- L'évolution des pathologies et faiblesses, au travers de l'analyse du taux de défoliation des parcelles suivies dans le cadre de Réseau Européen de Suivi des Ecosystèmes Forestiers.

- Enfin, l'évolution des cortèges floristiques est également analysée, afin de détecter d'éventuels changements dans la distribution des espèces à l'échelle du massif.

Les résultats du suivi de ces trois indicateurs pour les forêts pyrénéennes sur les 10 dernières années effectuées par le CRPF Occitanie dans le cadre des projets CANOPEE et ACCLIMAFOR, sont détaillées dans les fiches 2.1, 2.2 et 2.3.





ÉVOLUTION DE LA PHÉNOLOGIE DES ESSENCES DES PYRÉNÉES



Auteur :

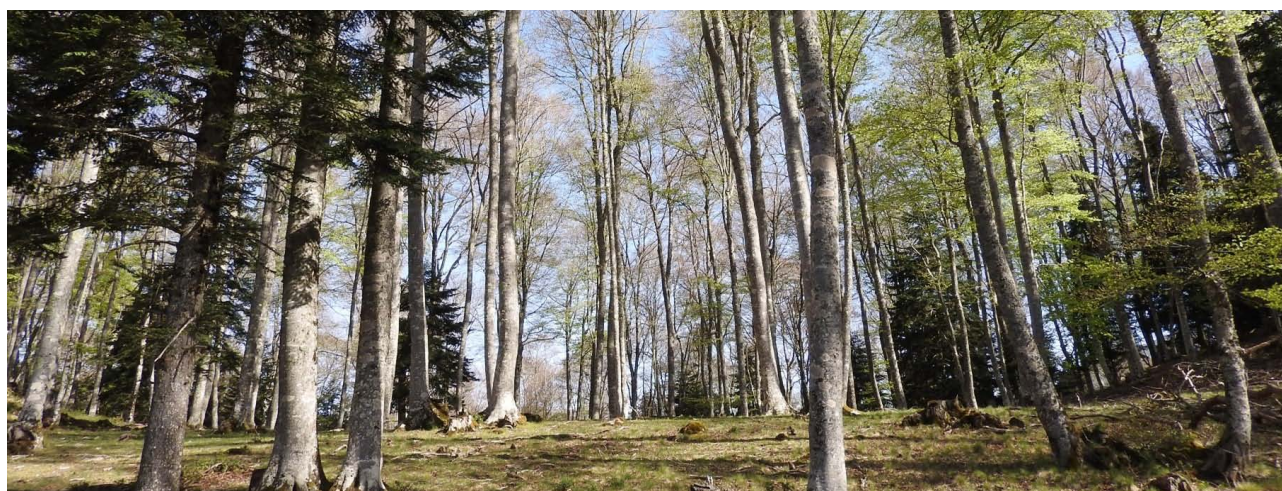
Emmanuel ROUYER (CRPF Occitanie)

La phénologie correspond à la succession des évènements biologiques des espèces tout au long de l'année. Pour les végétaux, le tableau ci-dessous en retrace les principales étapes. Ce cycle annuel est certes déterminé en partie par des facteurs internes (gènes, hormones), mais dépend, pour la majorité des espèces tempérées, principalement de facteurs environnementaux météorologiques.

En résulte un indicateur fiable à réponse rapide pour percevoir les premiers signes de la réalité de ce changement climatique.

Les déterminismes fonctionnels et la facilité d'observation nous ont conduits à ne retenir que **le débourrement en tant qu'indicateur le plus pertinent.**

	Facteurs déterminants	Facilité d'observation
Feuillaison (débourrement)	Principalement la température	Facile pour les arbres décidus ; plus complexe pour les sempervirents
Floraison	Principalement la température	Fleurs des essences forestières parfois discrètes
Fructification	Température et alimentation en eau	Souvent irrégulière ; difficile à comparer
Sénescence	Température, durée du jour, hormones, sécheresse	Difficile à qualifier : sénescence partielle parfois chute partielle...



Photographie : Emmanuel ROUYER - CRPF Occitanie © CNPF.

Protocole et base de données

Regroupement des données existantes du réseau européen de suivi des écosystèmes forestiers (Niveau II)

Historique des 20 dernières années

Variable "Phénologie"

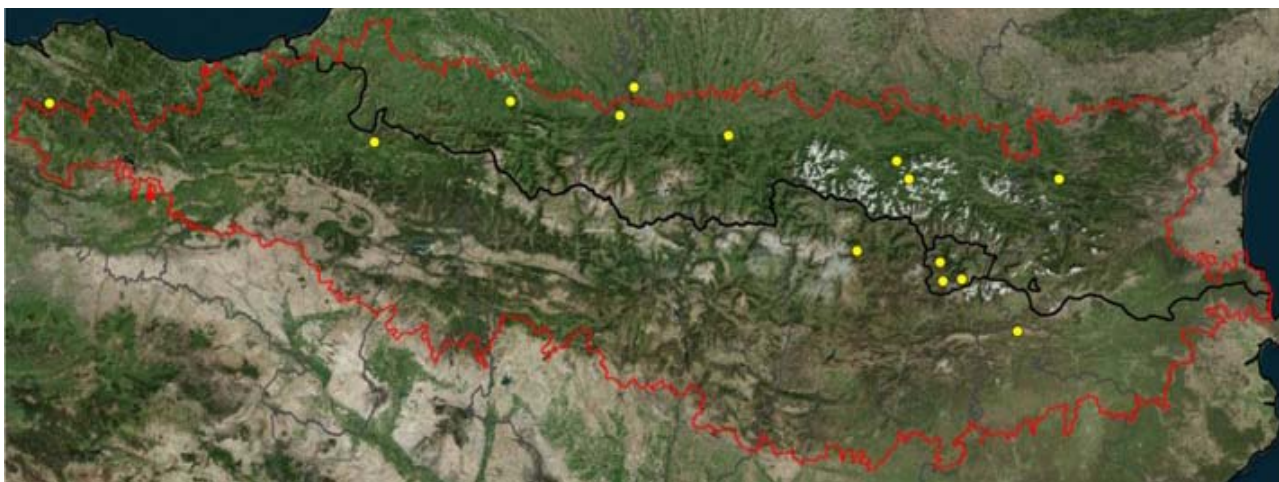
- 7 placettes françaises
- 4 placettes espagnoles
- 3 placettes andorranes



Transfrontalier

Premiers relevés: années 1990

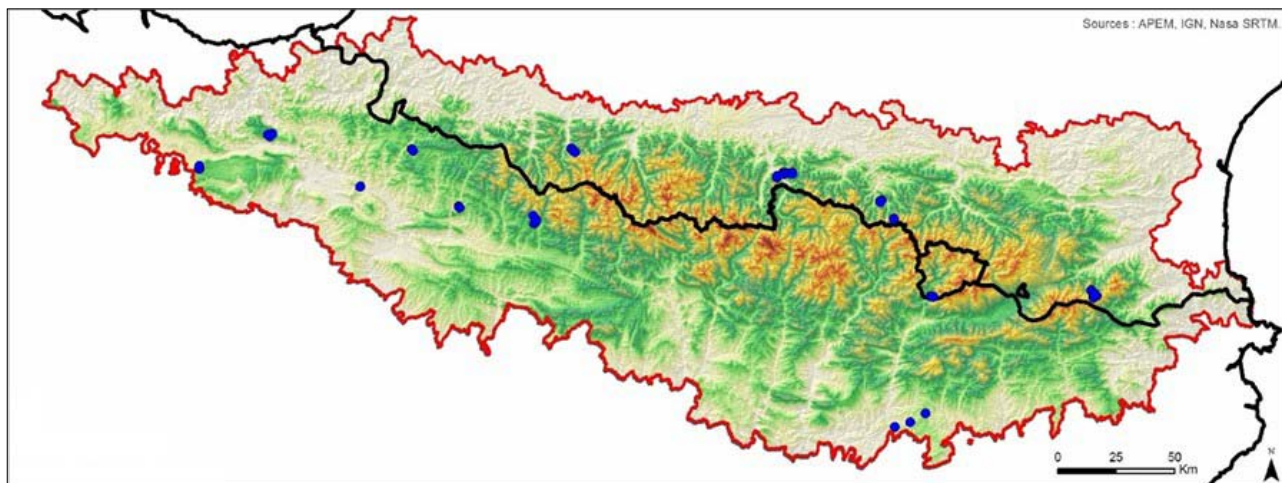
Harmonisation: 1997



Données phénologiques des projets OPCC, CANOPEE, ACCLIMAFOR - Série de 10 ans (2013-2022)

Les données phénologiques disponibles étant peu nombreuses sur le massif, il a été décidé d'installer **un réseau de 63 placettes complémentaires** réparties de sorte à cibler les principales essences du massif et à couvrir la variabilité de la chaîne pyrénéenne (altitude, gradients Est-Ouest et Nord-Sud).

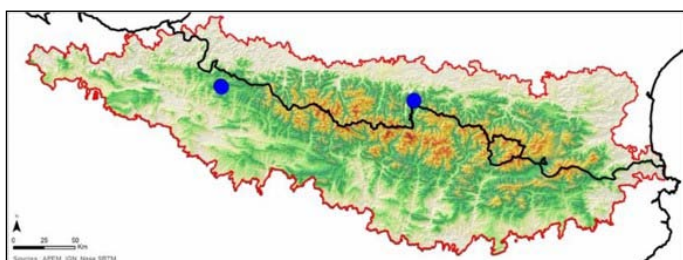
Par souci de comparaison et de complémentarité, le protocole qui y est appliqué est calqué sur celui du réseau européen de suivi des écosystèmes forestiers cité ci-dessus.



Quelques résultats

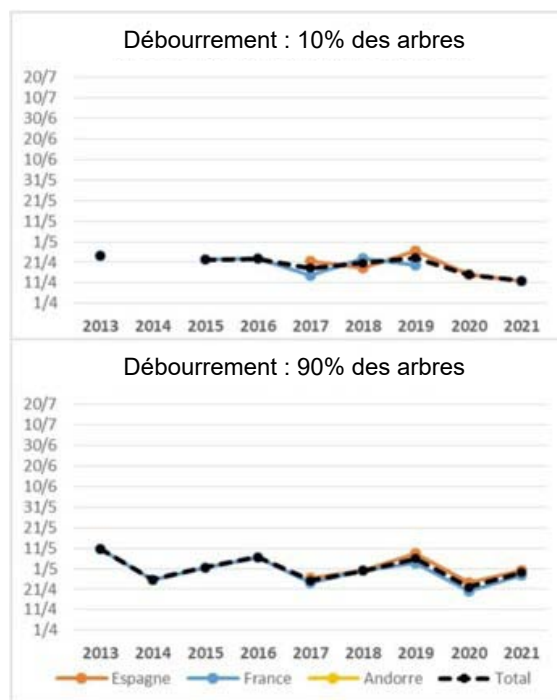
Chêne sessile – *Quercus petraea*

6 placettes	Nombre	Altitude minimale	Altitude maximale
Espagne	3	782 m	996 m
France	3	1 012 m	1 089 m
Andorre	-	-	-



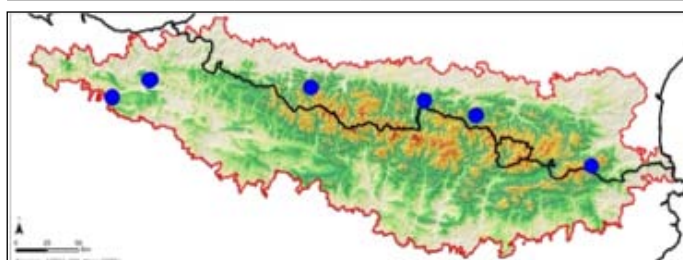
Légère variabilité interannuelle

Stabilité dans le temps



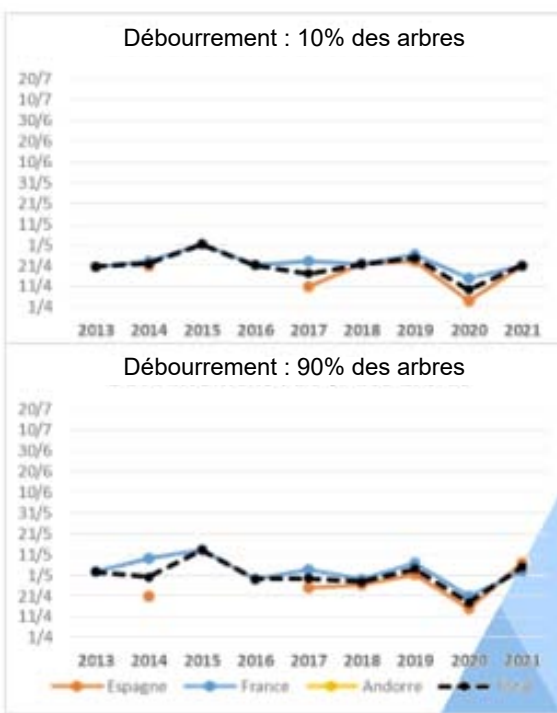
Hêtre commun - *Fagus sylvatica*

19 placettes	Nombre	Altitude minimale	Altitude maximale
Espagne	6	866 m	1 145 m
France	13	828 m	1 790 m
Andorre	-	-	-



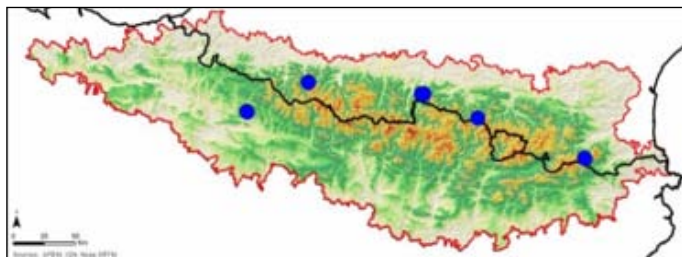
Légère variabilité interannuelle

Stabilité dans le temps

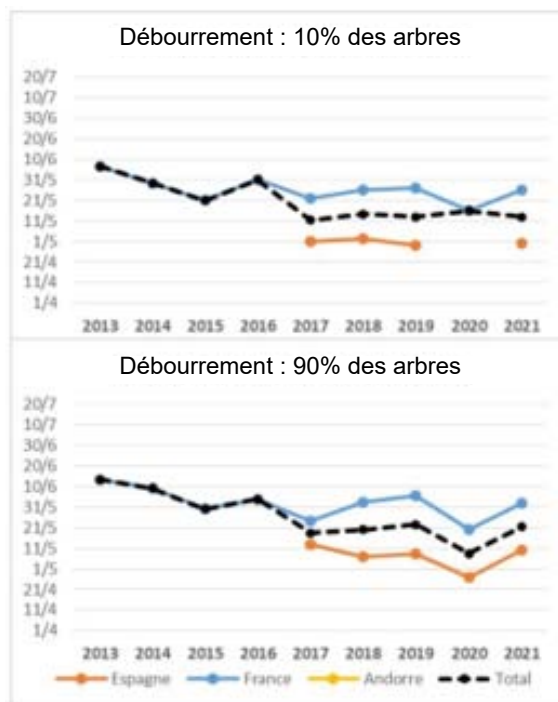


Sapin pectiné - *Abies alba*

13 placettes	Nombre	Altitude minimale	Altitude maximale
Espagne	3	707 m	932 m
France	10	1 062 m	1 797 m
Andorre	-	-	-

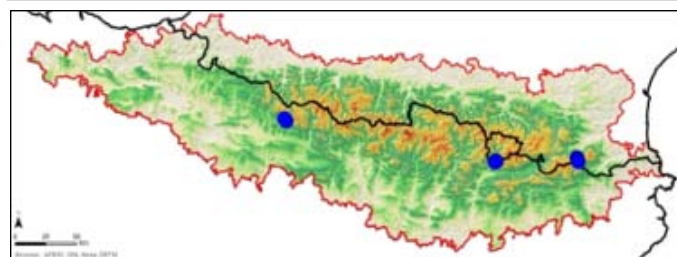


Forte variabilité interannuelle
Légère avancée du débourrement ?
► Tendence à confirmer

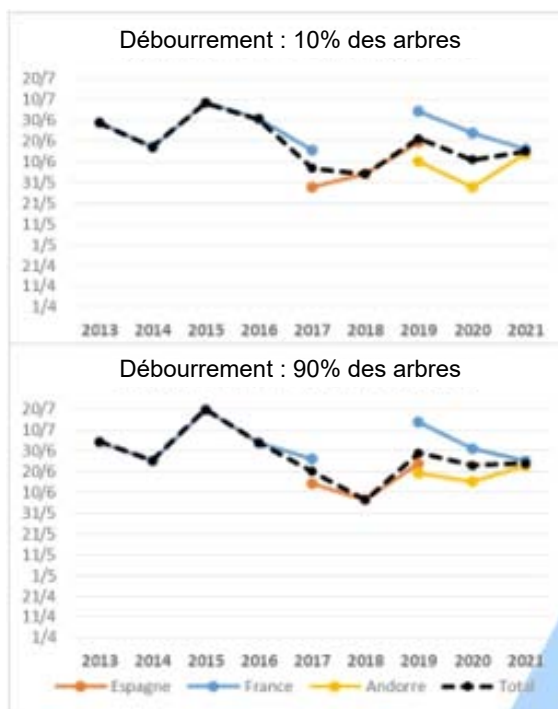


Pin à crochets - *Pinus uncinata*

12 placettes	Nombre	Altitude minimale	Altitude maximale
Espagne	3	1 660 m	1 930 m
France	6	1 868 m	2 221 m
Andorre	3	1 829 m	2 010



Très forte variabilité interannuelle
Stabilité dans le temps
► Tendence à confirmer

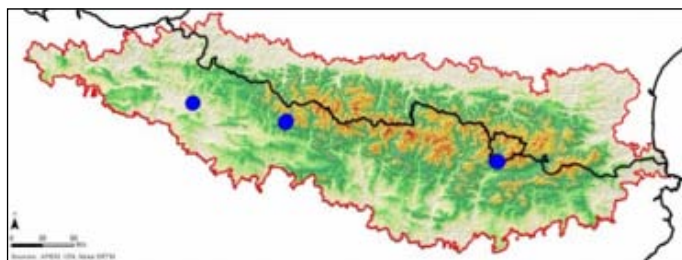


Guide pratique

Gestion pour l'adaptation des forêts pyrénéennes au changement climatique

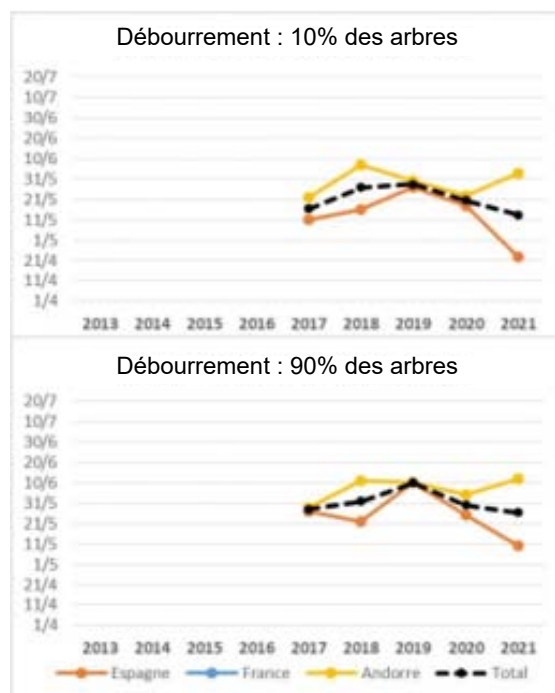
Pin sylvestre - *Pinus sylvestris*

10 placettes	Nombre	Altitude minimale	Altitude maximale
Espagne	6	600 m	1 625 m
France	-	-	-
Andorre	4	1 418 m	1 731 m



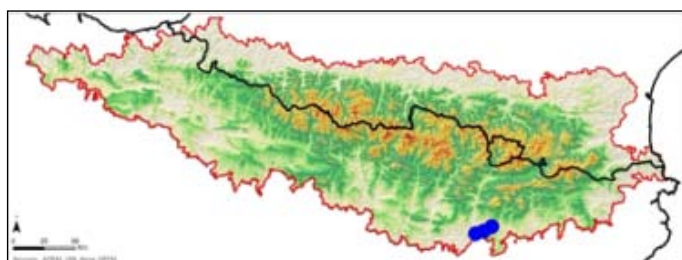
Légère variabilité interannuelle
Stabilité dans le temps

► Série encore courte, résultats à relativiser



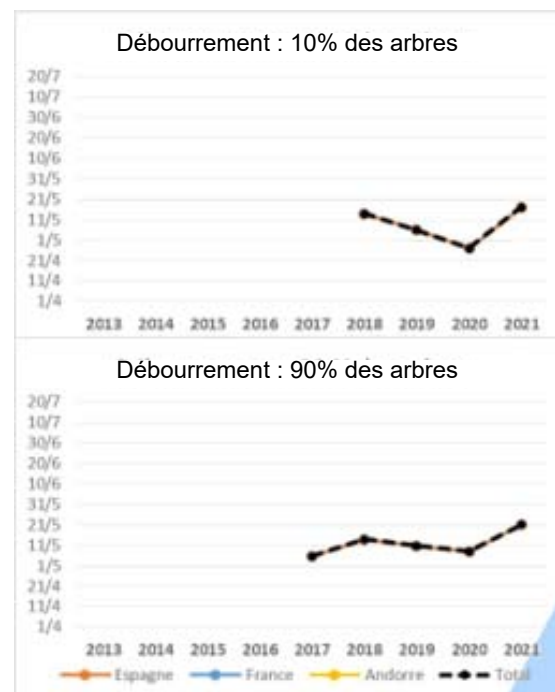
Pin de Salzmann - *Pinus nigra Salzmannii*

3 placettes	Nombre	Altitude minimale	Altitude maximale
Espagne	3	660 m	850 m
France	-	-	-
Andorre	-	-	-



Légère variabilité interannuelle
Stabilité dans le temps

► Série encore courte, résultats à relativiser



Perspectives

Disposer de séries temporelles plus longues

Installé depuis 2013, le suivi mené par les partenaires dans le cadre de l'Observatoire Pyrénéen du Changement Climatique a permis le suivi de 10 années de débourrement des principales espèces forestières du massif. Les premiers résultats tendent à montrer que la variabilité interannuelle des espèces est d'autant plus grande que les espèces concernées occupent des étages de végétations d'altitude (*Pinus uncinata* et *Abies alba* semblent en effet les plus concernés par ces variations d'une année sur l'autre). Les essences plus stables comme *Fagus sylvatica* ne sont pour autant pas à négliger ; au contraire, du fait de leur stabilité relative, une évolution des dates de débourrement marquerait une modification profonde des conditions climatiques du territoire.

Ces séries sont toutefois encore relativement courtes, mais ont le principal intérêt d'initier les courbes de tendance et ainsi de constituer une base de comparaison tangible pour les années futures. De la récurrence de ce type de relevé dépendra les possibilités de mettre en évidence les phénomènes en cours.

Télédétection

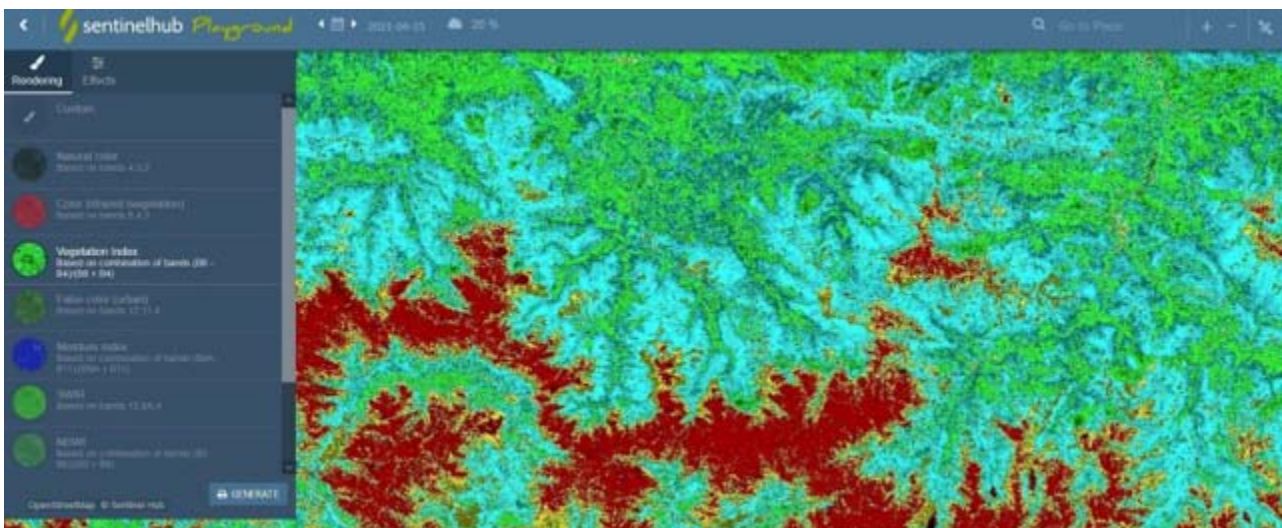
La durabilité de ce suivi pourrait également être améliorée grâce à l'utilisation de nouvelles

technologies, et en particulier de l'imagerie satellitaire. Le déploiement de satellites d'observation de la Terre, comme le programme européen Sentinel, permet de réaliser un suivi de la végétation. La récurrence d'une image attendue en moyenne tous les 5 jours, combinée à une précision des pixels au sol de l'ordre de 20x20 m, permet d'assurer un suivi précis de la phénologie.

Le principal problème, pour l'instant, reste la gestion de la couverture nuageuse qui obscurcit la surface terrestre et empêche donc la possibilité d'utiliser les bandes spectrales du domaine visible au moyen des indices de végétation habituels.

En revanche, grâce à la démocratisation des données RADAR (Sentinel-1) ou LiDAR, il existe de bonnes perspectives pour cartographier avec précision la phénologie ou même la distribution des espèces et communautés végétales. A priori, leur principal avantage est de pouvoir pénétrer les nuages et donc d'acquérir des données même par temps nuageux, une circonstance assez courante au printemps en montagne.

En raison de sa concomitance avec le déploiement des satellites Sentinelles, le suivi phénologique initié par les forestiers pyrénéens constitue une base de données de terrain qui peut s'avérer d'une importance capitale pour l'étalonnage des systèmes d'observation, nécessaire à un usage régulier.



Extrait de la carte d'indice de végétation (zones minérales, lacustres et urbaines en rouge, forêts en bleu, prairies en vert).





ÉVOLUTION DE L'ÉTAT SANITAIRE DES FORETS DES PYRÉNÉES



Auteur:

Emmanuel ROUYER (CRPF Occitanie)

Si les conditions climatiques deviennent trop sévères avec notamment augmentation des périodes soumises à stress hydrique, il est à craindre que le risque de mortalité des arbres s'accroisse. Ce dépérissement est souvent précédé de signes précurseurs affectant l'état sanitaire de l'arbre. En résulte un indicateur pour qualifier les premiers dommages du changement climatique et ainsi appréhender les risques de pertes de production sylvicole voire les risques de dépérissements.

Ce facteur est toutefois multifactoriel et peut notamment aussi être le reflet, par exemple, de conditions pédologiques défavorables (pH, calcaire

actif, engorgement...) ou encore d'attaques parasitaires (qui peuvent ou non être elles-mêmes favorisées par le changement climatique).

En outre, hors événement extrême, c'est souvent la répétition de conditions climatiques sévères qui finit par affaiblir les arbres qui ne cessent de puiser dans leurs réserves. Certaines essences sont également plus tolérantes que d'autres avec des stratégies d'évitement du stress (chute précoce des feuilles pour limiter l'évapotranspiration). La perception de cet indicateur en sera ainsi différée par rapport aux premiers signes ; c'est pourquoi nous l'avons qualifié d'indicateur à moyen terme.



Photographie: Aurélien COLAS - CRPF Occitanie © CNPF

Protocole et base de données

Regroupement de données existantes du réseau européen de suivi des écosystèmes forestiers (Niveau I et II)

Historique des 20 dernières années

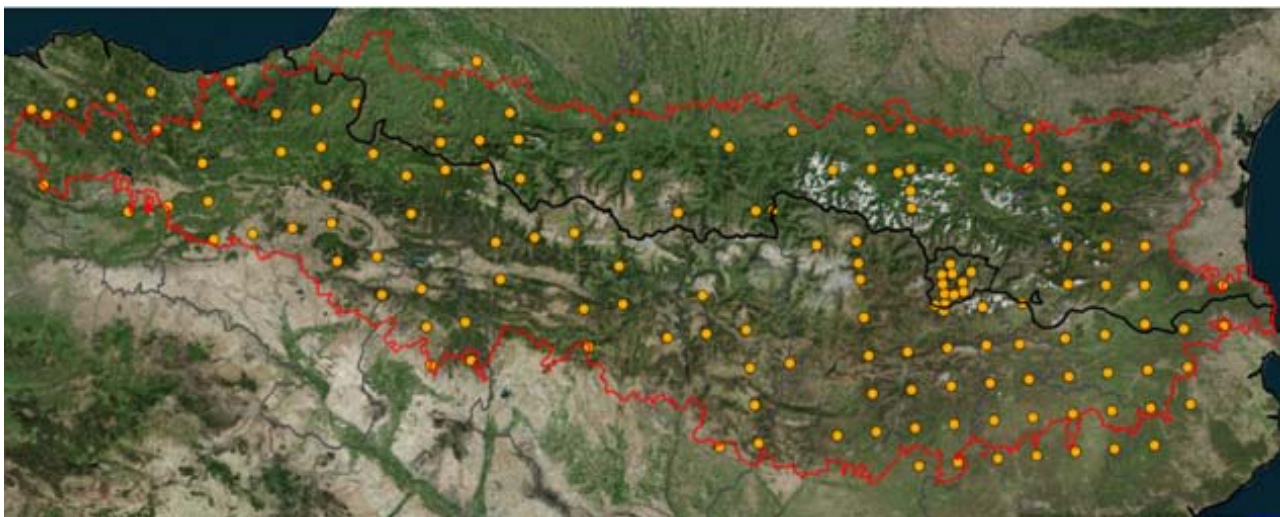
Aspect "Santé des forêts"

- 45 placettes françaises
- 98 placettes espagnoles
- 11 placettes andorranes

Transfrontalier

Premiers relevés : années 1990

Harmonisation : 1997



Les placettes de ce réseau sont réparties selon une maille carrée de 16 km, densifiée en Andorre. En résulte une couverture régulière du massif très représentative de la diversité des écosystèmes forestiers pyrénéens.

Protocole

Lors des mesures annuelles, plusieurs variables sont relevées parmi lesquelles on retiendra notamment les colorations anormales (jaunissement, rougissement...), le déficit foliaire et la mortalité de branches.

Pour le cas des colorations anormales, ces événements sont souvent ponctuels et peuvent échapper aux notateurs en fonction de la période à laquelle est effectué le relevé.

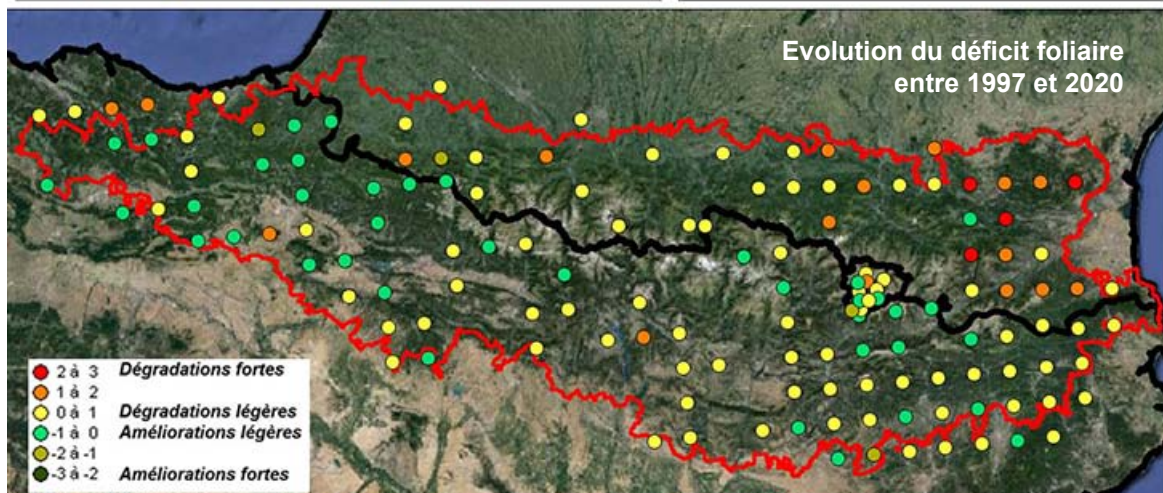
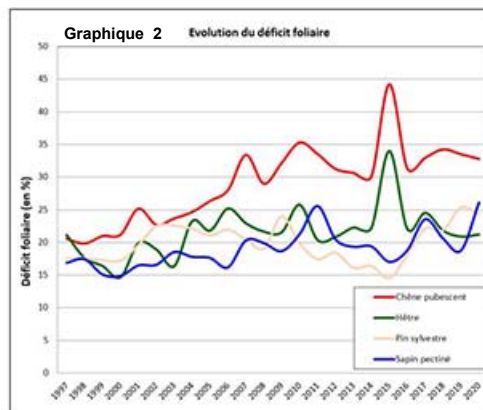
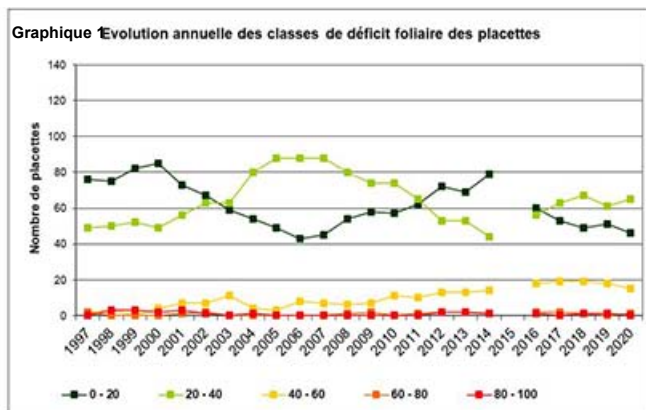
Les mortalités de branches ont, elles, des conséquences plus pérennes dans le temps mais ces placettes n'étant pas exemptes de toute sylviculture, les forestiers éliminent souvent préférentiellement les arbres concernés lors des coupes. Même si le déficit foliaire est soumis à la même incidence du fait de la sylviculture, lorsque l'ampleur des phénomènes s'aggrave, les effets s'en ressentent également sur la moyenne du déficit foliaire des arbres maintenus après coupe.

En outre, la photosynthèse permettant le processus de croissance de l'arbre, la diminution de sa surface photosynthétique, du fait du déficit foliaire, laisse craindre des pertes de production qui précèdent d'éventuels risques de dépérissement. Raisons pour lesquelles cette variable a retenu toute notre attention dans le cadre du suivi sanitaire de notre observatoire.

Quelques résultats

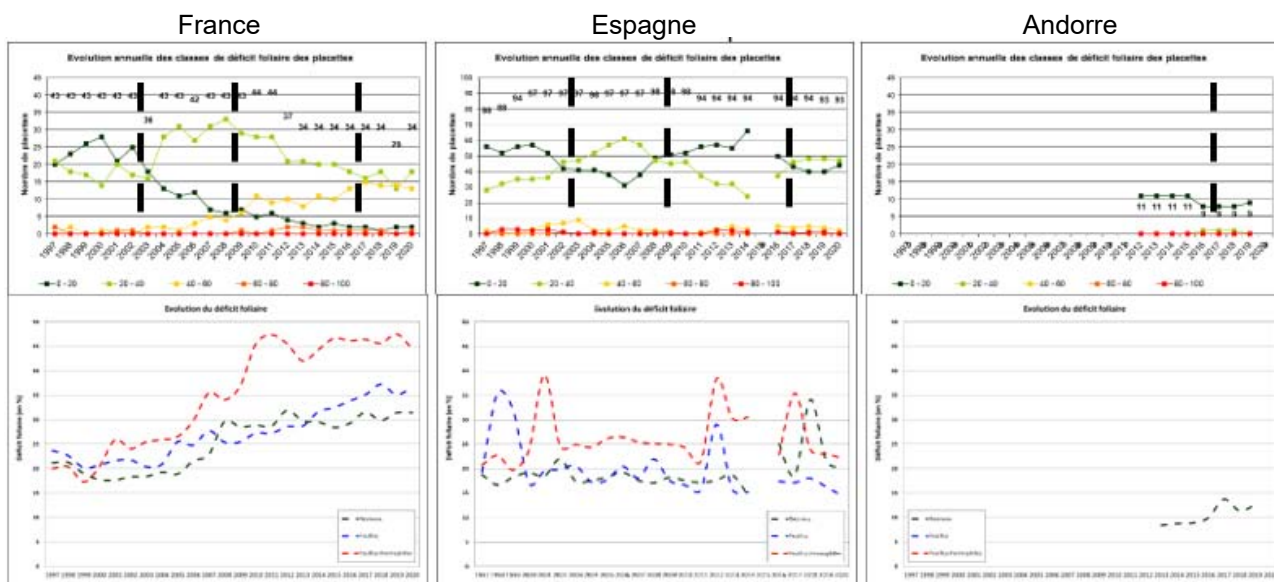
Le déficit foliaire d'un arbre est exprimé en pourcentage de feuilles ou d'aiguilles manquantes. Le déficit foliaire des placettes correspond ainsi à la moyenne du déficit foliaire de chacun des arbres la constituant. Les résultats sont usuellement présentés en classe d'intensité allant de 0-20% : « Très faible déficit foliaire » à 80-100% : « Très fort déficit foliaire ». Les résultats pour des placettes Pyrénéennes sont présentés ci-dessous et nous permettent les constatations suivantes :

- Une tendance à la détérioration du déficit foliaire avec effets d'à-coup (graphique 1) :
 - Une première fois après 2003 avec une prédominance des parcelles présentant entre 20 et 40% de déficit foliaire,
 - Une deuxième fois en 2009, avec une augmentation nette des placettes avec 40-60% de déficit foliaire et ceci malgré un retour de la dominance des placettes 0-20%,
- Une troisième fois en 2017 avec une augmentation marquée des parcelles entre 40 et 60% de déficit foliaire et une forte baisse des parcelles présentant moins de 20% de déficit foliaire.
- Toutes les essences ne sont pas impactées de la même manière (graphique 2). Si toutes montrent des fluctuations, ce sont de manière contre-intuitive, les essences dites thermophiles (exemple du chêne pubescent sur le graphique) qui semblent les plus impactées. Si ces essences sont réputées résistantes aux conditions climatiques sévères, elles les subissent tout de même et occupent une niche écologique laissée vacante par les autres essences tout en étant en limite de leur propre niche écologique. Toute aggravation climatique les expose donc fortement aux pertes foliaires.
- Des disparités territoriales sont importantes, comme l'illustre la carte en bas de page.



Differences territoriales

Entre les versants français et espagnol



Au regard de ces graphiques, l'impact du changement climatique semble plus important pour le versant français que pour le versant espagnol ou andorran. En effet, depuis 2003, la part des placettes présentant de 20 à 40% de déficit foliaire est devenue majoritaire, mais pourrait elle-même être prochainement supplantée par la classe des placettes entre 40 et 60 % de déficit foliaire qui ne cesse de prendre de l'importance depuis 2006. Si toutes les essences semblent affectées, les feuillus thermophiles semblent là-encore particulièrement concernés. A contrario, en Espagne ou en Andorre, les conséquences semblent moins marquées et des phases d'amélioration globales succèdent aux phases de détérioration.

Globalement exposé au Sud, les arbres du versant espagnol ont certainement subi des événements climatiques occasionnant un tri des géotypes les plus adaptés alors que les arbres du versant français globalement exposés au Nord, en temps normal plus favorable, n'ont peut-être pas eu à subir ce genre d'événement auparavant. Les hausses de température et sécheresses actuelles occasionnent une détérioration plus importante de l'état sanitaire

des arbres qui est peut-être un des prémices de ce tri génétique.

Entre la façade atlantique et la façade méditerranéenne

La carte de la page précédente met assez nettement en évidence une influence forte des conditions climatiques méditerranéennes dans laquelle se concentrent les placettes présentant de fortes dégradations de l'état sanitaire des peuplements forestiers. Lorsqu'on déroule année après année la série temporelle, on constate en outre que cette tendance progresse toujours plus vers l'Ouest et semble désormais attendre des placettes en Ariège.

A contrario les peuplements de l'Ouest de la chaîne pyrénéenne semblent globalement mieux résister (prédominance des placettes à améliorations légères au cours des 20 dernières années). L'influence climatique océanique avec des entrées maritimes importantes permet peut-être de compenser les changements en cours, mais pour combien de temps encore ? Difficile à prédire.





ÉVOLUTION DE LA COMPOSITION FLORISTIQUE DES FORÊTS DES PYRÉNÉES



Auteur

Emmanuel ROUYER (CRPF Occitanie)

Si le changement climatique est tel que les dépérissements s'accroissent du fait de l'inadaptation des essences aux nouvelles conditions climatiques, des espaces s'ouvriront et pourraient éventuellement accueillir de nouvelles espèces plus acclimatées.

Les aires de distribution de chaque espèce risquent de s'en trouver modifiées en fonction de leurs aptitudes et tolérances individuelles. La composition floristique des habitats forestiers et des niches écologiques pourrait en être affectée. En résulte un indicateur du changement climatique à plus long terme traduisant des changements profonds des écosystèmes forestiers.

Cet indicateur est multifactoriel et il peut être difficile de dissocier l'influence de chaque facteur. Cela dit, il en est un dont l'importance est primordiale : l'impact anthropique. En effet, il convient de bien avoir à l'esprit que la répartition des écosystèmes actuels dépend fortement des priorités d'usage des sols (forêt, estives, stations de skis...) que l'on veut bien leur donner et donc de choix politiques et sociétaux. Les forestiers évoquent souvent une remontée en altitude des essences, mais ces espaces sont à l'heure actuelle souvent occupés par des prairies d'estives. Et si les forêts de plaine souffrent, il est probable qu'il en soit de même pour les prairies de montagne, renforçant l'importance pour les agriculteurs des estives. A ces altitudes, il risque de ne pas y avoir de place pour tout le monde...



Photographie : Emmanuel ROUYER - CRPF Occitanie © CNPF.

Protocole et base de données

Données préexistantes mobilisables

Les bases de données floristiques (inventaires nationaux, associations, conservatoires botaniques...) ont chacune leurs spécificités. Le choix pour les données à retenir a donc porté sur :

- Le caractère systématique de l'échantillonnage pour ne pas introduire de biais sur des espèces, des habitats ou encore des territoires particuliers,
- Le caractère « exhaustif » des relevés où absence de données vaut absence de l'espèce, à opposer aux relevés ponctuels d'une espèce ne permettant pas de conclure à l'absence d'autres espèces,

- La régularité des relevés permettant de s'affranchir des effets d'aubaine (échantillonnage ponctuel),
- La possibilité de coupler les relevés à des variables explicatives (altitude, exposition, topographie...).

Cela nous a conduits à ne retenir que les inventaires forestiers nationaux. En Andorre, aucun inventaire de ce type n'a pu être mobilisé. Cependant, quelques différences de fonctionnement différencient les inventaires français et espagnols (espèces inventoriées, taxonomie, régularité des relevés sur les territoires concernés...). Un dernier tri a donc été réalisé pour ne retenir que 46 espèces ligneuses communes aux 2 inventaires.

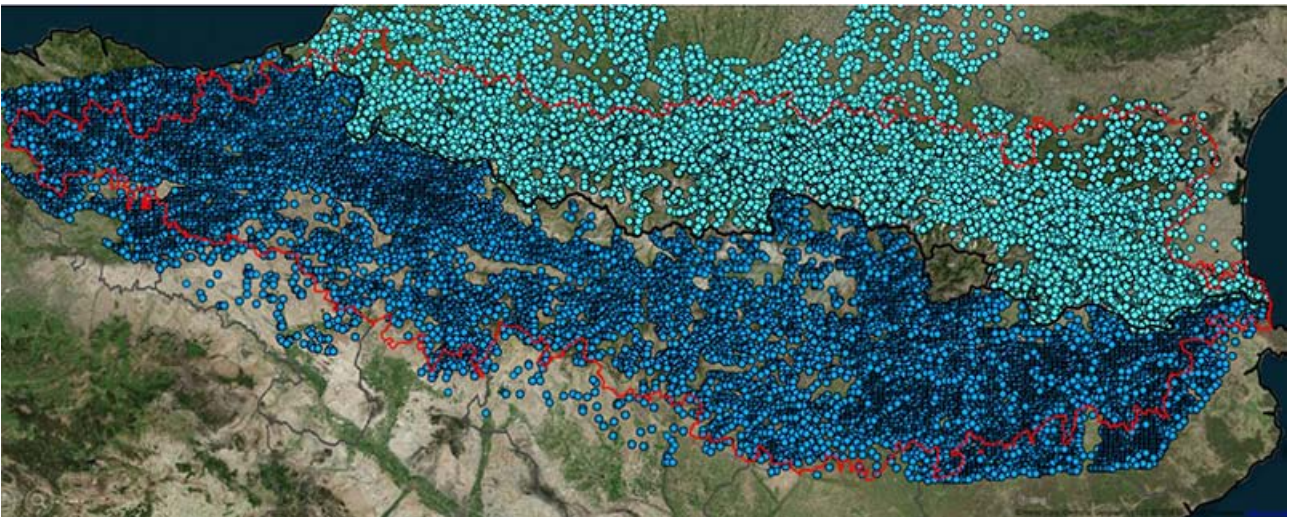
Regroupement des données existantes des inventaires forestiers nationaux

Historique des 20 dernières années

Aspects "Distribution"

- 6 602 données françaises
- 11 989 données espagnoles
- Pas de données andorranes

Transfrontalier
Premiers relevés : années 1990



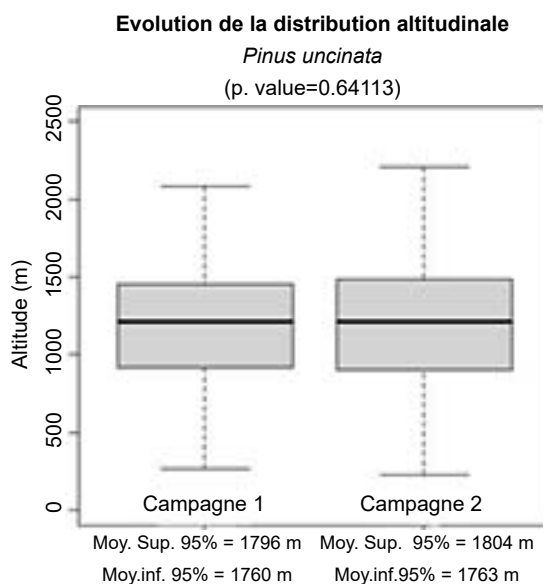
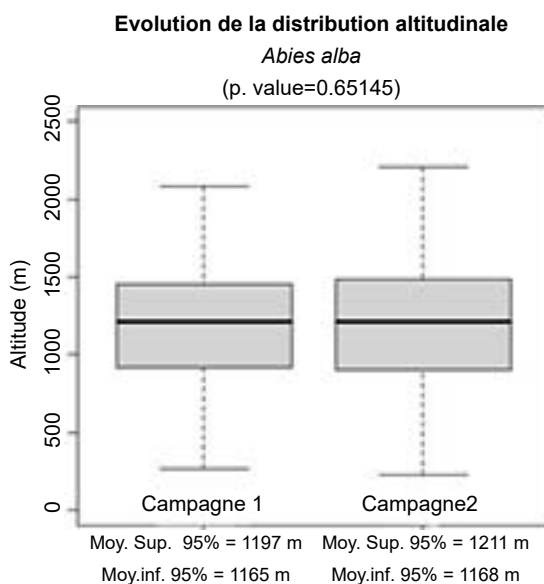
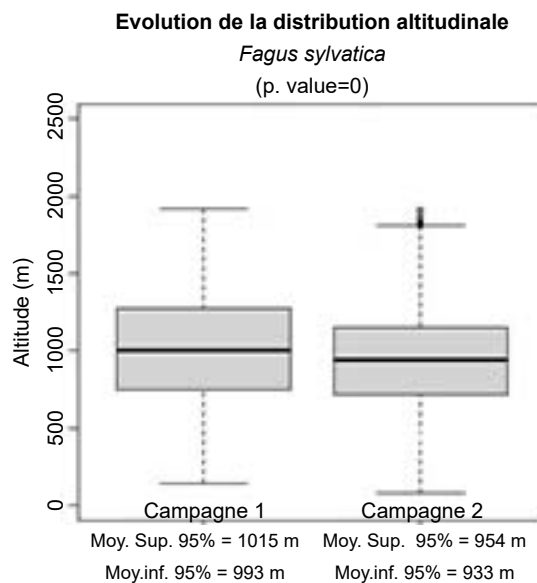
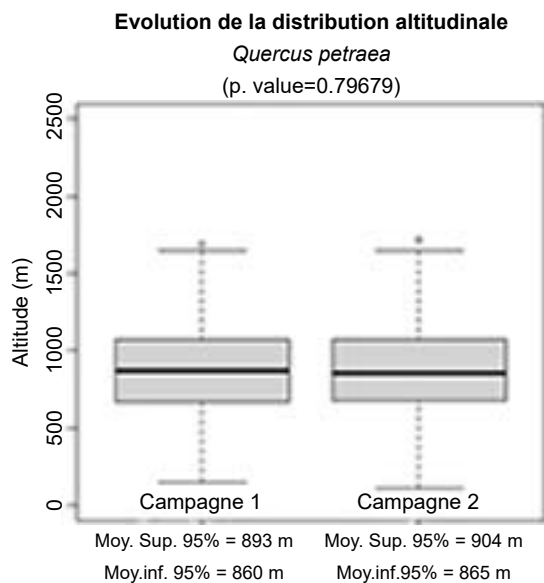
Méthodologie

Par souci d'homogénéité des protocoles et de la pression d'échantillonnage, deux périodes ont été retenues (1986-2001 et 2005-2019). L'analyse des éventuelles évolutions de niche écologique a porté essentiellement sur cinq variables de distribution : altitude, exposition, pente, longitude et latitude.

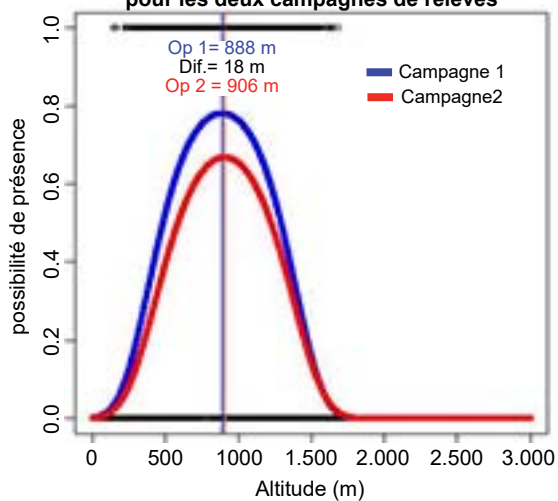
Sur la base de travaux scientifiques analogues, plusieurs traitements statistiques ont ainsi été mis en œuvre : analyse en composantes principales, tests de comparaison de moyennes et modélisation d'optimum écologique par régression de type logistique.

Résultats

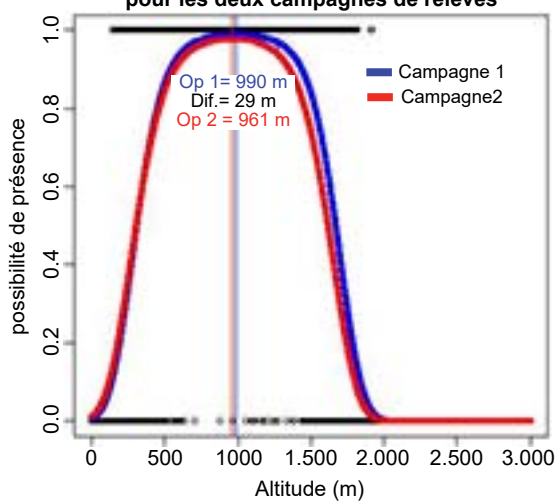
Les graphiques suivants illustrent les résultats pour 4 espèces des Pyrénées vis-à-vis de l'altitude.



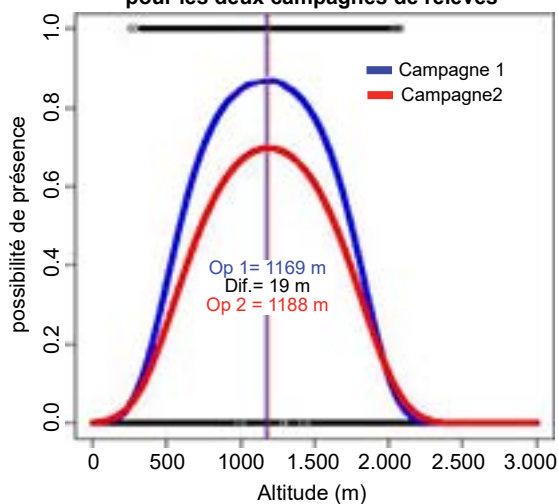
Régressions logistiques de *Quercus petraea*
pour les deux campagnes de relevés



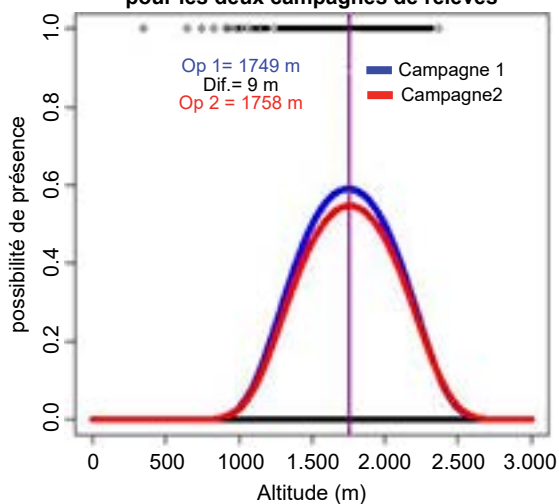
Régressions logistiques de *Fagus Sylvatica*
pour les deux campagnes de relevés



Regresiones logarítmicas de *Abies alba*
pour les deux campagnes de relevés



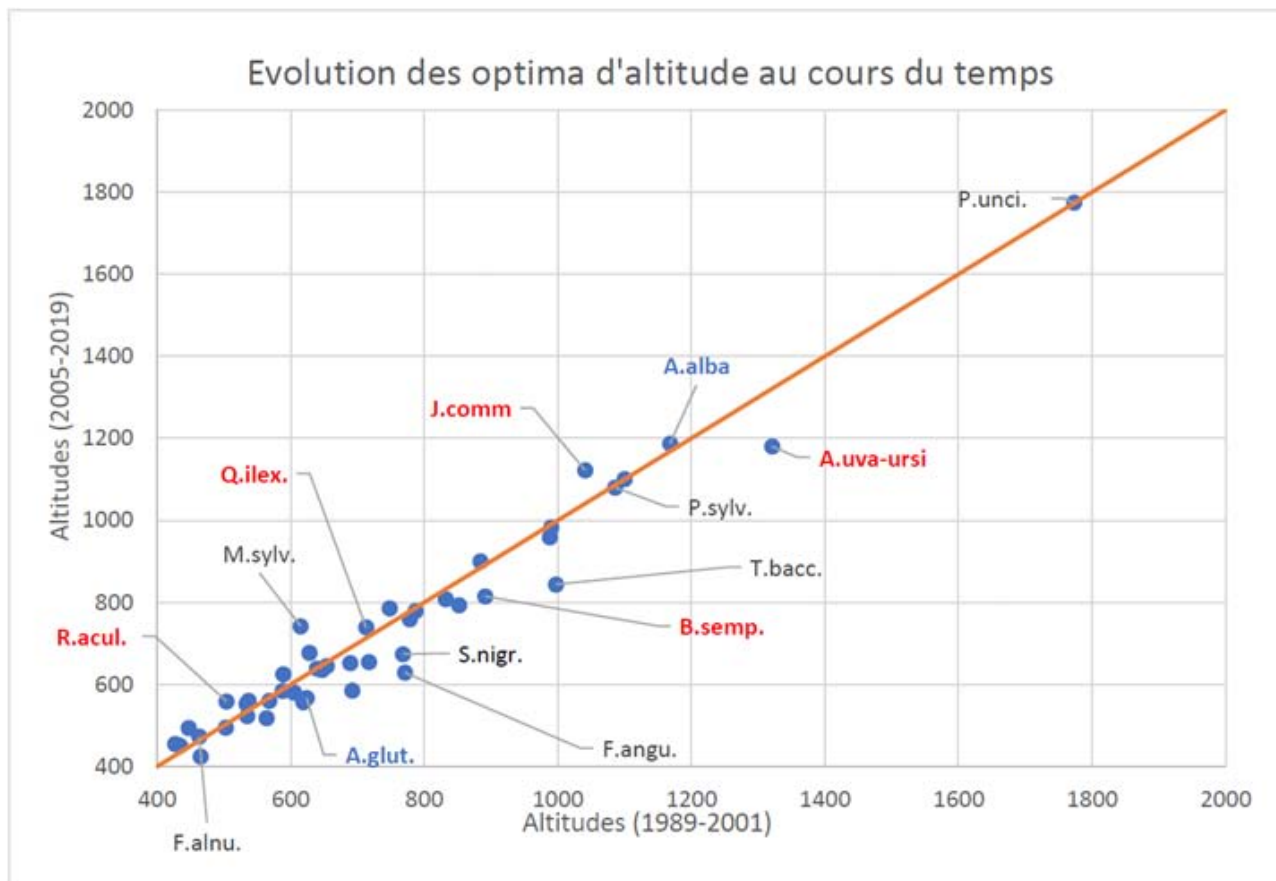
Régressions logistiques de *Pinus uncinata*
pour les deux campagnes de relevés



Guide pratique

Gestion pour l'adaptation des forêts pyrénéennes au changement climatique

Ces résultats peuvent plus aisément être comparés au moyen du graphique ci-dessous. Les points situés au-dessus de la bissectrice orange traduisent une élévation en altitude des essences concernées, alors que ceux en dessous traduisent une diminution de l'optimum altitudinal. Les espèces en rouge ont un caractère xérophile et celles en bleu un caractère hygrosclaphile.



Discussions

Les modifications climatiques se traduisant souvent par une élévation des températures et un allongement des périodes sèches, les conséquences suivantes sont communément attendues :

- Remontée des espèces en altitude,
- Déplacement des aires de distribution vers de le Nord,

- Déplacement des aires de distribution vers l'Ouest (secteur méditerranéen) vers l'Est (secteur atlantique).

Les résultats sont contrastés voire assez inattendus au regard de ces hypothèses de départ. Le tableau ci-dessous en fait la synthèse :

Déplacement	Altitude (m)		Latitude (km)		Longitude (km)		Pente (%)	
	Hausse	Baisse	Vers le Nord	Vers le Sud	Vers l'Ouest	Vers l'Est	Vers le plat	Vers la pente
Nb espèces significatives	7	11	16	6	22	5	2	8
Espèces non significatives	11	16	10	7	15	4	11	18

A ce stade, pour la majorité des espèces, **les optimums d'altitude observés se montrent plutôt stables**. Si certaines espèces comme le Fragon petit-houx (*Ruscus aculeatus*) ou le Pommier sauvage (*Malus sylvestris*) montrent une tendance à monter en altitude, à l'inverse, des baisses d'altitude ont également été observées comme par exemple pour l'If commun (*Taxus baccata*), ou encore le frêne à feuilles étroites (*Fraxinus angustifolia*). Ces résultats contre-intuitifs sont cependant mis en évidence pour d'autres massifs montagneux (Lenoir et al., 2008) et pourraient être expliqués par l'influence anthropique. Ainsi la déprise agricole en libérant des espaces jadis ouverts en plaine ou dans le piémont entraîne une fermeture de ces milieux, et une colonisation par des espèces forestières (Bodin et al., 2013), tant pour les espèces héliophiles comme le frêne, *Fraxinus angustifolia* (abandon récent) que pour les essences sciaphiles comme l'if, *Taxus baccata* (abandon au milieu du XXe siècle). La sylviculture contribue également à ces modifications indépendamment du climat. Le chêne rouge, *Quercus rubra*, en est un exemple intéressant puisqu'il a été fortement planté à faible altitude en remplacement du châtaignier, *Castanea sativa*, dépérissant.

Concernant les déplacements Est-Ouest, on constate que parmi les espèces plus courantes, plusieurs montrent un déplacement significatif vers l'ouest comme le sapin pectiné (*Abies alba*) ou le pin sylvestre (*Pinus sylvestris*). Ce constat pourrait s'expliquer par des conditions qui deviennent globalement plus sèches, surtout côté méditerranéen. Ainsi, les espèces xérophiles pourraient coloniser de nouveaux espaces leur devenant favorables alors que les espèces ayant besoin de plus de précipitations se cantonneraient aux régions encore arrosées à l'ouest de la chaîne. Ces résultats devront toutefois être confirmés ultérieurement.

Pour les déplacements Nord-Sud, conformément à l'hypothèse de départ, les déplacements vers le Nord sont majoritaires. Ce résultat doit toutefois être nuancé. Les Pyrénées, orientées Est-Ouest occupent toute la largeur de l'isthme reliant la péninsule ibérique à l'Europe et risque donc d'être un obstacle naturel à ces déplacements. En outre, du fait de cette orientation, si les espèces françaises remontent en altitude, leur déplacement général sera vers le Sud et non le Nord... On voit bien là la difficulté d'interpréter les résultats finement puisque de nombreux phénomènes interagissent entre eux.

Enfin, il est à noter que la flore ligneuse est souvent longévive, et à ce titre peut voir ses phénomènes adaptatifs se produire sur des échelles de temps plus longues que des espèces herbacées par exemple. Ces données devront donc être consolidées à moyen terme, et peut-être enrichies d'analyses équivalentes sur la flore herbacée, dont les phénomènes d'adaptation peuvent être plus rapides.

Pour aller plus loin

PICARD, J.; 2021. *Evolution de la composition floristique pyrénéenne au regard du changement climatique*, Mémoire de stage Bordeaux Sciences Agro / CNPF, ACCLIMAFOR-OPCC, 31 pp. et annexes.

BODIN, J.; et al., 2013, *Shifts of forest species along an elevation gradient in Southeast France: climate change or stand maturation?*, Journal of Vegetation Science, 24(2), pp. 269-283.

LENOIR, J.; et al., 2008. *A significant upward shift in plant species optimum elevation during the 20th century*, Science, 320(5884), pp. 1768-1771.





UTILISATION DE LA TÉLÉDÉTECTION COMME OUTIL DE SUIVI DES EFFETS DU CHANGEMENT CLIMATIQUE SUR LES FORÊTS PYRÉNÉENNES



ACCLIMAFOR
OPCC



RÉPUBLIQUE
FRANÇAISE
Liberté
Égalité
Fraternité

FONDS NATIONAL
D'AMÉNAGEMENT
ET DE DÉVELOPPEMENT
DU TERRITOIRE
Massif des Pyrénées



PRÉFET
DE LA RÉGION
OCCITANIE
Liberté
Égalité
Fraternité



Occitanie
Pyrénées - Méditerranée

Interreg
POCTEFA



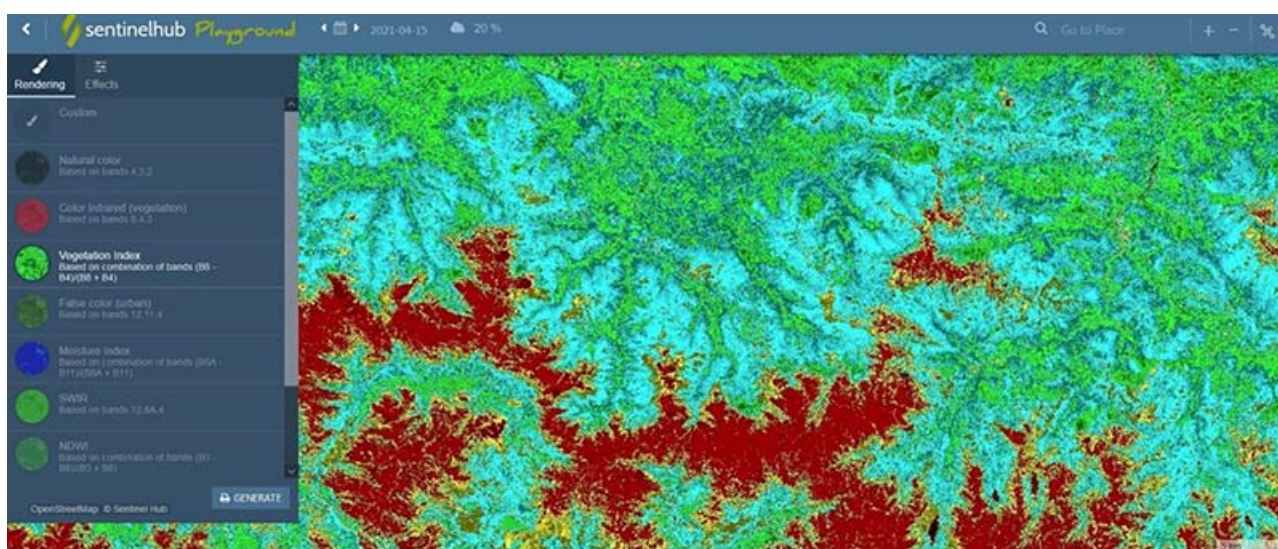
UNION EUROPÉENNE

Le suivi des réseaux de surveillance, notamment en termes d'échelle et de continuité dans le temps, peut être amélioré grâce au développement de nouvelles technologies, en particulier l'utilisation d'images satellitaires.

Le déploiement de satellites d'observation de la Terre, comme le programme européen Sentinel, permet de surveiller la végétation. La récurrence des images fournies en moyenne tous les 5 jours, associée à une précision des pixels de l'ordre de 20 m, permet, par exemple, un suivi précis de la phénologie. Le principal problème reste pour l'instant la gestion des nébulosités et des nuages obscurcissant la surface terrestre et donc la possibilité d'utiliser les bandes spectrales du domaine visible au moyen des indices de végétation habituels.

En revanche, la démocratisation des données RADAR (Sentinel-1) ou LiDAR offre de bonnes perspectives pour cartographier avec précision la phénologie, voire la répartition des espèces et des communautés végétales et leur état de vitalité. A priori, son principal avantage serait de pouvoir traverser les nuages et donc d'acquérir des données même par temps nuageux, ce qui est d'ailleurs assez fréquent au printemps en montagne.

De par sa concomitance avec le déploiement des satellites Sentinel, le suivi phénologique initié par les partenaires pour l'Observatoire Pyrénéen du Changement Climatique (voir fiche 2.1) constitue une base de données de terrain qui peut s'avérer d'une importance capitale pour la calibration des modèles informatiques nécessaires à leur utilisation en routine.



Extrait de la carte d'indice de végétation (zones minérales, lacustres et urbaines en rouge, forêts en bleu, prairies en vert).





EXEMPLE D'UTILISATION DE LA TÉLÉDÉTECTION EN NAVARRE: SUIVI PHÉNOLOGIQUE DE QUATRE ESPÈCES FORESTIÈRE



Auteurs :

Itziar Ventas Sorbet, Jon Oroz Santamaria (GAN-NIK),
Raquel Tobar León (GAN-NIK),
Mikel Goikoetxea Barrios (GAN-NIK)

Introduction et objectifs

Le suivi phénologique des espèces est considéré comme un outil essentiel pour détecter les impacts biologiques causés par le changement climatique et diagnostiquer la santé des écosystèmes.

Traditionnellement, les études phénologiques sont réalisées à travers des observations sur le terrain, limitées à un petit nombre d'espèces végétales individuelles dans une zone géographique restreinte, et comportent une composante subjective de la part de l'observateur. La télédétection est présentée comme un outil utile pour résoudre ces problèmes, et c'est donc l'un des objectifs du projet ACCLIMAFOR que de profiter de la synchronisation des observations phénologiques avec les données

des satellites Sentinel, et de tester une approche méthodologique basée sur la télédétection afin d'évaluer sa viabilité future.

Dans ce travail, les observations de terrain de l'état phénologique du débourrement, réalisées dans le cadre des projets CANOPEE et ACCLIMAFOR pendant la période 2017 - 2021 sur 4 espèces forestières de Navarre, sont mises en relation avec les données issues des images Sentinel-2, afin d'analyser le potentiel de ces images dans le suivi de la phénologie.

Aire d'étude et données de base

Entre 2017 et 2021, l'état phénologique de la germination des espèces forestières *Pinus sylvestris*, *Fagus sylvatica*, *Abies alba* et *Quercus Petraea* a été suivi sur 4 parcelles de Navarre, situées respectivement à Lizoain, Sierra de Aralar, Burgui et Garaioa. Ces parcelles font partie du réseau d'observation le plus grand de toutes les Pyrénées.

Chacun des sites d'observation est composé de 3 parcelles, séparées par une différence d'altitude d'environ 100m. Les houppiers des arbres sont observés chaque semaine pour déterminer l'état de développement des bourgeons et on note leur état de germination, ainsi que le pourcentage de bourgeons (10%, 50% ou 90%) qui ont germé sur l'ensemble du houppier.



Figure 1 : Localisation des zones d'étude

ESPÈCES	<i>Fagus sylvatica</i>	<i>Abies alba</i>	<i>Quercus petraea</i>	<i>Pinus sylvestris</i>
LOCALISATION	Sierra de Aralar	Burgui	Garayoa	Lizoain
Parcelle 1	954 m	707 m	782 m	600 m
Parcelle 2	1049 m	794 m	880 m	695 m
Parcelle 3	1145 m	932 m	996 m	790 m

Tableau 1. Altitude des parcelles

Méthodologie

1. Traitement des données terrain

Chaque parcelle est composée de 36 arbres, et dans chacune d'elles, le stade de germination et le pourcentage d'occupation de la canopée (10/50/90%) sont observés. Ces observations ont été traitées pour obtenir une moyenne. Le mode et la moyenne pondérée des observations hebdomadaires de chaque parcelle sont mis en relation avec les images satellites.

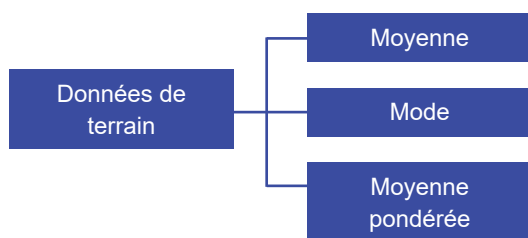


Figure 2 : Résultats obtenus grâce à l'analyse des données de terrain

2. Traitement des images Sentinel-2 et collecte d'informations obtenues

Les images du satellite Sentinel-2 du programme Copernicus de l'ESA sont traitées pour extraire les informations correspondant à chaque espèce, afin d'analyser s'il existe une relation entre le capteur

multispectral Sentinel-2 et les données phénologiques observées sur le terrain. Le processus comprend les étapes suivantes, pour lesquelles un script distinct est créé :

1. Calculer les trois indices de végétation (IV) : kNDVI, GNDVI, NDWI pour les trois parcelles des quatre espèces.
2. Extraire les statistiques par zone, pour chaque indice de végétation pour chaque zone d'étude.
3. Supprimer les fichiers qui ne présentent pas de données en raison de la couverture nuageuse à ces dates.
4. Obtenir les séries temporelles pour chaque zone, pour chaque indice de végétation.

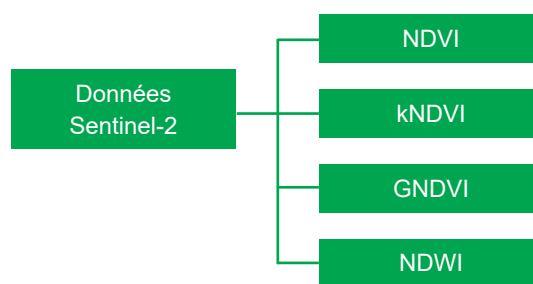


Figure 3. Résultats obtenus à partir des données des images Sentinel-2

Résultats et discussions

1. Analyse des séries chronologiques des indices de végétation (IV)

Pour chaque espèce forestière, des séries périodiques ont été calculées pour la période allant de janvier 2017 à juillet 2021, avec les variations des indices de végétation NDVI, kNDVI, GNDVI et NDWI obtenues des images Sentinel-2.

Les graphiques suivants montrent les moyennes maximales normalisées des parcelles (points rouges) et les valeurs maximales normalisées du NDVI (ligne verte) pour la parcelle 1 de chacune des espèces.

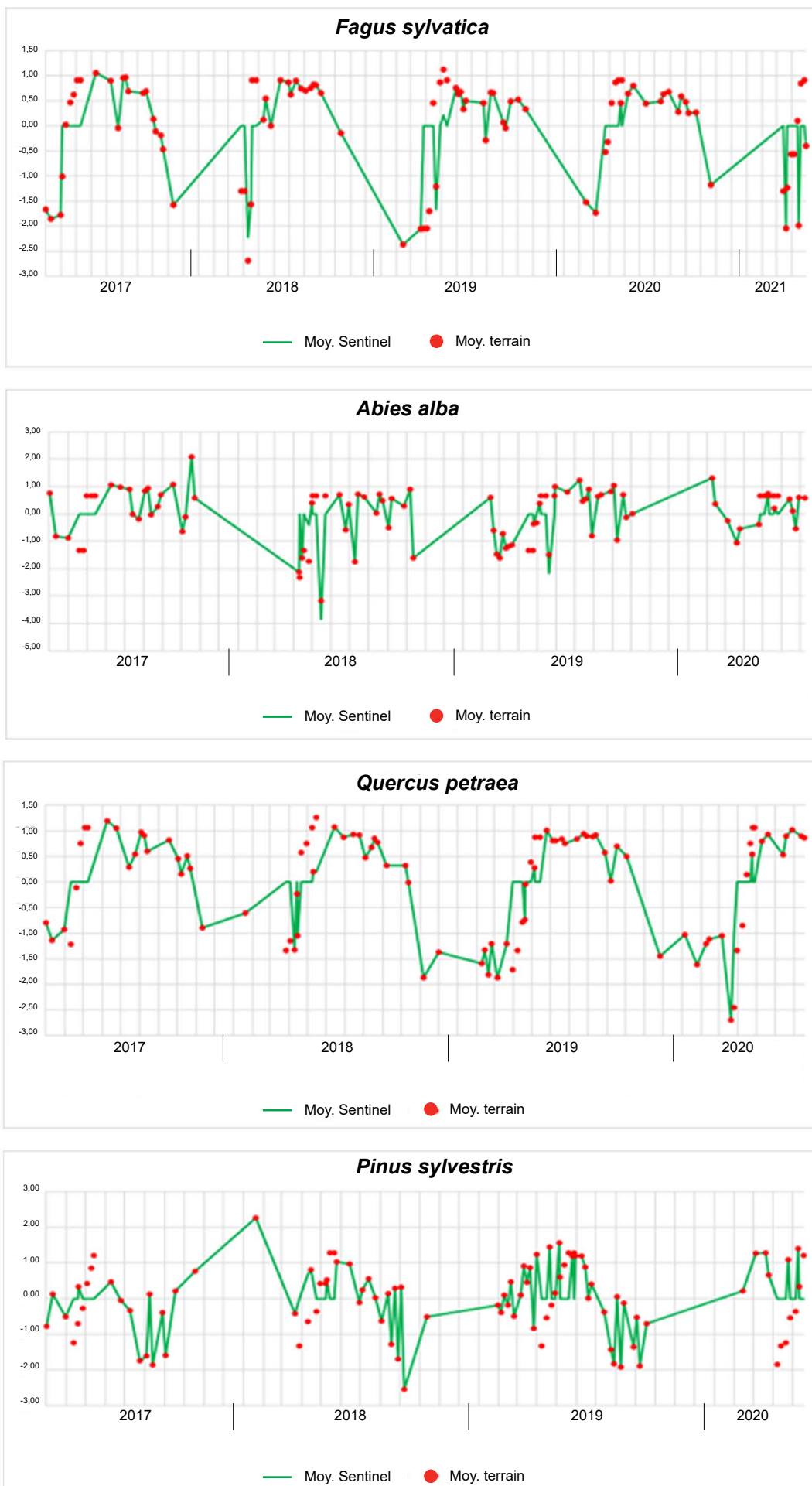


Figure 4. Graphique des moyennes sur le terrain et du NDVI moyen des parcelles 1

Les figures suivantes montrent les séries périodiques (2017-2021) pour NDVI, kNDVI, GNDVI, GNDVI, NDWI pour les trois parcelles pour *Fagus sylvatica*.

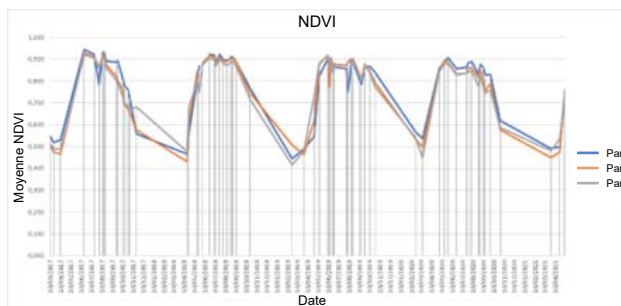


Figure 5. Série périodique NDVI pour *Fagus sylvatica*.

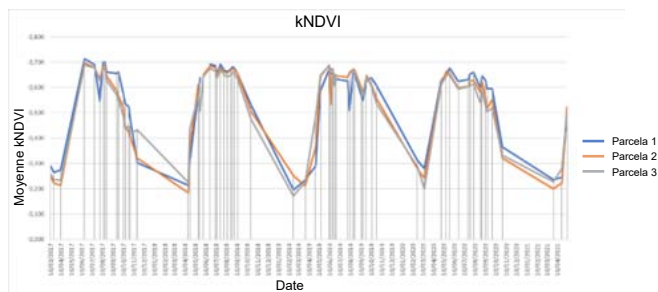


Figure 6. Série périodique kNDVI pour *Fagus sylvatica*.

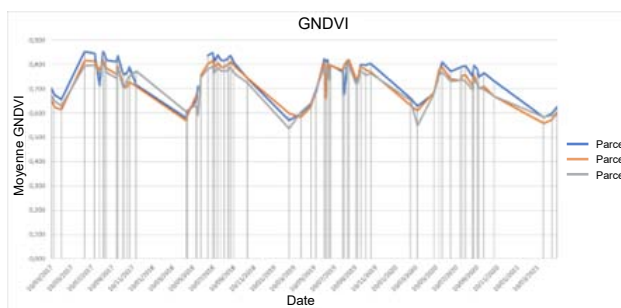


Figure 7. Série périodique GNDVI pour *Fagus sylvatica*.

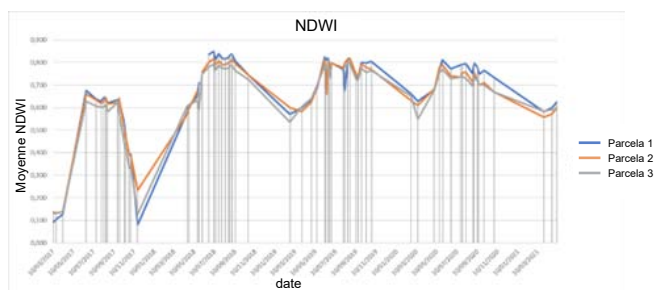


Figure 8. Série périodique NDWI pour *Fagus sylvatica*.

Les figures suivantes montrent les séries périodiques (2017-2021) pour NDVI, kNDVI, GNDVI, GNDVI, NDWI pour les trois parcelles pour *Abies alba*.

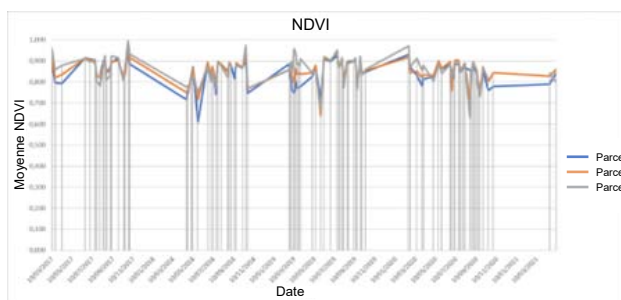


Figure 9. Série périodique NDVI pour *Abies alba*.

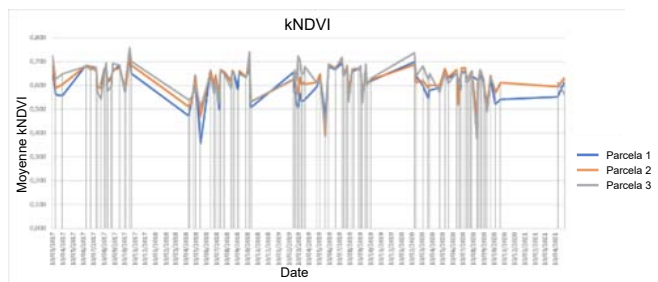


Figure 10. Série périodique kNDVI pour *Abies alba*.

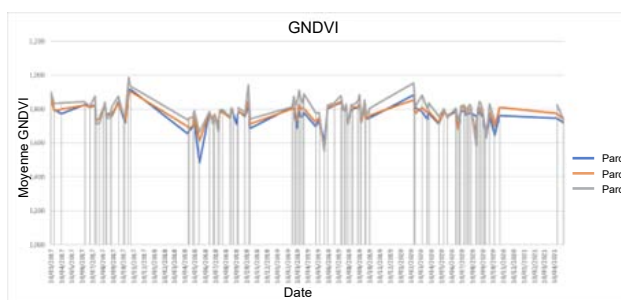


Figure 11. Série périodique GNDVI pour *Abies alba*.

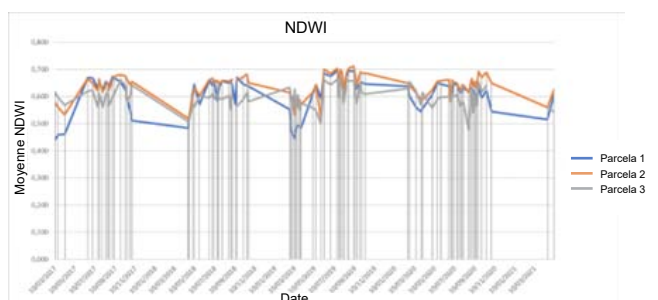


Figure 12. Série périodique NDWI pour *Abies alba*.

Les figures suivantes montrent les séries périodiques (2017-2021) pour NDVI, kNDVI, GNDVI, GNDVI, NDWI pour les trois parcelles pour *Quercus petraea*.

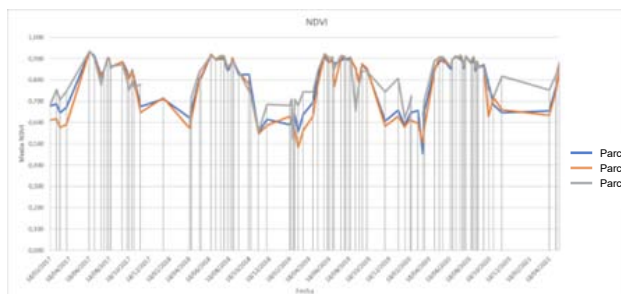


Figure 13. Série périodique NDVI pour *Quercus petraea*.

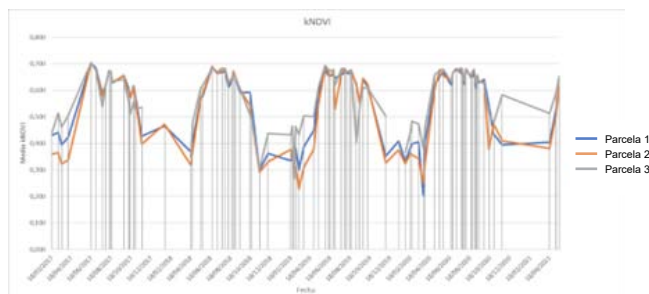


Figure 14. Série périodique kNDVI pour *Quercus petraea*.



Figure 15. Série périodique GNDVI pour *Quercus petraea*.

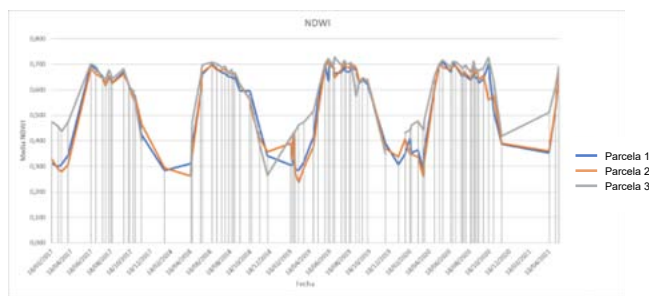


Figure 16. Série périodique NDWI pour *Quercus petraea*.

Les figures suivantes montrent les séries périodiques (2017-2021) pour NDVI, kNDVI, GNDVI, GNDVI, NDWI pour les trois parcelles pour *Pinus sylvestris*.



Figure 17. Série périodique NDVI pour *Pinus sylvestris*.

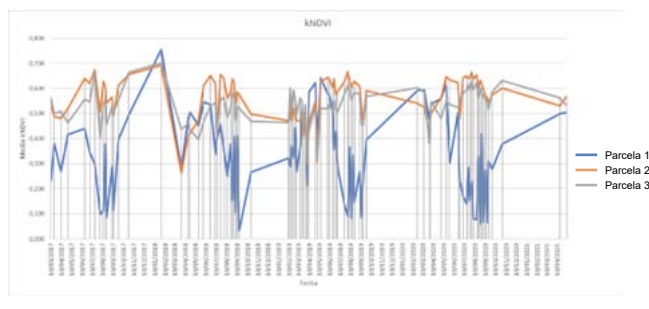


Figure 18. Série périodique kNDVI pour *Pinus sylvestris*.



Figure 19. Série périodique GNDVI pour *Pinus sylvestris*.

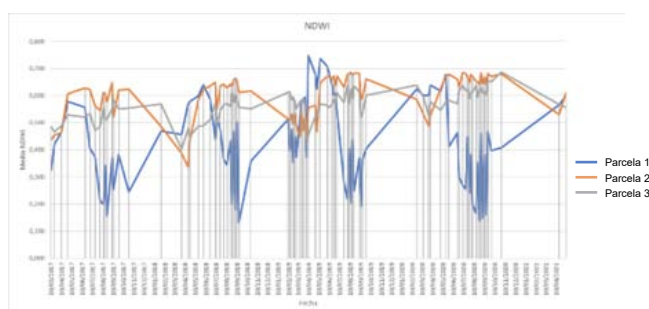


Figure 20. Série périodique NDWI pour *Pinus sylvestris*.

2. Corrélation des données de terrain avec les indices de végétation

Les tableaux ci-dessous montrent les valeurs de corrélation linéaire obtenues pour les espèces forestières, entre le degré de germination observé sur le terrain pour chaque parcelle et les valeurs IV issues des images Sentinel-2.

<i>Fagus sylvatica</i>		NDVI	kNDVI	GNDVI	NDWI
Placette 1	Moyenne	0,748	0,745	0,495	0,565
	Mode	0,754	0,751	0,480	0,616
	Moyenne pondérée	0,876	0,875	0,692	0,571
Placette 2	Moyenne	0,829	0,824	0,559	0,484
	Mode	0,821	0,815	0,517	0,492
	Moyenne pondérée	0,861	0,863	0,693	0,473
Placette 3	Moyenne	0,767	0,619	0,549	0,494
	Mode	0,713	0,563	0,437	0,455
	Moyenne pondérée	0,485	0,519	0,485	0,365
<i>Abies alba</i>		NDVI	kNDVI	GNDVI	NDWI
Placette 1	Moyenne	0,354	0,347	0,208	0,735
	Mode	0,377	0,371	0,216	0,754
	Moyenne pondérée	0,304	0,295	0,305	0,560
Placette 2	Moyenne	0,313	0,304	0,157	0,653
	Mode	0,329	0,320	0,171	0,652
	Moyenne pondérée	0,275	0,262	0,246	0,508
Placette 3	Moyenne	0,228	0,219	-0,256	0,508
	Mode	0,208	0,199	-0,064	0,477
	Moyenne pondérée	0,172	0,155	-0,078	0,502
<i>Quercus petraea</i>		NDVI	kNDVI	GNDVI	NDWI
Placette 1	Moyenne	0,786	0,791	0,375	0,821
	Mode	0,750	0,754	0,341	0,782
	Moyenne pondérée	0,897	0,899	0,619	0,935
Placette 2	Moyenne	0,838	0,840	0,589	0,832
	Mode	0,820	0,821	0,578	0,805
	Moyenne pondérée	0,903	0,906	0,708	0,904
Placette 3	Moyenne	0,734	0,738	0,468	0,733
	Mode	0,766	0,770	0,513	0,773
	Moyenne pondérée	0,786	0,785	0,596	0,731
<i>Pinus sylvestris</i>		NDVI	kNDVI	GNDVI	NDWI
Placette 1	Moyenne	0,1779	0,1782	0,1296	0,0381
	Mode	0,2019	0,2024	0,1659	0,0499
	Moyenne pondérée	0,2733	0,2749	0,1989	0,0709
Placette 2	Moyenne	0,6523	0,6520	0,6364	0,6334
	Mode	0,6685	0,6687	0,6586	0,6428
	Moyenne pondérée	0,3934	0,3935	0,4261	0,2944
Placette 3	Moyenne	0,3067	0,3083	0,1349	0,3699
	Mode	0,2770	0,2787	0,1002	0,3648
	Moyenne pondérée	0,2047	0,2064	0,0664	0,1604

Tableau 2. Corrélation des données d'observation de phénologie de chaque parcelle et différents indices de végétation.

Conclusions et lignes directrices futures

La télédétection apporte une solution au problème de l'accessibilité de certaines zones étudiées qui sont difficiles d'accès, voire inaccessibles. Elle apporte également une solution à l'observation subjective des données recueillies sur le terrain, réduisant ainsi l'erreur dans la collecte des données. Ainsi, il est intéressant d'étudier la portée possible des capteurs à distance dans l'analyse environnementale.

Selon les résultats obtenus dans ce travail, nous pouvons conclure que la télédétection optique permet le suivi de la phénologie, en particulier pour les espèces forestières à feuilles caduques, puisque les séries périodiques des espèces *Fagus sylvatica* et *Quercus petraea* présentent des cycles phénologiques accentués.

De même, des corrélations élevées ont été obtenues entre les données de terrain et les données obtenues des images Sentinel-2 pour ces espèces.

Au contraire, les espèces *Abies alba* et *Pinus sylvestris* ne présentent pas de séries périodiques accentuées ou de valeurs de corrélation élevées,

ce qui indique que ces images ne fournissent pas d'informations pertinentes pour ce type d'espèces de forêts à feuilles persistantes.

Il faut tenir compte du fait que la période sur laquelle nous travaillons est très courte, seulement 5 ans, de 2017 à 2021, et qu'il serait donc opportun de réaliser une étude sur une période plus étendue.

De même, de nombreuses données ont été perdues sur les images de télédétection optique, car il s'agit de zones fortement couvertes par les nuages, qui sont fortement influencées par les conditions atmosphériques.

Par conséquent, une future ligne directrice de recherche pourrait être l'apport d'informations complémentaires que les images radar peuvent nous offrir, car ce type d'information n'est pas affecté par les conditions atmosphériques, comme la nébulosité, permettant ainsi d'obtenir des informations à des dates où la télédétection optique ne peut fournir de données.



EXEMPLE D'UTILISATION DE LA TÉLÉDÉTECTION EN CATALOGNE : SURVEILLANCE DE LA VIGUEUR DE LA VÉGÉTATION (NDVI)



Auteurs

Teresa Cervera (Centre de la Propietat Forestal)

Miquel Fletas (Centre de la Propietat Forestal)



Introduction

Les données disponibles montrent que le changement climatique est un phénomène qui modifiera le paysage. L'adaptation au changement façonnera la distribution spatiale des espèces et les caractéristiques des peuplements. L'un des objectifs actuels des gestionnaires du territoire est de définir des stratégies de gestion pour s'adapter aux changements et réduire la vulnérabilité des forêts. L'un des meilleurs moyens d'analyser ce qui se passe sur Terre est d'obtenir une meilleure perspective depuis l'espace. Les technologies développées autour de la télédétection par imagerie satellitaire, ainsi que les données LIDAR, offrent des pistes de recherche et de diagnostic intéressantes dans le domaine forestier.

L'analyse réalisée dans cette étude s'inspire de la méthodologie d'analyse des peuplements forestiers réalisée dans la comarque du Maresme (Tardà et al. 2017 ; Tardà et Riera 2018), qui se base sur l'analyse d'images satellitaires pour localiser les zones où l'espace forestier présente une perte de vigueur ou une amélioration de celle-ci.

Cette étude se veut un exercice facile d'accès et d'utilisation pour analyser les données disponibles en Catalogne et fournir des informations pratiques pour la prise de décision en matière de gestion forestière. Le périmètre de l'étude est la zone correspondant au Plan Directeur Urbain (PDU) du Bassin de Rialb.

Méthodologie

La mission Copernicus de l'Agence spatiale européenne nous fournit des images multispectrales à une fréquence d'environ deux images par semaine grâce aux satellites qui composent la constellation Sentinel. Dans ce travail, nous avons utilisé des images capturées par les satellites Sentinel-2 qui enregistrent des images à l'aide d'un capteur multispectral. La combinaison des bandes nous permet d'élaborer différents indices qui facilitent l'analyse de la végétation existante. Le NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) a été utilisé dans cette étude. Cet indice dépend du niveau d'intensité de la réflectance et de la différence entre les bandes du proche infrarouge et celle de la couleur rouge :

$$\text{NDVI} = (\text{infrarouge proche} - \text{rouge}) / (\text{infrarouge proche} + \text{rouge})$$

Ce ratio indique l'état de vigueur de la végétation dans une fourchette allant de -1 (pas de végétation/eau-neige) à 1 (végétation très dense et vigoureuse). Cette étude a utilisé les données produites par l'Institut Cartogràfic i Geològic de Catalunya (ICGC), qui produit une image mensuelle à partir des données Sentinel-2 et la met à la disposition du public sur son site web. Cette image est soumise à disponibilité, dans la mesure où les images ne doivent pas contenir d'éléments atmosphériques excessifs qui gênent la vue du territoire.

Parallèlement aux images satellites, une autre source cartographique a été utilisée : le deuxième vol LIDAR de l'ICGC de 2016.

Afin d'identifier la couverture arborée, les données LIDAR sont traitées avec le programme de fusion pour produire un modèle numérique de végétation analysant la couverture et la hauteur dominante. Une image de 10 mètres de côté par pixel est produite, identifiant les zones avec un recouvrement de plus de 5% et une hauteur dominante de plus de 3 mètres au-dessus du niveau du sol. Pour déterminer la distribution des espèces forestières, nous utilisons la carte d'occupation du sol de la Catalogne (CREAF, version 4 2009). Les données ont été analysées pour 3 espèces : *Pinus nigra*, *Quercus ilex* et *Quercus faginea*.

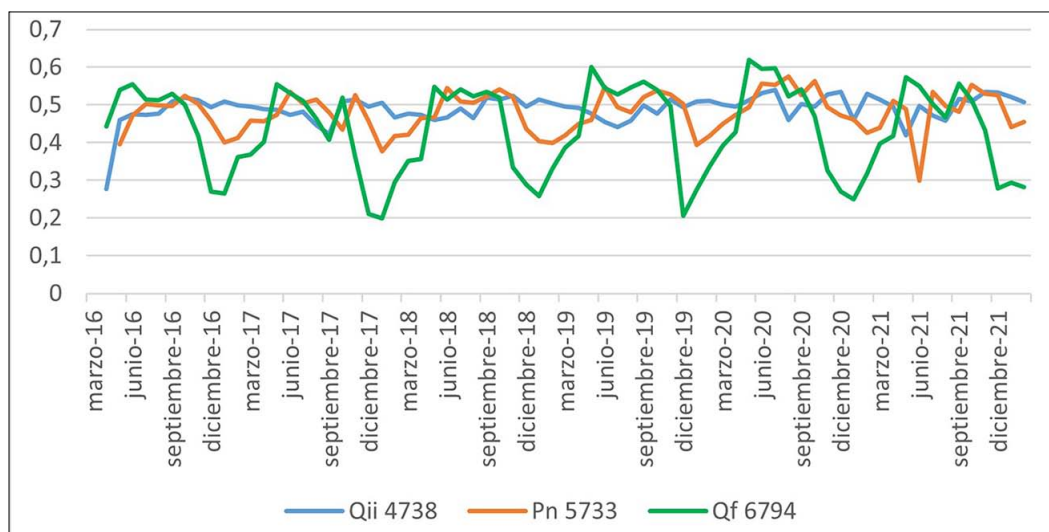
Deux propositions d'analyse différentes ont été faites qui fournissent des informations complémentaires pour interpréter l'évolution de la vigueur de la végétation :

1. Analyse statistique des séries temporelles de valeurs NDVI
2. Analyse graphique comparative des valeurs NDVI des mêmes mois pour différentes années.

Analyse de l'indice NDVI mensuel par espèce

Pour analyser les séries temporelles de données, les valeurs moyennes du NDVI pour chaque mois ont été calculées pour trois propriétés et trois espèces différentes sur une période de 5 ans entre mars 2016 et février 2022. Le graphique permet d'observer les différents cycles phénologiques des espèces et de comparer les valeurs des cycles annuels.

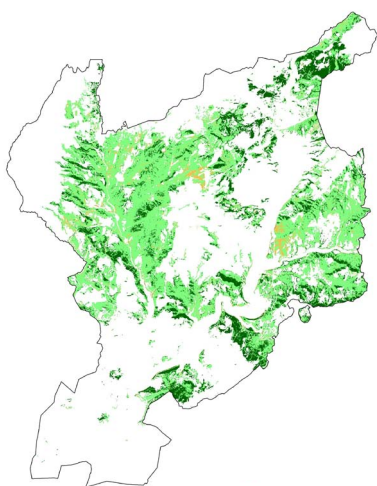
Evolution NDVI



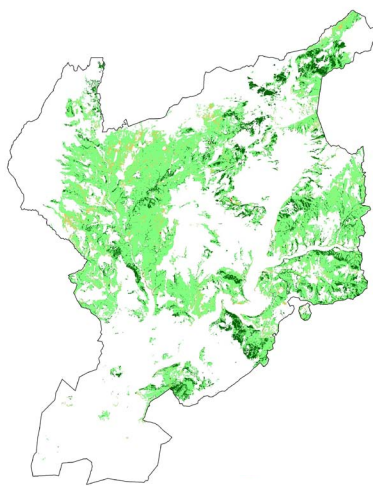
Comparaison graphique de l'indice NDVI

La deuxième approche méthodologique étudiée a été l'analyse et la comparaison graphique des valeurs NDVI au cours des mêmes mois et pour différentes années. L'objectif de l'analyse est d'identifier les zones de déclin ou d'amélioration de la vigueur des peuplements forestiers. Une cartographie a été réalisée pour *Pinus nigra* avec des valeurs NDVI pour les mois de mai. La représentation des informations se fait selon la palette de couleurs suivante qui permet de visualiser facilement la vigueur de la végétation :

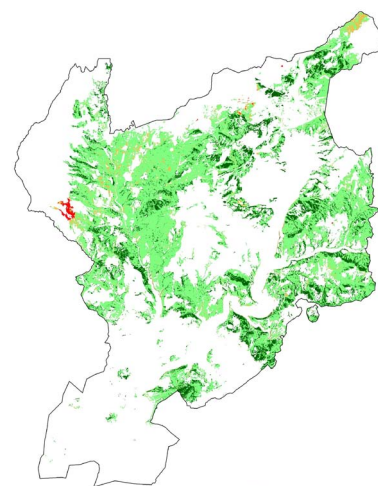
- $NDVI < 0$: correspondant à l'eau ou à des revêtements artificiels, sans couleur.
- $0 < NDVI < 0.2$: correspondant à un sol nu ou à une végétation morte, de couleur rouge.
- $0,2 < NDVI < 0,4$: correspondant à une végétation clairsemée ou peu vigoureuse, de couleur orange.
- $0,4 < NDVI < 0,6$: correspondant à une végétation abondante et vigoureuse, de couleur vert clair.
- $NDVI > 0,6$: correspondant à une végétation très dense et vigoureuse, de couleur vert foncé.



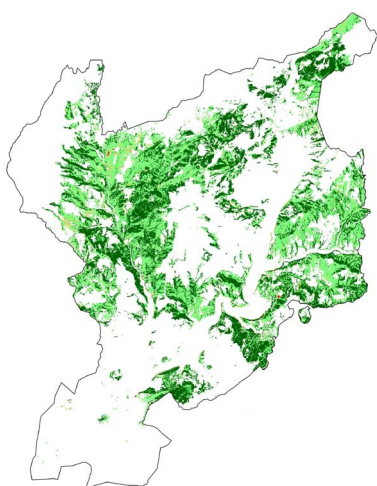
Pinus nigra NDVI Mai 2016.



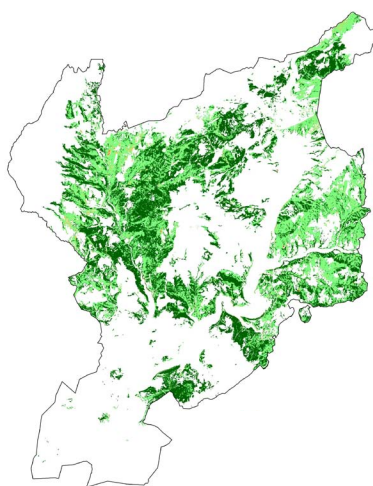
Pinus nigra NDVI Mai 2017.



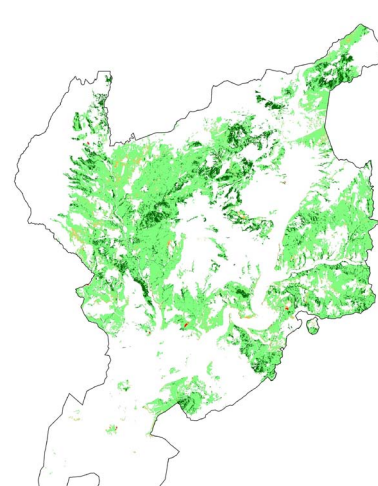
Pinus nigra NDVI Mai 2018.



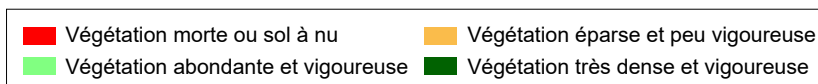
Pinus nigra NDVI Mai 2019.



Pinus nigra NDVI Mai 2020.



Pinus nigra NDVI. Mai 2021.



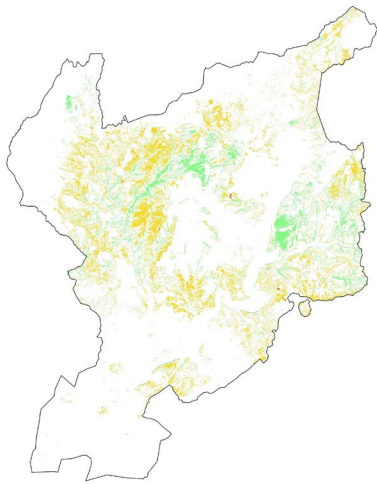
Guide pratique

Gestion pour l'adaptation des forêts pyrénéennes au changement climatique

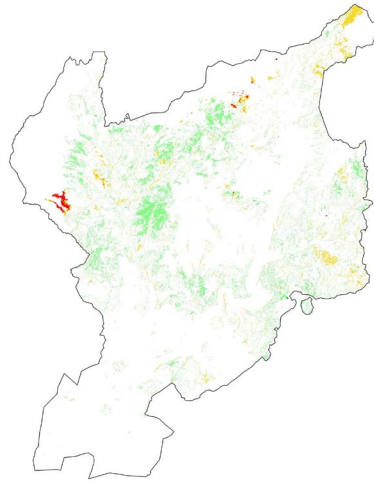
En soustrayant les valeurs NDVI de l'année précédente, nous pouvons faire une comparaison entre les mois de mai des différentes années et visualiser la perte ou l'amélioration de la vigueur.

Les informations sont représentées selon la palette de couleurs suivante :

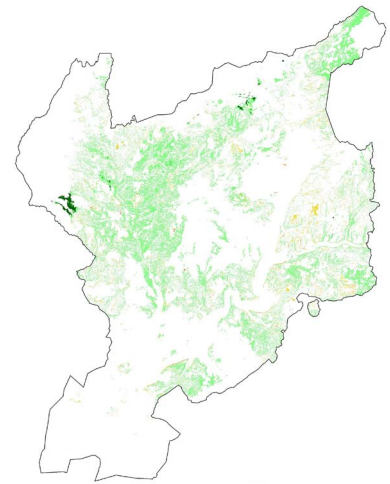
- -1 à -0,3 : Baisse de vigueur, couleur rouge.
- -0,3 à -0,05 : Baisse modérée de la vigueur, couleur orange.
- -0,05 à 0,05 : Inchangé, blanc.
- 0,05 à 0,3 : Augmentation modérée de la vigueur, couleur vert clair.
- 0,3 à 1 : Forte augmentation de la vigueur, de couleur vert foncé.



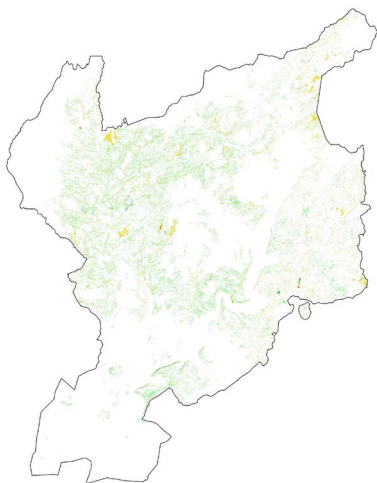
Pinus nigra NDVI. Mai 2017 - Mai 2016.



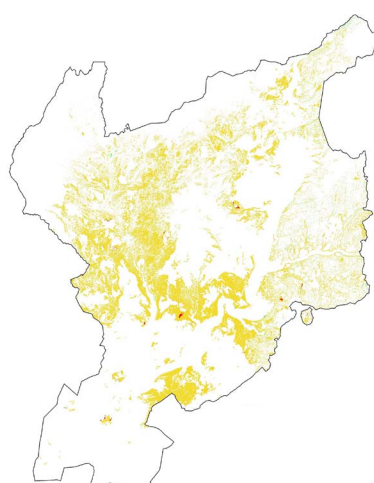
Pinus nigra NDVI. Mai 2018 - Mai 2017.



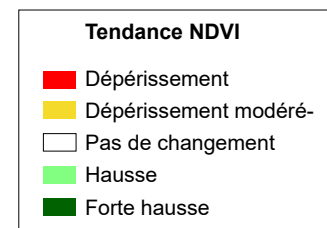
Pinus nigra NDVI. Mai 2019 - Mai 2018.



Pinus nigra NDVI. Mai 2020 - Mai 2019.



Pinus nigra NDVI. Juin 2021 - Mai 2020.



Discussions et conclusions

Les données des satellites Sentinel fournies par le programme Copernicus sont une source d'observation de la Terre avec un grand potentiel d'analyse qui est désormais une réalité.

Un certain nombre de facteurs pourraient être inclus dans l'analyse des données effectuée, ce qui enrichirait certainement les résultats. Les conditions morphologiques du terrain (altitude, orientation et gradient de pente), les données météorologiques, notamment la pluviométrie mensuelle, ainsi que les perturbations des peuplements forestiers (incendies, opérations forestières, dégâts, etc.) pourraient être prises en compte dans les analyses futures des données en fonction de l'échelle des travaux.

Il convient de noter que les résultats obtenus doivent être compris comme une première approche de ce type d'analyse et qu'ils ont été réalisés dans le but de connaître les données disponibles et les méthodologies utilisées.

Les résultats montrent des pistes d'analyse intéressantes qui permettent de mieux connaître le territoire. Dans un avenir proche, lorsque des séries chronologiques plus longues seront disponibles, il sera peut-être possible de trouver des lignes de tendance du comportement de la végétation utiles pour comprendre l'adaptation au changement climatique et prendre des décisions de gestion forestière pour atténuer ses effets.

Références

Alemany, M., Cervera, T., Fletas, M. (2020). *Les nouvelles technologies développées autour de la télédétection avec image satellite, conjointement avec données lidar, ouvrent de nouvelles voies d'investigation et de diagnostic pour le monde agroforestal*. Revista *Silvicultura* núm. 81. 18-20.





EXEMPLE D'UTILISATION DE LA TÉLÉDÉTECTION AU PAYS BASQUE : SUIVI DE LA DÉFOLIATION DANS LES PINERAIES



ACCLIMAFOR
OPCC



RÉPUBLIQUE
FRANÇAISE
Liberté
Égalité
Fraternité

FONDS NATIONAL
D'AMÉNAGEMENT
ET DE DÉVELOPPEMENT
DU TERRITOIRE
Massif des Pyrénées



PRÉFET
DE LA RÉGION
OCCITANIE
Liberté
Égalité
Fraternité



Occitanie
Pyrénées - Méditerranée

Interreg
POCTEFA



UNION EUROPÉENNE

Tout au long de l'année 2018, il y a eu une forte défoliation dans les pineraies basques, causée par des champignons et une situation de forte humidité ambiante.

En raison de ce problème, HAZI a mis en place un système d'évaluation des dommages et de suivi des peuplements touchés basé sur la télédétection à l'aide de Sentinel2. Il a pu être mis en place grâce aux projets LIFE HEALTHY FOREST (novembre 2015/avril 2019) et INNOBANDAS, "Projet innovant de sur les bandes rouges du pin en Cantabrie, Navarre et Pays Basque" (août 2018/septembre 2020).

L'objectif des deux projets était de déterminer le traitement le plus efficace et le plus durable pour lutter contre la maladie des bandes rouges du pin en évaluant les méthodes innovantes

utilisées dans d'autres pays ainsi que celles développées par les centres de recherche des régions participantes.

La partie HAZI correspondait à l'évaluation de la défoliation et à la mesure des résultats par télédétection au cours des dernières années.

La première carte de l'état de santé d'août 2018 a été réalisée dans le cadre du projet LIFE HEALTHY FOREST. Depuis la fin de ces deux projets, des cartes d'évaluation de la défoliation ont été réalisées pour le compte du vice-ministère de l'Agriculture, de la Pêche et de la Politique Alimentaire du gouvernement basque et ont été utilisées dans le cadre de ce projet POCTEFA ACCLIMAFOR, pour des aspects tels que la phénologie ou le suivi de l'état phytosanitaire des forêts naturelles.

DÉTECTION AUTOMATIQUE DES PINERAIES AFFECTÉES : EVOLUTION TEMPORELLE

Après la forte attaque de défoliation par bandes brunes de l'été 2018 dans les forêts de pins radiata, la bonne corrélation entre l'état de santé des pins et la valeur du NBR a pu être vérifiée sur le terrain. Par conséquent, les valeurs seuils de l'indice ont été utilisées pour classer toutes les forêts de pins adultes en fonction de leur degré d'état en août 2018.

L'indice NBR est directement lié à la gravité des dommages causés à la végétation ou à la perte d'humidité dans la partie supérieure de la couverture arborée. Selon la méthodologie appliquée, l'indice NBR prend des valeurs comprises entre -1 et 1 ou entre 0 et 20 000, une fourchette de valeurs qui met en relation l'énergie réfléchiée par la végétation avec l'énergie solaire incidente, en utilisant les bandes NIR (proche infrarouge, bande 8 de Sentinel2) et SWIR (infrarouge ondes courtes, bandes 10-11-12).

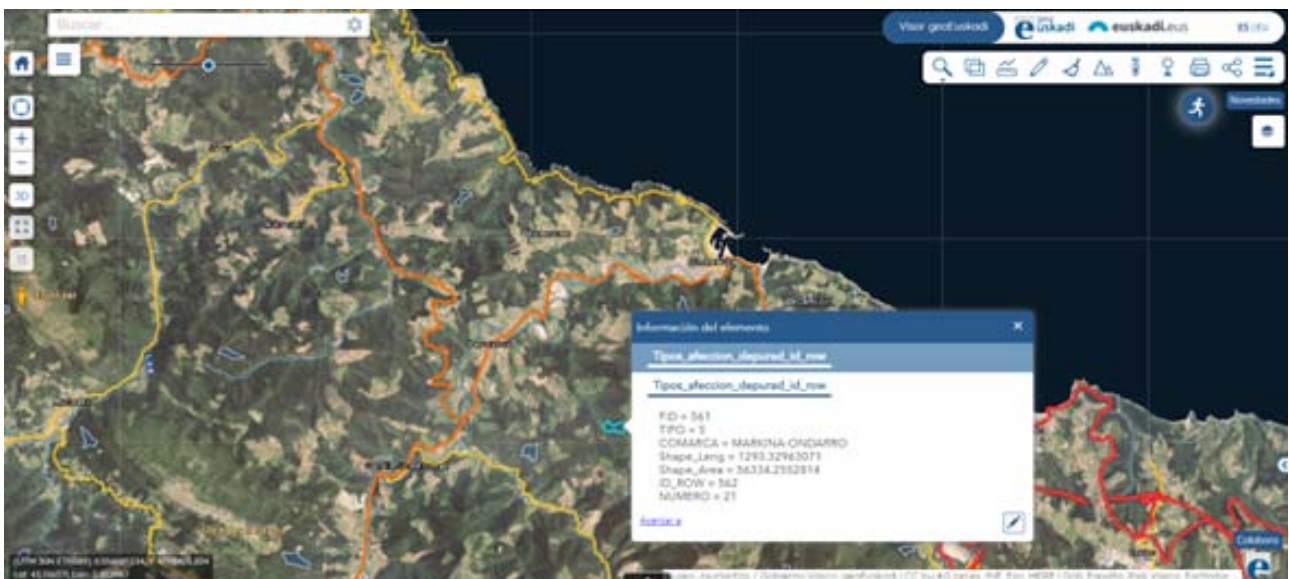
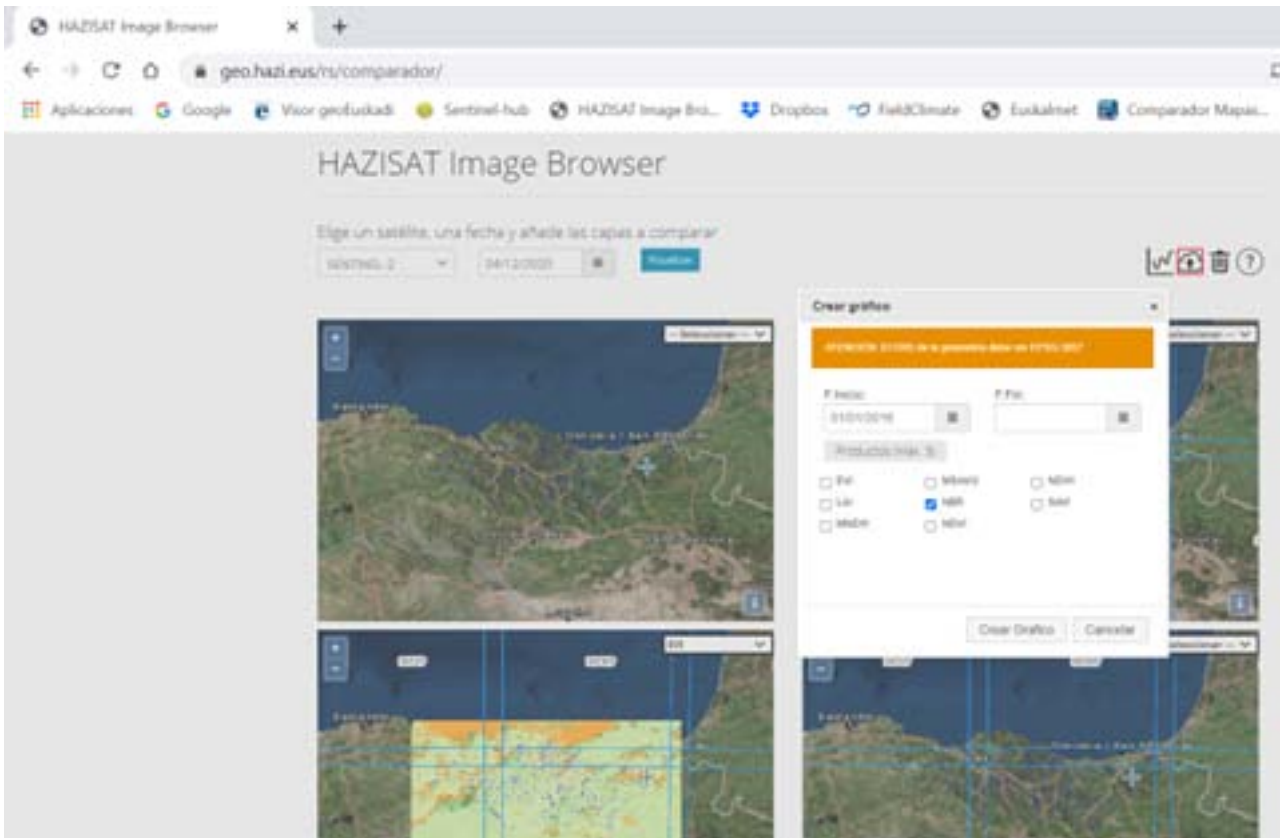
Guide pratique

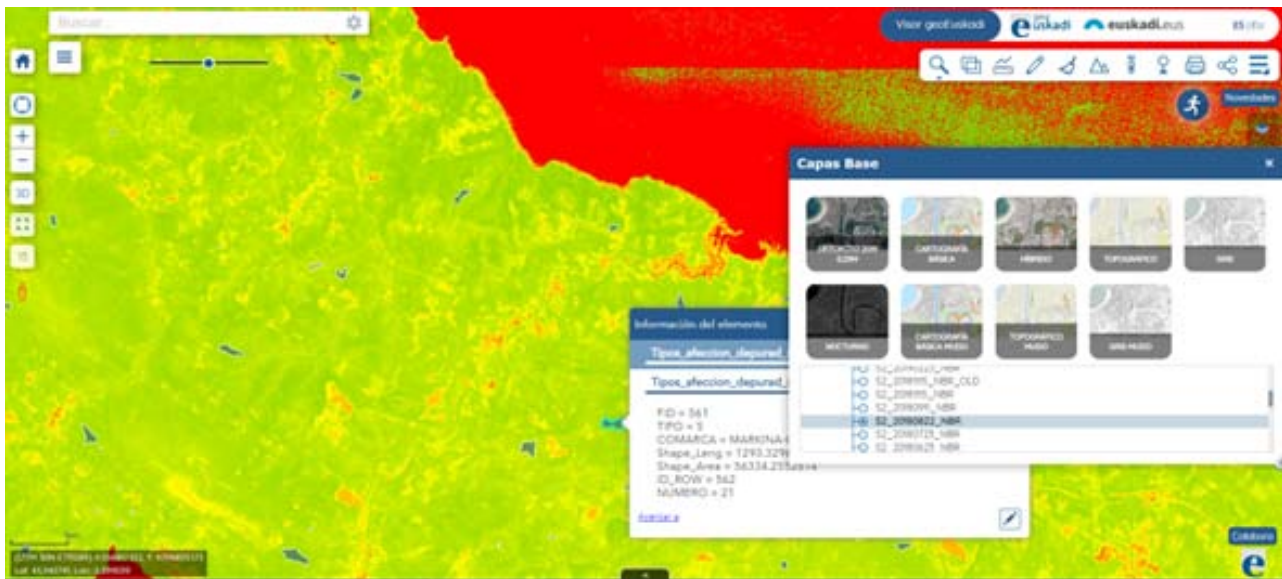
Gestion pour l'adaptation des forêts pyrénéennes au changement climatique

La méthode suivie depuis lors consiste à sélectionner des zones d'entraînement ou des parcelles représentatives, à la fois saines et affectées par des problèmes phytosanitaires, et à utiliser le HAZISAT Image Browser, créé par HAZI pour comparer les données et images

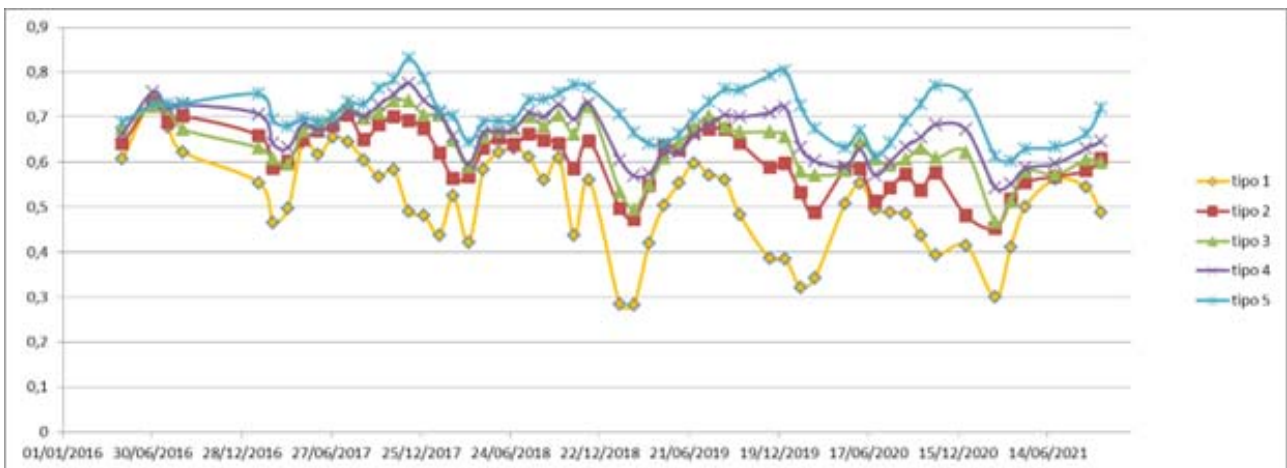
satellitaires des constellations Landsat et Sentinel : <https://geo.hazi.eu/rs/comparador/>.

Ce visualiseur fournit des images permettant de visualiser l'indice NBR de ces zones ou parcelles au cours des dernières années ainsi que les valeurs numériques du NBR.

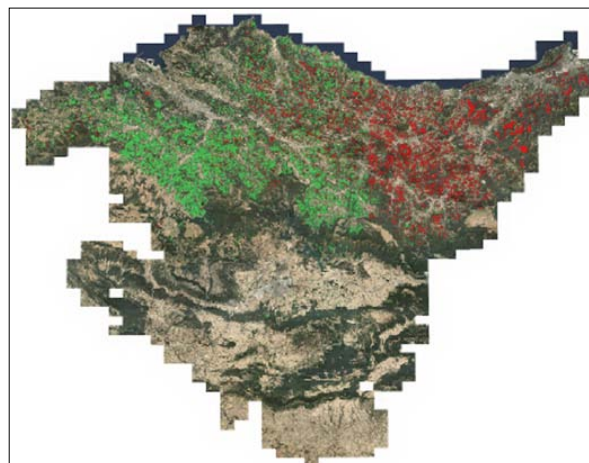




Exemple de zones d'entraînement sélectionnées dans le visualiseur GeoEuskadi, sur l'orthophoto de 2019 et sur la carte NBR d'août 2018.



Variation mensuelle du NBR dans les zones d'entraînement des pinèdes basques au cours des dernières années, suivant la classification en 5 types en fonction de la défoliation estimée. Le type 1 correspond à des pinèdes avec une défoliation maximale et le type 5 à des pinèdes saines.



Carte de l'état des pinèdes - octobre 2021 (rouge=type 1 ou défolié, vert= type 5 ou sain)

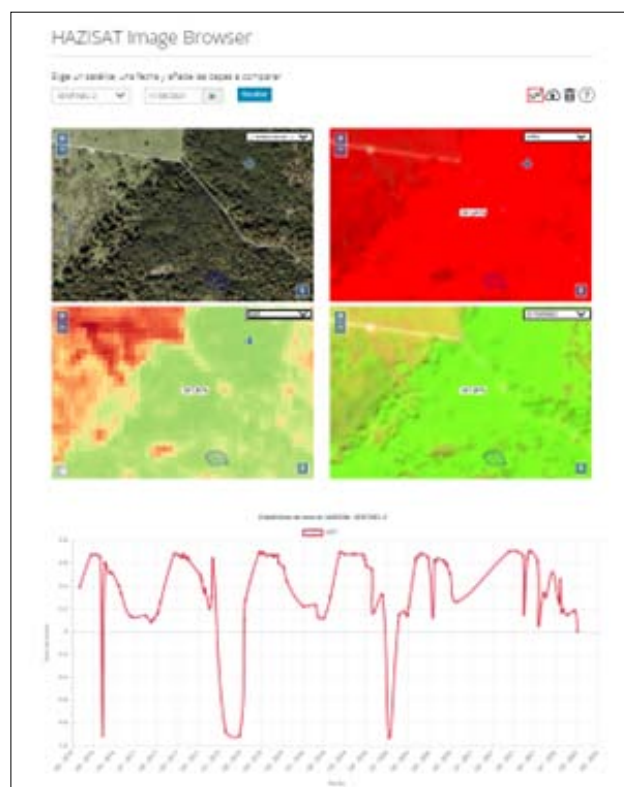
APPLICATION AU PROJET POCTEFA ACCLIMAFOR

L'indice NBR a prouvé son utilité, non seulement pour analyser la gravité des dégâts et l'évolution des zones brûlées, mais aussi dans l'analyse des défoliations causées par des agents phytosanitaires ou climatologiques (grêle, sécheresse...).

En analysant la tendance annuelle de l'indice NBR dans les peuplements de diverses espèces d'intérêt au Pays Basque, on constate que les valeurs maximales du NBR dans les forêts de pins adultes se produisent au cours du second semestre de l'année. On constate également que le maximum de NBR des feuillus est atteint en été, avant le début de la chute des feuilles en automne.

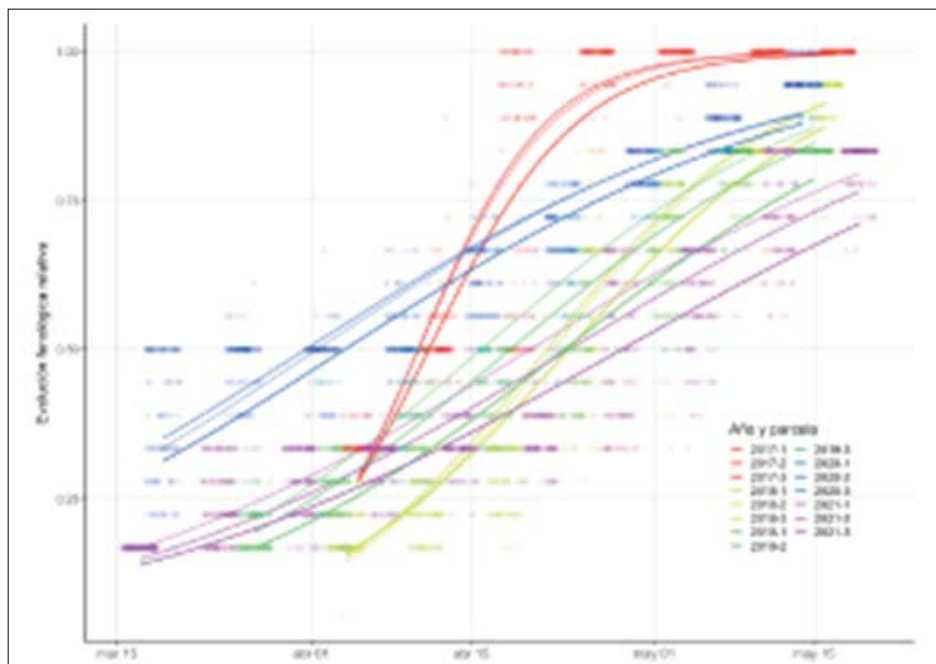
Ainsi, comme cela a été fait dans les pinèdes, le visualiseur permet de quantifier l'évolution temporelle du NBR (ou d'autres indices connexes) sur plusieurs années dans tous les types de forêts, afin de vérifier leur évolution phytosanitaire ou de détecter des problèmes dans leur état végétatif. Elle est déjà appliquée avec succès dans les forêts de hêtres asséchées, comme celle analysée dans la chaîne de montagnes d'Entzia dans le cadre de la section Gestion adaptative de ce projet.

De même, la surveillance du NBR peut être utilisée pour dater les périodes phénologiques de bourgeonnement et de chute des feuilles dans les forêts naturelles sur de grandes surfaces. En disposant des données de terrain de datation des stades phénologiques de 108 hêtres géolocalisés dans les 3 sous-parcelles d'Opakua depuis 2017, il est possible de corrélérer leur statut avec le NBR de pixel 10*10 m. Des travaux sont actuellement en cours pour automatiser ce calcul pour les grandes superficies forestières et pour minimiser le travail sur le terrain. Jusqu'à présent, les résultats sont prometteurs.



Evolución del NBR en la parcela 2 de hayedo de Entzia, afectada de puntisecado progresivo.

Il ne faut pas oublier que nous disposons également de données climatiques continues de la station Euskalmet d'Iturrieta, très proche d'Opakua, ce qui facilitera la corrélation entre les états phénologiques, les indices satellitaires ainsi que les températures et précipitations. Il est également possible de compter sur le visionneur GeoEuskadi du gouvernement basque (<https://www.geo.euskadi.eus/webgeo00-bisorea/es/x72aGoeuskadiWAR/index.jsp>), où sont stockées pour être consultés et téléchargés d'autres sources d'informations géographiques supplémentaires, tels que des vols LIDAR, des orthophotos annuelles et des images satellites sans nuages.

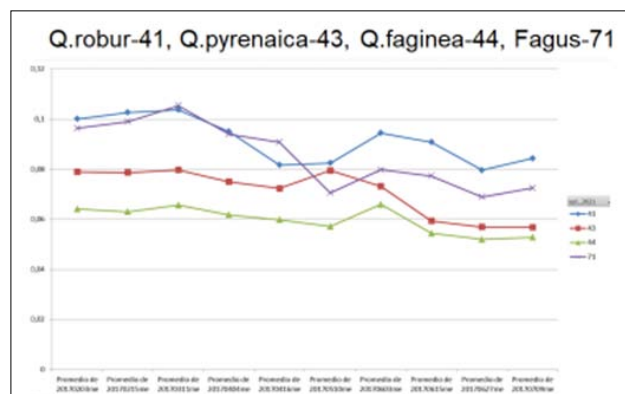


Évolution phénologique des hêtres dans les 3 sous-parcelles d'Opakua entre 2017 et 2021. Le maximum (niveau 1.00) est atteint lorsque 90% des bourgeons d'un hêtre ont atteint le stade phénologique 5 dans au moins 90% de la couverture.

DE NOUVELLES PISTES D'INTÉRÊT

Bien que Sentinel-2 soit une source d'information gratuite et facilement disponible, il présente néanmoins le problème que le calcul du NBR nécessite des images satellites de printemps exemptes de nuages et de brouillard, ce qui est difficile au Pays basque. Par conséquent, d'autres sources accessibles et complémentaires doivent être utilisées.

Le radar Sentinel-1 pourrait être une bonne solution, car il est indépendant des conditions météorologiques et fournit des indices corrélés aux stades phénologiques. HAZI travaille actuellement sur cette question et obtient également de bons résultats, en attendant l'achèvement de divers travaux en cours, dans un avenir proche.



Évolution de la rétrodiffusion VH moyenne d'un seul satellite Sentinel-1 tout au long de 2017 au Pays basque. La diminution de la VH s'observe dans les forêts d'espèces à feuilles caduques qui bourgeonnent vers mars-avril, comme le chêne et le hêtre, par opposition aux végétaux à feuillage marcescent, aux chênes faginéés et aux chênes tauzin, qui vivent dans des forêts plus froides et bourgeonnent généralement à partir de mai.





CHANGEMENTS DANS LA REPARTITION DES ESPÈCES ET CAPACITÉ D'ADAPTATION.



RÉPUBLIQUE
FRANÇAISE
*Liberté
Égalité
Fraternité*

FONDS NATIONAL
D'AMÉNAGEMENT
ET DE DÉVELOPPEMENT
DU TERRITOIRE
Massif des Pyrénées



PRÉFET
DE LA RÉGION
OCCITANIE
*Liberté
Égalité
Fraternité*



Interreg
POCTEFA



La répartition d'une espèce végétale est déterminée par l'existence dans le temps de conditions écologiques minimales qui lui permettent de persister. Chaque espèce arborée occupe une niche écologique spécifique, définie notamment par les conditions pédologiques, thermiques et hydriques. Ceci explique, entre autres, l'étagement des espèces forestières en milieu montagnard.

Lorsque les conditions minimales ne sont pas réunies, la persistance de l'espèce dépend de sa capacité à migrer vers des lieux favorables. Même si les espèces sont capables de migrer pour suivre leur niche écologique, dans le contexte actuel d'accélération des changements climatiques, on peut douter de la capacité des arbres - immobiles et longévifs - à se disperser au même rythme que l'évolution du climat, en particulier dans les paysages fragmentés.

Les espèces végétales s'adaptent également aux changements écologiques en modifiant leurs caractéristiques morphologiques et physiologiques. Cette variabilité est connue sous le nom de plasticité. Cependant, dans certains cas, il est actuellement impossible de savoir si la plasticité des espèces principales ou secondaires d'un peuplement sera suffisante pour couvrir la variation du changement climatique dans de bonnes conditions physiologiques.

Bien que nous n'ayons pas de réponses claires à toutes ces questions, les forestiers pyrénéens sont confrontés chaque jour à des décisions de gestion forestière. C'est pourquoi des outils d'aide et des connaissances théoriques et opérationnelles sont développés en collaboration avec les chercheurs. Voici un aperçu des outils actuellement déployés dans les Pyrénées et qui peuvent d'ores et déjà être utilisés par les gestionnaires forestiers.

Cartographie

a) Au sein des Pyrénées

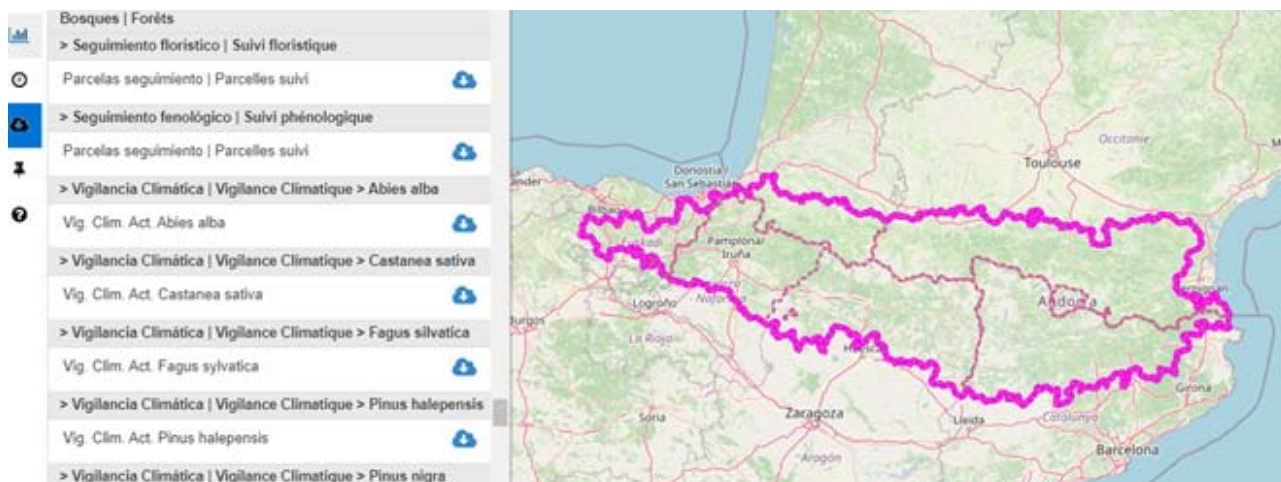
Elles constituent un outil précieux, permettant d'accéder rapidement à une connaissance géolocalisée et multifactorielle.

Dans le cadre du projet CANOPEE, des cartes de vigilance climatique relative ont été construites. Elles ont une résolution fine (50m) et permettent de mettre en exergue les zones susceptibles d'être ou devenir les plus sensibles au changement climatique pour une

espèce donnée ; et, à contrario, d'identifier les zones qui lui seraient plus favorables.

Ces cartes sont disponibles sur le géoportail de l'OPCC : <https://www.opcc-ctp.org/fr/geoportal>.

D'autres cartes, non dédiées au secteur forestier mais d'intérêt y figurent (données météorologiques, floristiques notamment).



Localisation des cartes de vigilance climatique sur le géoportail de l'OPCC.

b) En France

Le site ClimEssences www.climesences.fr, proposé par le RMT AFORCE, met à disposition une série d'aides pour le choix des essences (espèces forestières arborées) dans le contexte du changement climatique.

Les fonctionnalités proposées permettent d'améliorer sa propre connaissance sur les essences, de comprendre les évolutions du climat selon différents scénarios de changements climatiques, à l'échelle d'une région forestière et d'outiller la réflexion sur le choix des essences en climat changeant.

Deux approches complémentaires sont proposées : des fiches espèces regroupant les connaissances disponibles sur les essences d'après 37 critères, et des modélisations cartographiques de la compatibilité climatique des essences à l'aide du modèle IKS.

c) En Espagne

Atlas d'adéquation topoclimatique (échelle de 0 à 1) pour différentes espèces forestières ligneuses. Source : Ninyerola et al : Ninyerola et al. (2010). Ninyerola M., Serra-Díaz J.M., Lloret F. 2010. Atlas de l'adéquation topo-climatique des espèces ligneuses. Serveur de l'Atlas de idoneidad topoclimática de leñosas - Spaineo Directory.

Il existe également des informations à l'échelle régionale.

Par exemple, **en Navarre**, la vulnérabilité des systèmes forestiers est identifiée et cartographiée. <https://lifnadapta.navarra.es/es/accion-c3.1> et **au Pays basque**, grâce au visualiseur du projet LIFE Healthy Forest <https://geo1.hazi.eus/healthy-forest/index.html>, la classification des territoires forestiers du Pays basque peut être visualisée selon trois classes d'aptitude au pin sylvestre : élevée, moyenne et faible.

En Catalogne, une cartographie spécifique a été développée pour certaines formations, telles que les forêts subhumides méditerranéennes (LIFE Mixforchange) ou les forêts de chênes-lièges en Catalogne (LIFE SUBER).

En Navarre, les principales menaces, risques et impacts potentiels dus au changement climatique sont en cours d'évaluation pour différentes espèces. Les données et documents officiels, une fois publiés, sont disponibles dans le répertoire de documents suivant : <https://tinyurl.com/y2h1sv3o>.





LE PIN SYLVESTRE : AUTOÉCOLOGIE ET COMPATIBILITÉ CLIMATIQUE ACTUELLE ET FUTURE. LES PROBLÈMES DE RÉGÉNÉRATION



RÉPUBLIQUE
FRANÇAISE
*Liberté
Égalité
Fraternité*

FONDS NATIONAL
D'AMÉNAGEMENT
ET DE DÉVELOPPEMENT
DU TERRITOIRE
Massif des Pyrénées



PRÉFET
DE LA RÉGION
OCCITANIE
*Liberté
Égalité
Fraternité*



Interreg
POCTEFA



Auteurs :

Thomas Villiers (ONF)
Matthieu Brousse (ONF)

Grands principes

L'aire naturelle du pin sylvestre (*Pinus sylvestris*) est très vaste puisqu'elle s'étend du sud de l'Espagne à la Mandchourie, en Chine. C'est une espèce forestière rustique qui peut se contenter de sols pauvres, peu profonds et acides. Le pin sylvestre est tolérant à une large gamme de climats et de conditions de sols. Il ne craint ni le froid, ni les gelées printanières mais redoute les neiges lourdes et les vents violents. Il occupe principalement l'étage montagnard et jusqu'à 2000m. où, en mélange avec le pin crochets (*Pinus uncinata*), il peut s'hybrider et former le pin de Bouget (*Pinus x rhaetica Brügger*).

Dans les Pyrénées, la déprise agricole au XX^{ème} siècle a largement provoqué son extension dans les milieux agricoles abandonnés en tant qu'espèce

pionnière et de pleine lumière. Le pin sylvestre est une essence importante en Catalogne, en Navarre, en Aragon et en Andorre. En revanche, il est moins important dans le Pays basque espagnol et dans les Pyrénées françaises, sauf localement dans les Pyrénées catalanes côté français.

Dans les Pyrénées sans influence méditerranéenne, le pin sylvestre a tendance à être plus présent dans les versants de l'étage montagnard exposés au sud. A l'inverse, lorsque l'influence méditerranéenne est présente, le pin sylvestre préfère les versants frais, alors qu'en versant exposé au sud, des dépérissements commencent à apparaître, surtout dans les zones de basses altitudes, chaudes et sèches.



Régénération de pin sylvestre, arpens coupe de régénération par éclaircies successives uniformes en Catalogne.

Guide pratique

Gestion pour l'adaptation des forêts pyrénéennes au changement climatique

Les données autécologiques du pin sylvestre et répartition actuelle

Pyrénées avec influence méditerranéenne (Catalogne, Aragon, partiellement Navarre, Pyrénées-Orientales, partiellement Aude)

		Altitude																	
Exposition		100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	1100	1200	1300	1400	1500	1600	1700	1800
Fraîche																			
Chaude																			

Pluviosité annuelle													
	100	300	500	700	900	1100	1300	1500	1700	1900	2100	2300	2500

Pluviosité estivale(juin-juillet-août)													
	10	30	50	70	90	110	130	150	170	190	210	230	250 +

Pyrénées sans influence méditerranéenne (Pays basque, partiellement Navarre, Pyrénées-Atlantiques, Hautes-Pyrénées, Haute-Garonne, Ariège, partiellement Aude)

		Altitude																	
Exposition		100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	1100	1200	1300	1400	1500	1600	1700	1800
Fraîche																			
Chaude																			

Pluviosité annuelle													
	100	300	500	700	900	1100	1300	1500	1700	1900	2100	2300	2500

Pluviosité estivale(juin-juillet-août)													
	10	30	50	70	90	110	130	150	170	190	210	230	250 +

Exposition							
Nord	Nord-Est	Est	Sud-Est	Sud	Sud-O.	Ouest	Nord-O.
			*	*	*		

Vent	
Faible	Fort

Températures limites supportées	
T° min.	T° max.
-40° C	40° C

* En zonas más secas (influencia mediterránea)

Topographie						
Plateau	Sommet	Haut de versant	Replat	Milieu de versant	Bas de versant	Vallon

Pente		
Faible ou nulle	Moy.	Forte
0-30%	30-70%	>70%

Profondeur de sol											
10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120 +

Charge en caillou	
Faible (<30%)	Forte (>30%)

Texture								
S	SL	SA	L	LS	LA	A	AL	AS

Argile lourde

Roche mère						
Schiste	Gneiss	Granite	Grès	Calcaire	Calc. Actif.	Marne

Roche-mère fissurée	
Oui	Non

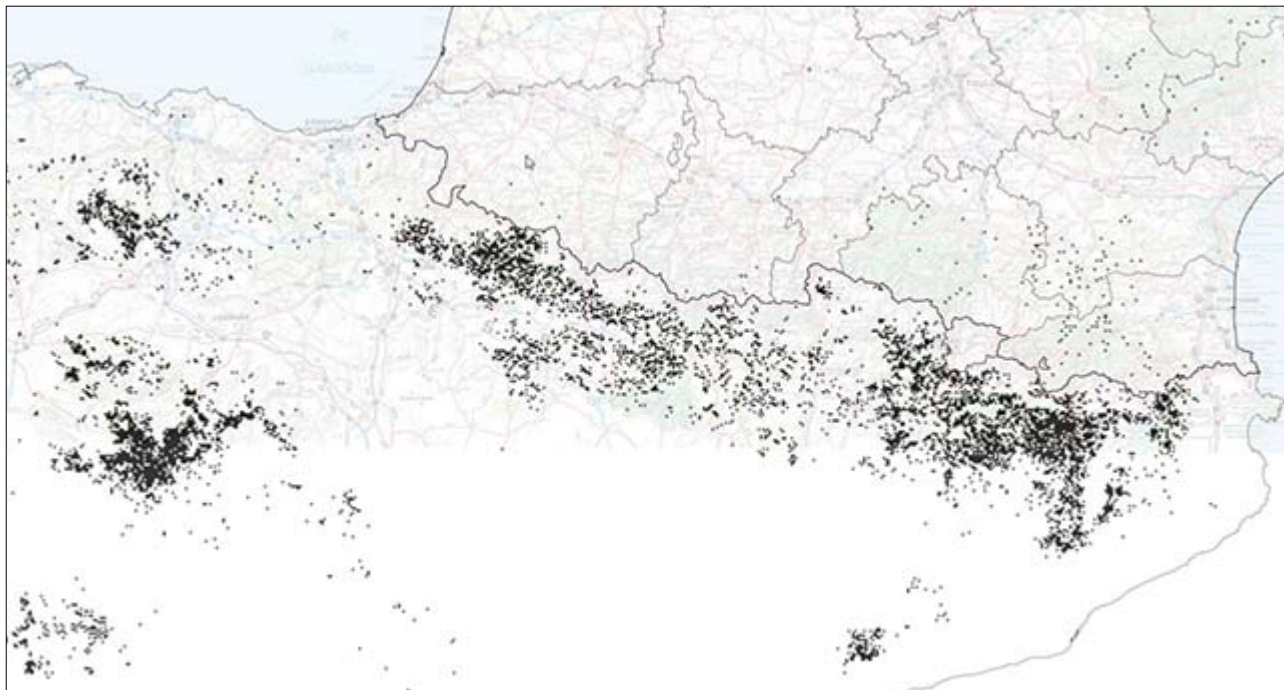
Compacidad			
Sol meuble	Sol peu compact	Sol compact	Sol cimenté, alliotique, induré

Hydromorphie	
Temporaire	Permanente

Hyper secs XXX						
Très secs XX						
Secs X						
Assez secs x						
Bien drainés m						
Frais f						
Assez humides h						
Humides x						
Mouillés, inondés H						
Humidité ↑	Très acides AA	Acides A	Assez acides aa	Faibl. acides a	neutres n	Calcaires b
Acidité →						

- Zones favorables pour le facteur
- Zones limites pour le facteur, mais pouvant être compensées par d'autres facteurs dans leur optimum (vert)
- Zones critiques pour le facteur ne pouvant pas être compensées
- Zones de données non connues ou hors limites pour la zone étudiée.

La répartition actuelle du pin sylvestre sur les Pyrénées d'après les inventaires forestiers européens est la suivante :



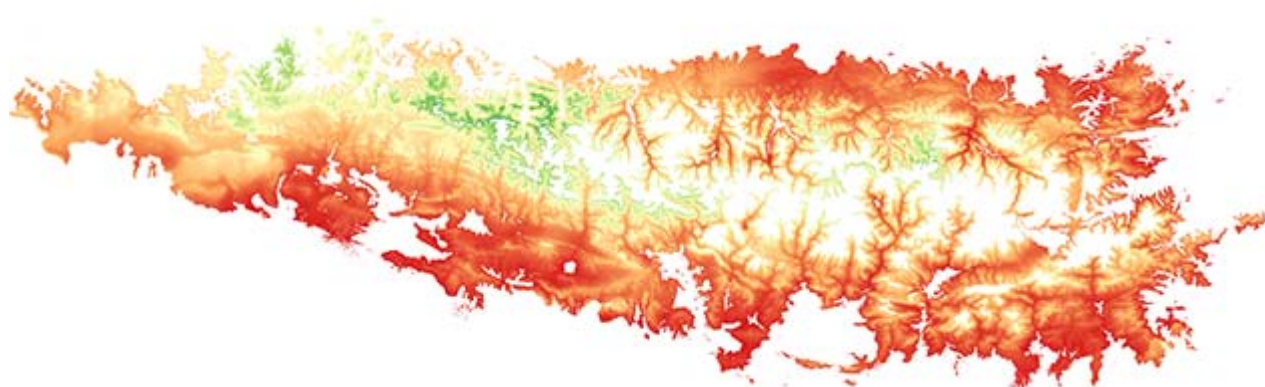
Compatibilité climatique actuelle et future

Pour évaluer la compatibilité actuelle et future du pin sylvestre dans une région donnée, il existe différentes cartes produites à différentes échelles. A l'échelle régionale, sont disponibles :

- **A l'échelle pyrénéenne**

Dans le cadre du projet POCTEFA CANOPEE, une série de cartes de surveillance actuelle et future a été élaborée, disponible sur le géoportail de l'OPCC: <https://www.opcc-ctp.org/fr/geoportail>.

Les cartes de Vigilance Climatique Actuelle (VCA) ont été obtenue par modélisation statistique (lien entre répartition actuelle des peuplements où l'espèce est majoritaire, et moyennes climatiques 1981-2010, selon les informations disponibles), chaque carte de Vigilance Climatique Actuelle (VCA) propose une surveillance plus attentive là où l'espèce est en climat plus chaud ou plus sec que dans l'ensemble de son aire pyrénéenne. Compte tenu des variations et incertitudes climatiques, cette carte ne garantit ni la survie de l'espèce, ni la survenue de dépérissements.



Les cartes de **Vigilance Climatique Relative (VCR)** peuvent également être téléchargées à partir du géoportail. Ces cartes sont obtenues en calculant le bilan hydrique climatique (P-ETP) qui est ensuite recalculé (variable centrée réduite) pour disposer de toute la gamme des couleurs relatives. Les cartes de vigilance climatique relative permettent les mêmes utilisations que les cartes de vigilance climatique actuelles mais intègrent mieux les effets de pente liés à la prise en compte de l'évapotranspiration. Comme dans le cas des cartes de VCA, elles sont une indication et pas une garantie de survie ni de dépérissement.

- En France, le site **ClimEssences**, www.climessences.fr, proposé par le RMT AFORCE, met à disposition une série d'aides pour le choix des essences (espèces forestières arborées) dans le contexte du changement climatique.

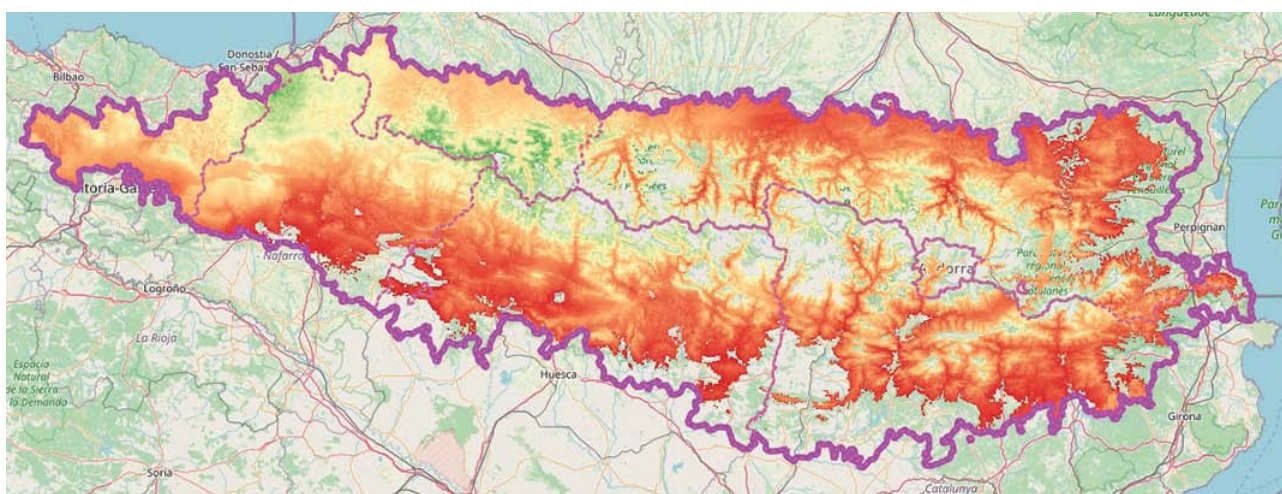
Les fonctionnalités proposées permettent d'améliorer sa connaissance des essences, de comprendre les évolutions du climat selon différents scénarios de changements climatiques, à l'échelle d'une région forestière et d'outiller la réflexion sur le choix des essences en climat changeant. Les cartes de compatibilité sur Climessences sont produites à partir d'un croisement entre carte de la répartition actuelle de l'essence en Europe et explication de la répartition actuelle en fonction de 3 paramètres :

- **DHYa** : cumul sur un an des déficits hydriques mensuels P-ETP, correspond au facteur limitant manque d'eau,
- **TMIa** : Température minimale annuelle, correspond au facteur limitant excès de froid,
- **SDJa**: Somme des degrés jours annuelle, correspond au facteur limitant manque de chaleur.

Explication de la légende des cartes :

- En vert les zones compatibles pour un seuil à 97,5 % des points de présence,
- En jaune les zones compatibles pour un seuil à 99 % des points de présence, mais incompatibles pour un seuil à 97,5 % des points de présence,
- En rouge les zones incompatibles pour un seuil à 99 % des points de présence (et donc également incompatibles pour un seuil à 97,5 % des points de présence).

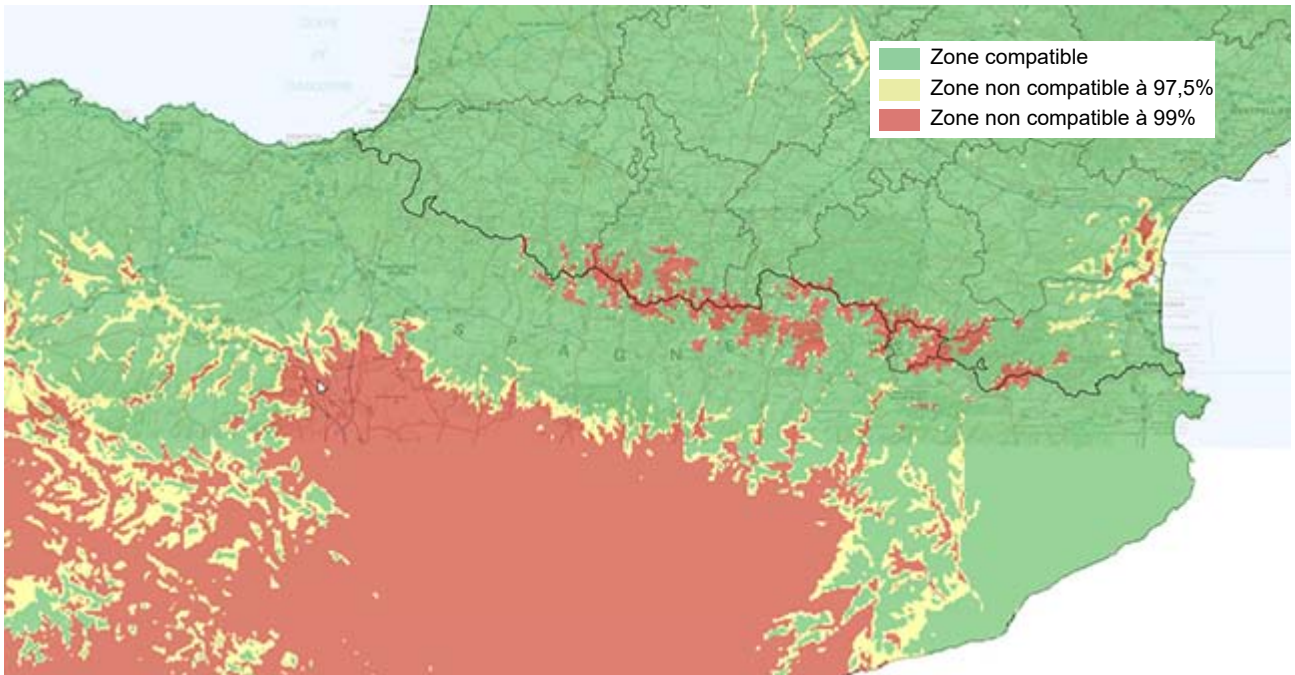
Pour plus d'explications sur les cartes de compatibilité et leur signification, se référer au site web www.climessences.fr onglet « compatibilités climatiques / cartes de compatibilité multi-seuils ».



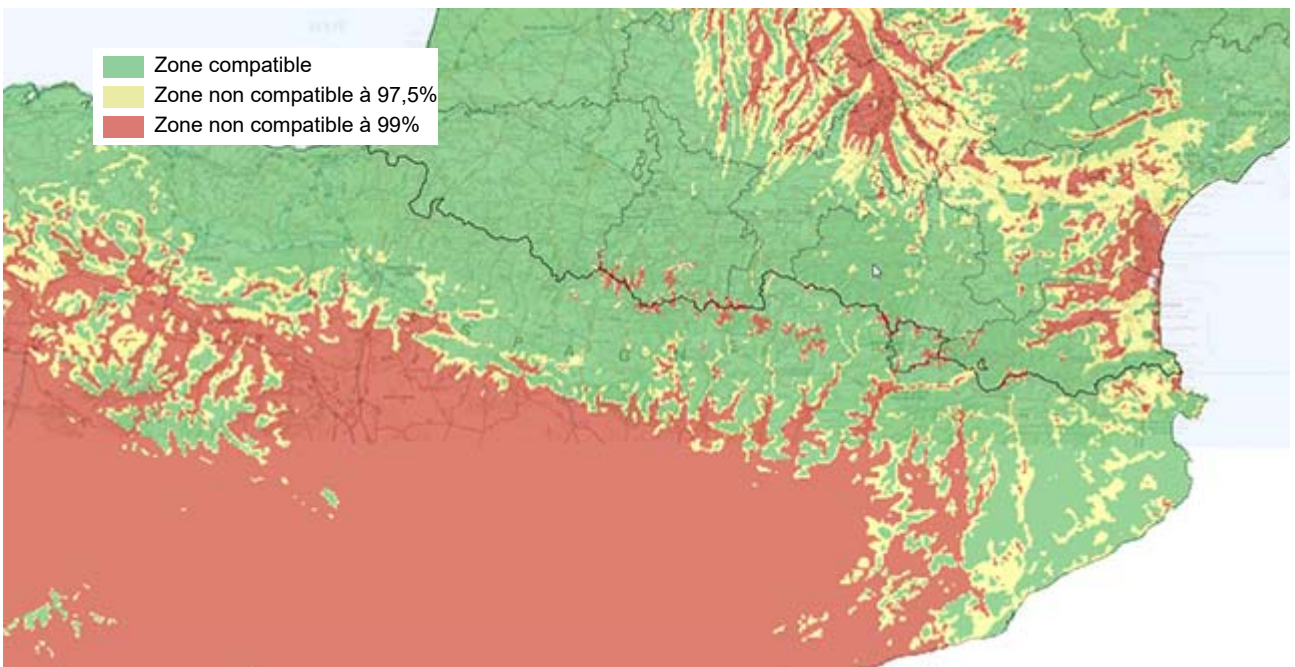
Carte de vigilance Climatique Relative (VCR) pour le Pin sylvestre, disponible sur le géoportail de l'OPCC. Auteur: Philippe Dreyfuss (ONF).

Guide pratique

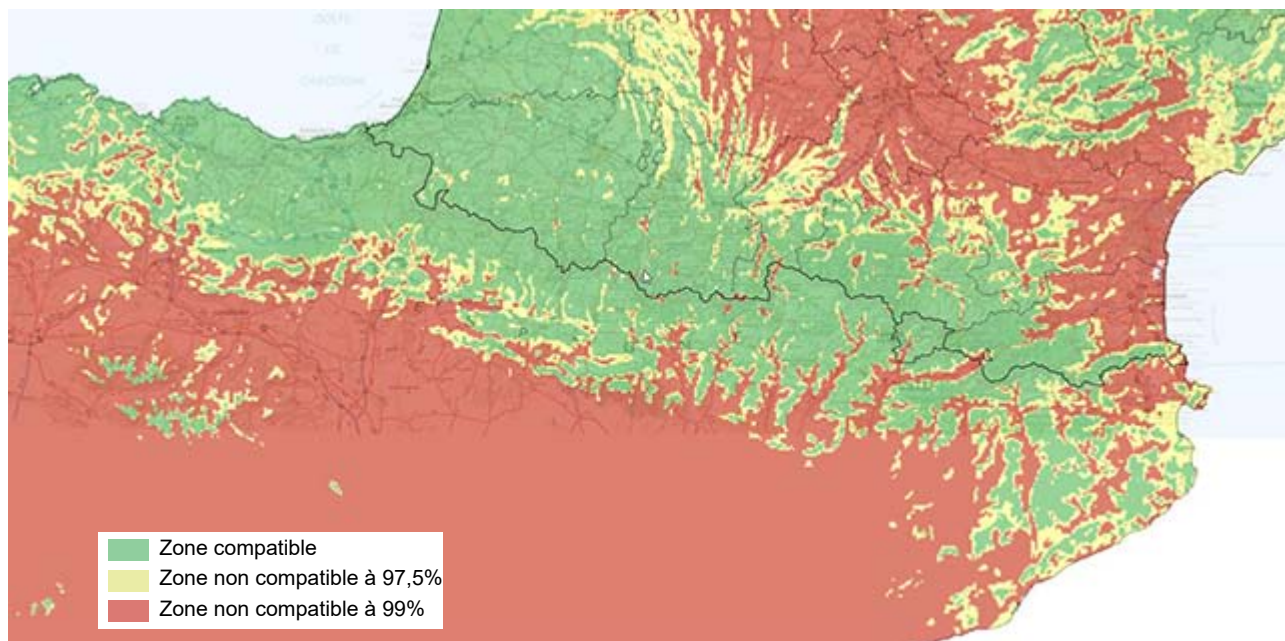
Gestion pour l'adaptation des forêts pyrénéennes au changement climatique



Carte de compatibilité climatique actuelle du pin sylvestre selon ClimEssences.



Carte de compatibilité climatique du pin sylvestre. Prévision 2070 (scénario RCP 4.5, moyenne des modèles) selon ClimEssences.



Carte de compatibilité climatique du pin sylvestre. Prévision 2070 (scénario RCP 8.5, moyenne des modèles) selon ClimEssences.

- **En Espagne: Atlas de compatibilidad topoclimática** (échelle de 0 à 1), développé par le CREAf pour plusieurs essences ligneuses fo-

restières, disponible ici : <https://www.opengis.grumets.cat/ldoneitatPI/Index.html> (voir fiche 3.4, avec un exemple en Catalogne).

Les problèmes de régénération du pin sylvestre. Adaptation des coupes.

La régénération du pin sylvestre est parfois difficile, comme souvent pour les pins. Pour obtenir une bonne régénération, en plus d'une bonne connaissance autécologique de l'espèce, il est nécessaire de bien adapter le mode de régénération en fonction des enjeux. Le choix adapté du mode de régénération est important car si la régénération n'arrive pas, il est très difficile de continuer une régénération de pins. Généralement, moins les sols sont épais et plus il est facile de régénérer un peuplement de pins.

Les différents modes de régénération pouvant être utilisés

Quelque soit le mode de régénération, et comme préalable à chaque intervention, il est nécessaire d'installer des cloisonnements d'exploitation pour protéger les sols et les semis.

- **La régénération par coupe d'ensemencement :**

C'est le mode de régénération qui semble le plus efficace pour assurer l'obtention de la régénération naturelle compte tenu des évolutions climatiques.

Pour limiter le risque d'absence de régénération, il peut être décidé, selon le contexte, de commencer par une coupe d'ensemencement qui provoque l'arrivée de semis avec la mise en lumière importante. Si les semis ne viennent pas rapidement, le fait d'avoir laissé des semenciers permet d'attendre l'arrivée de la régénération avec la possibilité de production de graines par les semenciers restants.

Le prélèvement de la coupe d'ensemencement doit être fort pour apporter une lumière au sol suffisamment importante. Le fait de laisser des semenciers n'assure pas à 100% la régénération, mais elle limite le risque d'échec. Une fois la régénération obtenue, les derniers semenciers sont récoltés.

- **La régénération par trouées :**

En futaie régulière :

Ce mode de régénération s'appuie sur le caractère héliophile du pin sylvestre. La coupe correspond à plusieurs trouées ouvertes dans le peuplement et espacées entre elles. Chaque trouée est de surface inférieure à 0,5 ha, tous les pins y sont coupés. En revanche, entre les trouées, aucun arbre n'est coupé. Dès que les trouées sont acquises en régénération, d'autres trouées sont ouvertes dans le peuplement. Le rythme des coupes est donc généralement rapide pour obtenir un peuplement régulier si la régénération vient rapidement.

En futaie irrégulière :

Le principe est le même mais le rythme des rotations est plus lent car il s'agit souvent d'une gestion extensive où les écarts d'âge entre trouées ne sont pas gênants.

- **La régénération par coupe rase :**

Cette technique de régénération a été très utilisée dans le passé pour le pin sylvestre, mais elle montre ses limites actuellement avec les difficultés de régénération observées probablement en lien avec le changement climatique. La technique de régénération par coupe rase consiste à couper tous les arbres sur un peuplement donné, ce qui peut bien convenir à la régénération du pin en tant qu'essence de lumière. En revanche, si la régénération ne vient pas rapidement, il sera très difficile d'avoir une régénération sur le long terme, et une plantation sera nécessaire si on souhaite obtenir un couvert boisé.

Possibilité de maintenir des arbres semenciers en sur-réserves après la fin de la régénération

Lorsque la régénération tarde à s'installer et que l'on ne souhaite pas réaliser des travaux pour favoriser les semis ou pour planter, il est possible de laisser des semenciers en sur-réserves sur le long terme pour continuer à amener des graines et régénérer progressivement le peuplement. Pour ces arbres il y a deux possibilités ensuite :

- Soit ils sont coupés bien plus tard lors des prochains passages en coupe, lorsque les semis seront devenus des arbres,

- Soit ils sont laissés comme arbres pour la biodiversité jusqu'à leur sénescence (vigilance pour le risque incendie).

La densité de sur-réserves laissées se situe autour de 20 à 30 semenciers par ha.

Réalisation de travaux préalables pour favoriser l'arrivée et la préservation de la régénération

Pour les peuplements de bonne qualité, ou pour les peuplements avec une exigence de régénération complète (ex : protection contre les risques naturels), des travaux peuvent être nécessaires pour favoriser l'arrivée des semis. Le pin sylvestre est une espèce qui se régénère plus facilement sur sol nu ou peu épais. Deux grands types de travaux peuvent être réalisés au préalable :

Coupe de relevé de couvert :

En présence d'un sous étage notamment feuillu, celui-ci doit être idéalement récolté au préalable soit sous forme de coupe (vente), soit sous forme de travaux (recépage). Des îlots feuillus préexistants peuvent être maintenus pour favoriser le mélange pour la protection de la biodiversité et faciliter la résilience par rapport aux attaques sanitaires sur les pins.

Travail du sol :

L'objectif est de travailler le sol pour le mettre partiellement à nu, sous forme de travaux ou lors de l'exploitation :

- Le travail du sol peut s'effectuer par un crochetage mécanisé,
- Mais, le travail du sol peut aussi être effectué lors de l'exploitation en grattant le sol avec les houppiers tirés au sol. Par exemple, la régénération par trouées permet de concentrer l'abattage sur une petite surface sans avoir à faire de travaux ensuite. L'exploitation entraîne un travail superficiel du sol avec le débardage des grumes. Le travail du sol par le biais de l'exploitation forestière n'est pas aussi efficace qu'un crochetage mécanisé, mais il est « gratuit ».

Il n'est pas nécessaire de travailler le sol en plein, pour des raisons de coûts mais aussi pour des raisons d'expression de la dynamique naturelle. Pour cela, des travaux par placeaux sont possibles de part et d'autre de cloisonnements utilisés par les engins forestiers (par exemple : mini-pelle).

Le principe de la gestion extensive

Pour les stations de moins bonne fertilité, il n'est pas envisageable de mener une sylviculture classique de production avec de gros investissements. L'option est alors de mener une gestion extensive basée sur l'opportunité économique des coupes, en limitant les investissements, mais tout en assurant le renouvellement des peuplements.

En gestion extensive, le forestier abandonne toute possibilité d'amélioration des peuplements. La sylviculture est centrée sur la récolte.

En revanche, il est important que la récolte ne compromette pas le renouvellement des peuplements, en laissant la possibilité d'une régénération longue.

Le principe de la gestion extensive se matérialise par le maintien de semenciers sur le long terme après la coupe de récolte :

- soit de façon diffuse dans le peuplement,
- soit en espaçant dans le temps les coupes par trouées en laissant le temps de régénérer ces trouées (principe de la régénération par trouées en futaie irrégulière).

Plus d'informations sur le pin sylvestre

Fiches 3.2, 3.3 et 3.4, avec des informations sur les principales menaces et défis de gestion respectivement au Pays Basque, en Navarre et en Catalogne.



LE PIN SYLVESTRE (*PINUS SYLVESTRIS*) AU PAYS BASQUE: AUTOÉCOLOGIE, MENACES ET STRATÉGIES D'ADAPTATION



RÉPUBLIQUE
FRANÇAISE
Liberté
Égalité
Fraternité

FONDS NATIONAL
D'AMÉNAGEMENT
ET DE DÉVELOPPEMENT
DU TERRITOIRE
Massif des Pyrénées



PRÉFET
DE LA RÉGION
OCCITANIE
Liberté
Égalité
Fraternité



Interreg
POCTEFA



Le pin sylvestre (*Pinus sylvestris*) est la principale espèce de conifères d'origine naturelle au Pays basque. La carte forestière 2020 attribue 17 468 ha à cette espèce, dont 14 000 ha sous forme de peuplements naturels et quelque 3 400 ha sous forme de reboisements. Après le pin radiata, le pin sylvestre est le plus important conifère du Pays basque.

Ses principaux peuplements sont situés dans le territoire d'Alava, à l'extrême sud-ouest du Pays basque. Les meilleures pinèdes basques sont situées dans la chaîne de montagnes d'Artzena, qui fait partie du grand massif de pins sylvestres des montagnes calcaires à la source du fleuve Ebre.

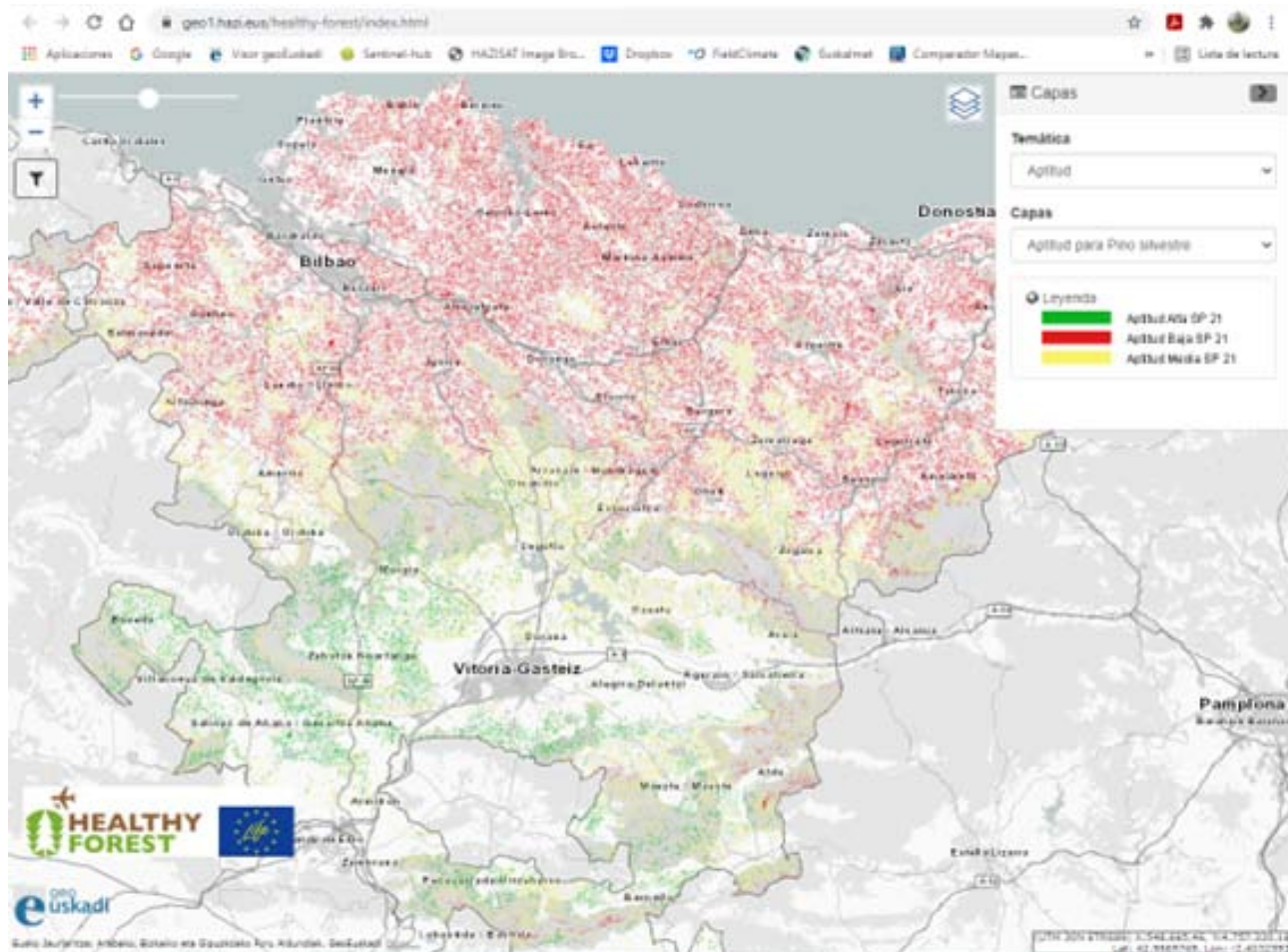
Autécologie

Dans le cadre du projet LIFE Healthy Forest (2015/2019), HAZI a réalisé plusieurs modèles d'aptitude pour les 25 principales espèces forestières du Pays basque afin de compléter la cartographie générée dans ce projet et de guider les propriétaires et gestionnaires forestiers basques dans les futurs reboisements. Ces modèles mathématiques quantitatifs étaient basés sur la croissance annuelle des peuplements forestiers basques, en fonction de la différence des hauteurs dominantes LiDAR entre 2012 et 2017. Les variables physiques indépendantes qui ont permis la construction de ces modèles quantitatifs et les valeurs les plus élevées pour le pin sylvestre sont les suivantes :

- Altitude moyenne de chaque placette de 1 ha (m): 753 m
- Pente moyenne (%): 28%
- Orientation: Sud
- Précipitation moyenne annuelle : 870,31 mm
- Température moyenne annuelle : 10,67 °C
- Coordonnée UTM X (m): 501287
- Coordonnée UTM Y (m): 4747978

Guide pratique

Gestion pour l'adaptation des forêts pyrénéennes au changement climatique



Dans le geo-portail du projet LIFE Healthy Forest <https://geo1.hazi.eus/healthy-forest/index.html>, il est possible de visualiser la classification des territoires forestiers du Pays basque selon 3 classes d'aptitude pour le pin sylvestre : **Haute**, **Moyenne** et **Basse** :

Le modèle a également permis de localiser les zones non recommandées pour le pin sylvestre au Pays basque, étant donné qu'aucun inventaire n'a

été réalisé sur les parcelles avec présence de cette espèce dans lesquels ces seuils sont dépassés :

- Non recommandé si l'altitude dépasse 1 325 m.
- Non recommandé si les précipitations annuelles moyennes sont inférieures à 570 mm.
- Non recommandé si la température moyenne annuelle est inférieure à 8,31°C.

Principales menaces

Les principaux problèmes de dépérissement des peuplements de pin sylvestre au Pays Basque sont liés à la sécheresse estivale et aux dégâts causés par les chenilles processionnaires (*Thaumetopoea pityocampa*), bien qu'il ne soit pas possible de parler de dégâts fréquents ou généralisés, mais plutôt de dégâts spécifiques et localisés dans les zones limites de distribution de ce pin.

Le projet LIFE "Healthy Forest" mentionné ci-dessus a permis d'échantillonner la présence de divers champignons défoliateurs dans les forêts de pins sylvestres du Pays basque, bien que leur présence ne soit pas liée à l'apparition de dommages. On note la présence de *Dothistroma septosporum* et *Lecanostica acicola*, mais pas de *Dothistroma pini* ni de *Fusarium circinatum*.

Guide pratique

Gestion pour l'adaptation des forêts pyrénéennes au changement climatique

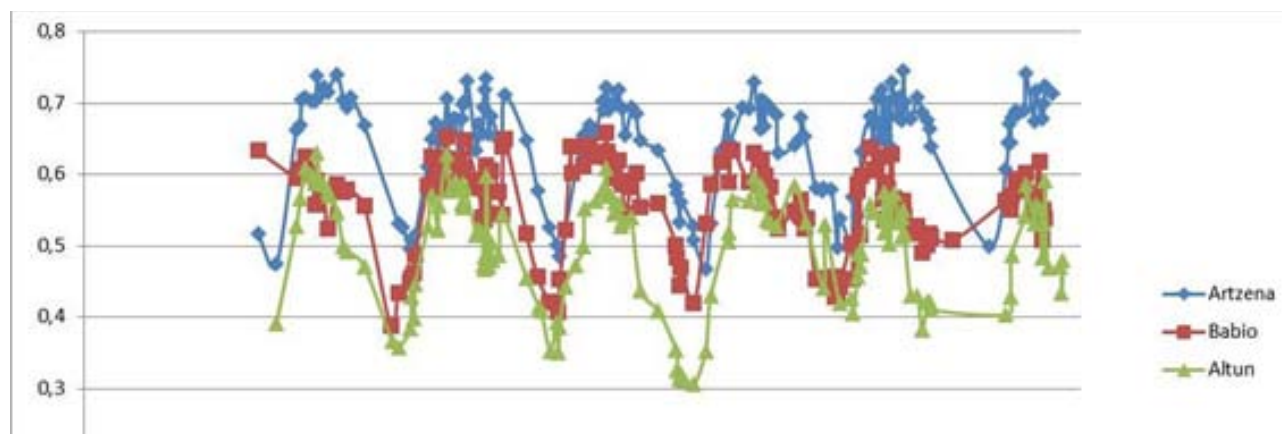
L'espèce a été classée comme modérément sensible à la maladie des bandes rouges. Contrairement à d'autres espèces telles que *Pinus nigra* et *Pinus radiata*, aucune pinède présentant un degré élevé de défoliation causée par la maladie des bandes rouges n'a été trouvée au Pays basque.

Dans le cadre du même projet LIFE Healthy Forest, des spécimens de 7 ans de diverses variétés européennes de *Pinus sylvestris* plantées dans les arborescences basques du projet Reinforce ont été échantillonnés en 2018. La présence des champignons *Dothistroma septosporum* et *Lecanostica acicola* n'a pas été constatée dans les aiguilles collectées.

Enfin, le projet LIFE Healthy Forest a permis de vérifier l'utilité de l'indice NBR pour le suivi périodique par satellite de la santé des forêts de pins basques, car il permet de quantifier l'activité photosynthétique de la végétation. Les images du satellite Sentinel-2 permettent d'analyser l'évolution des cycles annuels du NBR sur 3 forêts de pins représentatives des

peuplements de pins sylvestres du Pays Basque afin de vérifier les tendances :

- Les valeurs les plus élevées de NBR, et donc les niveaux les plus élevés d'activité photosynthétique des forêts de pins, se trouvent dans les zones montagneuses du versant méditerranéen, comme la chaîne de montagnes d'Artzena.
- Des valeurs intermédiaires apparaissent dans les pinèdes naturelles situées dans les zones frontalières, en raison de sols plus pauvres et d'un climat plus doux, qui favorisent les attaques périodiques de la chenille processionnaire. C'est le cas des forêts de pins du Mont Babio, à Amurrio.
- Les valeurs les plus basses sont trouvées dans les reboisements de pin sylvestre de la zone Cantabrique, situés loin de la distribution naturelle du pin sylvestre : la montagne Altun en Bizkaia.



Actions / expérimentations connues de gestion

Comme il ne s'agit pas d'une espèce d'intérêt majeur au Pays Basque en termes de production, il n'y a pas d'itinéraires publiés pour cette espèce et il existe peu d'initiatives liées au pin sylvestre dans les montagnes basques. Il fut un temps où il était utilisé comme une espèce de montagne, résistant au froid et à la neige, et adapté aux sols pauvres et à une certaine sécheresse estivale, mais sa faible croissance a progressivement réduit l'intérêt de cette espèce pour le reboisement.

Ces dernières années, on peut citer les résultats du projet Reinforce Atlantic Arc (REsource INFrastructures for monitoring, adapting and protecting european atlantic FORests under Changing climatE), dans lequel plusieurs partenaires des régions atlantiques se sont associés en 2011 pour planter plusieurs arborescences situés tout au long de la façade atlantique européenne, dans le triangle entre le nord de l'Écosse, Lisbonne et les îles des Açores.

Guide pratique

Gestion pour l'adaptation des forêts pyrénéennes au changement climatique

L'une des 32 espèces forestières plantées en 2011 dans ces 38 arboretums, chacune ayant des sous-espèces et des origines différentes, était le pin sylvestre. Au total, 5 782 plants de pin sylvestre ont été plantés dans ces arboretums, dont 852 dans les arboretums du Pays basque. La dernière

mesure (printemps 2021) montre une croissance plus importante du pin sylvestre dans l'arboretum d'Alava, situé à une altitude plus élevée et avec une plus grande influence du climat méditerranéen, par rapport à l'arboretum plus humide et tempéré de la côte du Gipuzkoa.

Sous-espèce	Origine	Arboretum AR24-Albina (cota 645)	Arboretum AR22-Irisasi (cota 240)	Moyenne arboretums HAZI (cm)
PISY-SLOV	Slovénie	454	380	420
PISY-HAGE	Hagenau (France)	384	--	384
PISY-VALS	Valsaín (Espagne)	387	355	377
PISY-TURK	Turquie	420	317	371
Hauteur moyenne (cm)	--	401	351	383

Bibliographie

- Rapport final de HAZI Fundazioa. Projet LIFE Healthy Forest.
<https://www.hazi.eus/images/documentos/forestal/hforest.pdf>.
- Resultats du projet de l'Arc Atlantique Reinforce.
<http://www.iefc.net/reinforce-presentation/>.
- CANTERO, A. (2004). Singularidad del pino silvestre en Alava. Comunicaciones / III Congreso Español de Biogeografía, 2006, ISBN 84-8373-848-1, págs. 364-371.



PIN SYLVESTRE EN NAVARRE : AUTOÉCOLOGIE, MENACES ET STRATÉGIES DE GESTION


 FONDS NATIONAL
 D'AMÉNAGEMENT
 ET DE DÉVELOPPEMENT
 DU TERRITOIRE
 Massif des Pyrénées

 Interreg
 POCTEFA


Exigences écologiques du pin sylvestre en Navarre

Le pin sylvestre a une large gamme écologique, ce qui lui permet de coloniser une grande variété de milieux. En Navarre, il occupe plus de 67.000 hectares.

Il est indifférent au substrat, il vit aussi bien dans des sols basiques que très acides, de profondeur et de pierrosité très variées, et dans les endroits les plus méridionaux, il est plus fréquent dans les zones ombragées car il a besoin d'une certaine humidité dans le sol.

Il vit dans des zones présentant un certain degré de continentalité, car il supporte bien le froid hivernal et la chaleur estivale, et résiste à une certaine

sécheresse, mais ne tolère pas la pollution. Son caractère pionnier, qui se traduit par une stratégie de régénération efficace et par sa nature frugale et héliophile, facilite son implantation sur des topographies escarpées avec peu de sol, et il envahit facilement les pâturages peu fréquentés et les cultures abandonnées.

Ses exigences climatiques, selon sa distribution en Navarre, varient entre 5° C et 12,5° C de température moyenne annuelle (Tm), et entre 620 mm et 2400 mm de précipitations annuelles (P). La température minimale moyenne (Tn) varie entre 0,5°C et 7,5°C, tandis que la température maximale moyenne (Tx) varie entre 9,5°C et 18°C.

Itinéraires sylvicoles

Les itinéraires sylvicoles du pin sylvestre en Navarre sont inclus dans les plans de comarque*, notamment dans le Plan de la comarque pyrénéenne.

http://www.navarra.es/home_es/Temas/Medio+Ambiente/Montes/Planificacion+forestal.htm#header3

Ces plans sont en cours de révision dans le cadre du projet LIFE16 IPC/ES/000001 - LIFE-IP NAdapta-CC afin d'y intégrer des mesures de gestion adaptative.

<https://lifenadapta.navarra.es/es/accion-c3.4>

*Equivalent de « communautés de communes ou Pays ».

Menaces

Au cours des dernières années, nous avons assisté à un nouveau déclin des pinèdes, une diminution des reboisements et une augmentation de la défoliation

du pin sylvestre, principalement dans les zones limitrophes de son aire de répartition. Les principaux problèmes sont les suivants :

- Densité élevée : concurrence pour les ressources en eau.
- Absence de gestion. De nombreux peuplements n'ont pas bénéficié de traitements sylvicoles intermédiaires.
- La hausse des températures avec un risque de gel réduit, élargit l'aire de distribution des ravageurs, comme la processionnaire du pin (*Thaumetopoea pityocampa*) qui provoque des défoliations et une réduction de la croissance.
- Des parasites comme le gui (*Viscum album*) et des champignons pathogènes comme *Onnia tomentosa*.
- Propagation d'autres parasites et maladies.
- Risque d'augmentation de la fréquence et de l'intensité des incendies.
- Difficultés de régénération naturelle due à un risque d'augmentation des épisodes de sécheresse.

Ces menaces sont actuellement évaluées dans le cadre du projet LIFE IP NADAPTA- CC. En particulier:

- La vulnérabilité des systèmes forestiers est identifiée et cartographiée. <https://lifenadapta.navarra.es/es/accion-c3.1>
- Les principales menaces, les risques et les impacts potentiels dus au changement climatique sont évalués pour différentes espèces. Les données et documents officiels, une fois publiés, sont disponibles dans le dépôt de documents suivant : <https://tinyurl.com/y2hlsv3o>

Actions et expériences pour la gestion future

- Dans le cadre du programme LIFE16 IPC/ES/000001 - LIFE-IP NAdapta-CC, les plans de comarque de Navarre sont en cours de révision pour intégrer des mesures de gestion adaptative. <https://lifenadapta.navarra.es/es/accion-c3.4>
- Dans le cadre du programme LIFE16 IPC/ES/000001 - LIFE-IP NAdapta-CC, des guides de gestion adaptative sont en cours d'élaboration pour différentes espèces forestières de Navarre, dont le pin sylvestre (prochaine publication). <https://lifenadapta.navarra.es/es/accion-c3.3>

Bibliographie

Gobierno de Navarra (1998): Plan Forestal de Navarra. Gobierno de Navarra

Gobierno de Navarra (2004). Mapa de Cultivos y Aprovechamientos.

Gobierno de Navarra (2011). Planes de Ordenación Territorial de Navarra

Gobierno de Navarra (2012). Mapa de Cultivos y Aprovechamientos.

Gobierno de Navarra (2012). Zonificación de Navarra.

Gobierno de Navarra (2015). Plan General Forestal de la Comarca Cantábrica.

Gobierno de Navarra (2015). Plan General Forestal de la Comarca Pirenaica

Gobierno de Navarra (2015). Plan General Forestal de la Comarca Zona Media y Ribera.

Web Gobierno de Navarra: http://www.navarra.es/home_es/Temas/Medio+Ambiente/Montes/.

"Cartografía forestal: IDENA: <https://idena.navarra.es/portal/descargar.>"



PIN SYLVESTRE EN CATALOGNE : AUTOÉCOLOGIE, MENACES ET STRATEGIES D'ADAPTATION APPLIQUÉES



Auteurs :

Luís Coll (Centre de Ciencia y Tecnología Forestal de Cataluña)

Pere Casals (Centre de Ciencia y Tecnología Forestal de Cataluña)

Teresa Baiges (Centre de la Propietat Forestal)

Introduction et autécologie

Le pin sylvestre est la deuxième essence forestière qui occupe la plus grande superficie en Catalogne. Il est actuellement l'essence dominante sur environ 250 000 ha (16 % de la superficie forestière), dont environ deux tiers sont des peuplements purs. C'est également l'essence qui présente le plus gros volume de bois sur pied (estimé à près de 35 000 000 m³) et qui contribue le plus au marché du bois catalan.

En Catalogne, la plupart des forêts de pin sylvestre sont situées dans les Pyrénées, les Pré-Pyrénées et dans les zones les plus élevées des chaînes de montagnes précôtières (Figure 1). L'espèce est capable de s'établir et de se développer sur différents substrats (acides et basiques) et dans un large gradient altitudinal, se trouvant, dans des conditions optimales, à des altitudes comprises entre 900 et 1 600 m et dans des orientations moyennement ou nettement ombragées (Lloret et al. 2010). En général, il est distribué dans des zones de pente modérée (entre 10° et 30°) et nécessite des sols relativement profonds (>50 cm) et légèrement pierreux (Piqué et al. 2011).

Bien que le pin sylvestre soit résistant au vent, aux chutes de neige et au gel, il a besoin de précipitations d'au moins 600 mm et présente une large amplitude thermique (de 24°C à 30°C).

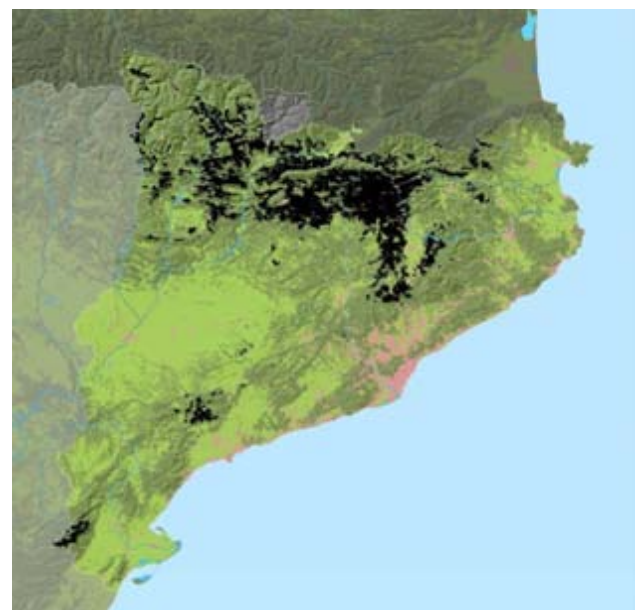


Figure 1 : Localisation des peuplements dominés par le pin sylvestre en Catalogne (en noir).
Source : Vericat et al. (2010)

En général, les peuplements bien venants se trouvent dans les régions où les précipitations annuelles moyennes dépassent 800 mm.

Principales menaces

Abiotiques

En Catalogne, le pin sylvestre est à la limite de son aire de répartition méridionale. Il s'agit donc d'une espèce particulièrement vulnérable aux effets du changement climatique. À cet égard, les modèles basés sur les variables topoclimatiques développés par Ninyerola et al. (2010) prévoient, pour les prochaines décennies, une réduction significative de la disponibilité d'habitats adéquats pour le pin sylvestre en Catalogne. Plus précisément, ils montrent comment la zone "appropriée" pour le développement de l'espèce diminuera d'environ 1 350 000 ha (42 % de la superficie de la Catalogne) à des valeurs de 460 000 ha (14 %) pour la période 2050-2080, dans le cadre d'un scénario climatique A2 (Figure 2).

D'autre part, de nombreuses études montrent une augmentation des niveaux de défoliation des peuplements de pin sylvestre au cours des dernières années, associée à l'occurrence de sécheresses extrêmes (Vilà-Cabrera et al. 2012). On s'attend à ce que la fréquence de ces événements augmente dans un avenir proche, ce qui entraînerait une augmentation des niveaux actuels de dépérissement qui pourrait compromettre la persistance future de bon nombre de ces peuplements (Galiano et al. 2010). De ce fait, le projet DEBOSCAT, une initiative visant à surveiller l'état des forêts en Catalogne promue il y a dix ans par le Département de l'action climatique, de l'alimentation et de l'agenda rural du gouvernement catalan et coordonnée par le CREAM, a déjà identifié un nombre important d'épisodes de dépérissements dans les peuplements dominés par le pin sylvestre au cours des dernières années (Figure 3).

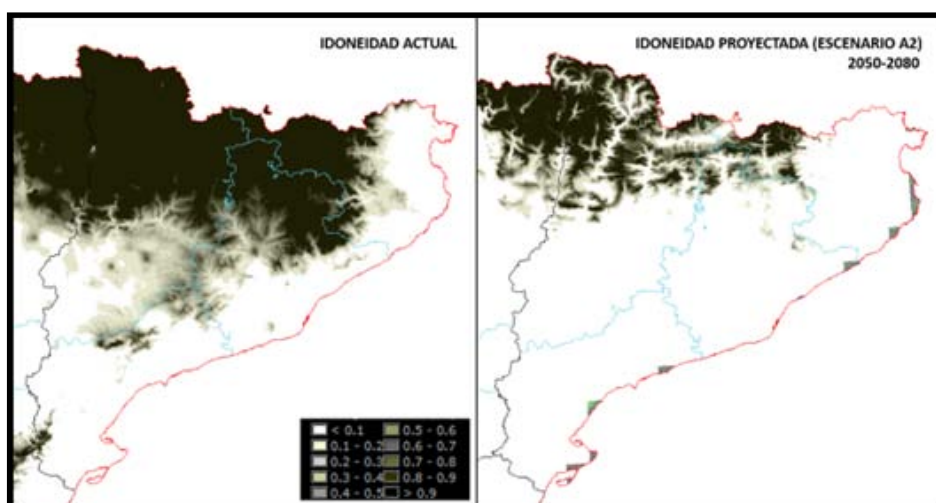


Figure 2 : Carte d'adéquation (échelle de 0 à 1) des forêts de pin sylvestre en Catalogne. Source : Ninyerola et al. (2010).

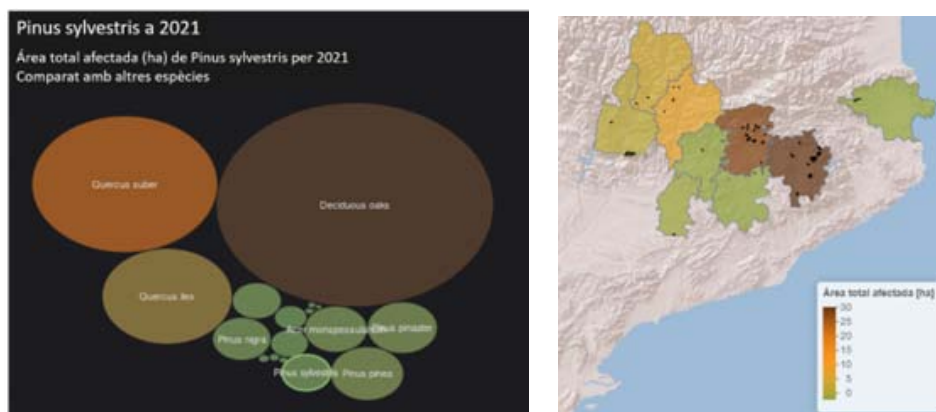


Figure 3 : Superficie des forêts de pins sylvestres montrant des signes de dépérissement, collectée dans le cadre du projet DEBOSCAT au cours de l'année 2021. Source : Laboratori Forestal Català : Laboratori Forestal Català (Deboscat app : https://laboratoriforestal.creat.cat/deboscat_app/)

Guide pratique

Gestion pour l'adaptation des forêts pyrénéennes au changement climatique

A une échelle inférieure, d'autres facteurs modulent la réponse des peuplements à la sécheresse de manière déterminante, comme la structure, la plasticité et la variabilité phénotypique des populations, ou des aspects édaphiques ou microtopographiques (associés à la disponibilité édaphique). Tout cela complique, au niveau local, la caractérisation de la vulnérabilité des peuplements au changement climatique (Martínez-Vilalta *et al.* 2012). Actuellement, des modèles de dynamique forestière basés sur l'écophysiologie sont développés en Catalogne, comme le modèle MEDFATE (De Cáceres *et al.* 2015), ce qui devrait permettre des avancées substantielles dans ce domaine et améliorer la compréhension (et la prédiction) des effets de ces processus sur la dynamique des forêts de pin sylvestre.

Outre l'augmentation de l'intensité et de la fréquence des sécheresses, le changement climatique devrait modifier le régime des incendies et accroître l'exposition des peuplements de pin sylvestre aux incendies. Les travaux scientifiques dans ce domaine ont estimé que le pourcentage de peuplements vulnérables à ces événements (obtenu à partir de modèles basés sur des variables topoclimatiques) augmentera de 32 % à 66 % dans la péninsule ibérique (Vilà-Cabrera *et al.* 2011). Cela pourrait compromettre la persistance des peuplements situés dans des zones plus sèches (plus exposées aux incendies) et faciliter l'expansion, dans ces zones, des populations de chêne kermès en voie de régénération ou des formations de maquis (Figure 3).



Figure 4 : Evolution de la superficie (ha) de pin sylvestre où des signes de dépérissement ont été identifiés au cours de la dernière décennie (ligne verte) dans le cadre du projet DEBOSCAT.

Biotiques

Au cours des dernières années, on a observé une augmentation de l'affectation des populations de pin sylvestre en Catalogne par des insectes défoliateurs tels que la chenille processionnaire du pin (*Thaumetopoea pityocampa*). S'il est vrai que les hivers doux, de plus en plus fréquents dans le contexte du réchauffement climatique actuel, favorisent la survie des larves et l'expansion de l'espèce aux niveaux altitudinal et latitudinal (Hódar *et Zamora* 2004), il est également vrai que ces perturbations sont de nature cyclique. Ces cycles sont déterminés, entre autres facteurs, par la régulation biotique associée aux prédateurs naturels tels que les oiseaux ou les parasitoïdes (Hódar *et al.* 2012).

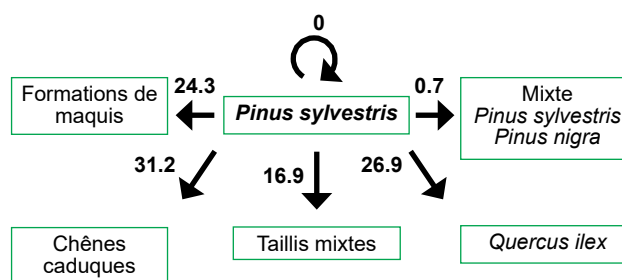


Figure 5 : Résultats des prédictions du modèle développé dans Vilà-Cabrera *et al.* (2011) sur le pourcentage de la surface brûlée de pin sylvestre qui évoluera vers d'autres types de formations, 30 ans après l'incendie.

Guide pratique

Gestion pour l'adaptation des forêts pyrénéennes au changement climatique

Les dégâts sur les forêts de pin sylvestre d'autres ravageurs les affectant, tels que les coléoptères des genres *Tomicus* et *Ips*, ont également été amplifiés par les vagues de chaleur et la sécheresse (Jaime et al. 2022), car la chaleur favorise la reproduction des insectes (qui peuvent accomplir plus d'un cycle de vie par an). Les peuplements affectés par ces scolytidés sont, à leur tour, plus vulnérables aux sécheresses futures. De telles interactions se produisent également entre la sécheresse et la présence de gui (Figure 6), qui est relativement abondant dans certains peuplements de pin sylvestre dans les Pyrénées à la limite de leur distribution altitudinale (Galiano 2010).



Figure 6 : Vue frontale et aérienne de forêts de pins sylvestres affectées par la sécheresse et le gui dans les Pyrénées catalanes (Arcalis, Pallars Sobirà).

Défis pour la gestion du pin sylvestre en Catalogne : la régénération

L'un des principaux défis sylvicoles auxquels la Catalogne devra faire face dans les années à venir est la régénération des peuplements de pin sylvestre. La plupart de ces peuplements occupent l'étage montagnard et sont des formations secondaires qui représentent une étape dynamique vers d'autres formations. Actuellement, de nombreuses forêts de pins sylvestres des pré-Pyrénées catalanes présentent les caractéristiques suivantes :

- Structures régularisées, car issues de processus de colonisation naturelle ou, dans une moindre mesure, de reboisements, qui commencent à entrer dans l'âge de la régénération (> 60 ans).

- Absence de recrutement de nouveaux individus, dans les forêts gérées par des coupes de sélection diamétrales (majoritaires), ainsi que dans celles excessivement denses, du fait de l'abandon de la gestion.
- Un sous-bois de feuillus (chêne, hêtre...) qui menace de les remplacer.

De plus, le pin sylvestre de la péninsule ibérique se trouve à la limite sud de sa distribution européenne, ce qui augmente sa vulnérabilité aux nouvelles conditions climatiques (Figure 8).

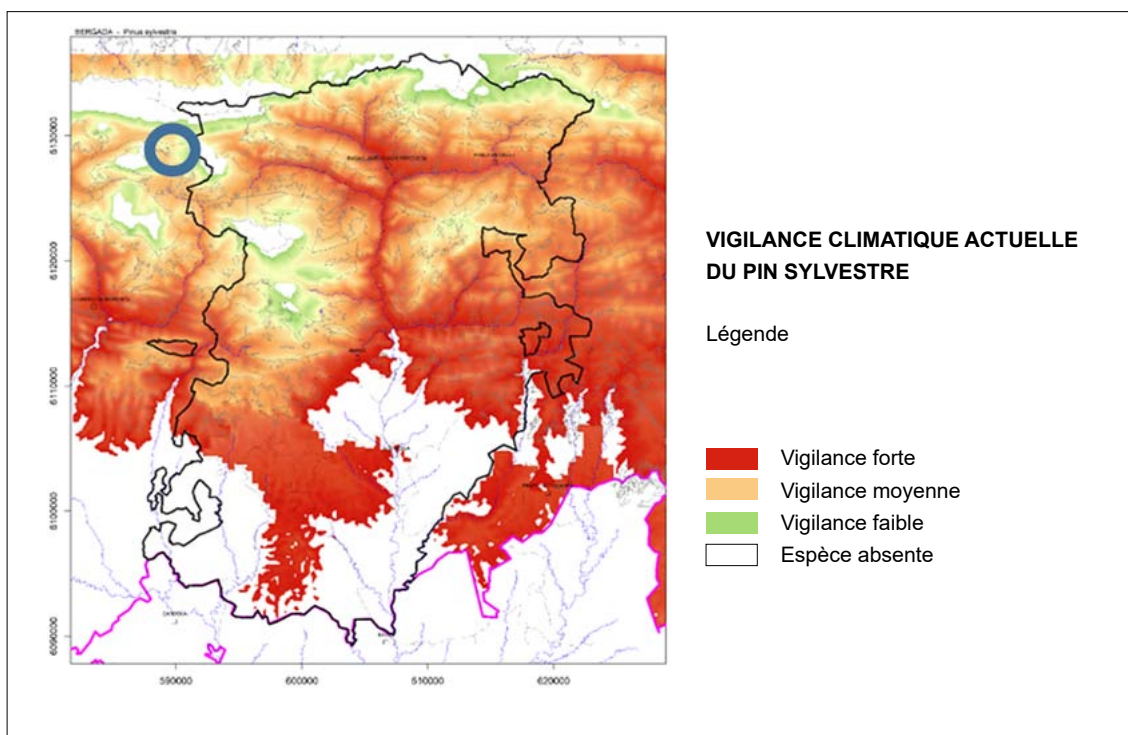


Figure 8 : Section correspondant à la région de Berguedà de la carte de vigilance climatique actuelle (VCA) pour le pin sylvestre dans le massif pyrénéen, élaborée dans le cadre du projet CANOPEE (2018), sur la base des séries climatiques 1980-2010 harmonisées pour l'ensemble des Pyrénées avec une résolution inférieure à 1 km. Le cercle bleu indique la localisation des parcelles de démonstration du réseau de parcelles du CPF.

Gestion actuelle et expérimentations

Traitements sylvicoles de mise en lumière pour stimuler la régénération

Dans une grande partie des Pré-Pyrénées catalanes, le pin sylvestre a été géré en futaie irrégulière par sélection ou abattage diamétral. L'origine plus ou moins contemporaine des peuplements par colonisation d'anciens pâturages et le caractère héliophile de l'espèce ont rendu difficile le recrutement de nouveaux individus en réponse à ces traitements, sauf en formant des groupes de régénération après des perturbations (naturelles ou associées à la gestion elle-même). Dans cette situation, deux options sylvicoles sont possibles :

- Si la pinède présente une structure déséquilibrée par rapport à la répartition idéale des âges, s'orienter vers une véritable irrégularisation du peuplement par bouquets, en créant des ouvertures lumineuses pour leur installation.

- Si la structure de la pinède est nettement régulière, s'orienter vers une gestion forestière régulière jusqu'à ce que les caractéristiques du peuplement permettent d'initier des traitements de régénération.

Dans tous les cas, pour stimuler la régénération du pin sylvestre, il est nécessaire de créer une ouverture du couvert qui introduise une hétérogénéité dans les conditions écologiques existantes au sein du peuplement, mais sans que l'ampleur de la perturbation n'entraîne la perte de l'ambiance forestière. Ceci peut être réalisé par des ouvertures intensives progressives (éclaircies successives uniformes dans le cas de peuplements réguliers) ou par la génération de clairières (bouquets de régénération dans les structures irrégulières).

En ce qui concerne ce dernier point, les directives de gestion durable des forêts de Catalogne (ORGEST) pour le pin sylvestre (*Piqué et al., 2011*) envisagent deux options en fonction de la taille de l'ouverture :

Guide pratique

Gestion pour l'adaptation des forêts pyrénéennes au changement climatique

- Petits bouquets, de 500 à 1 000 m² de surface jusqu'à 3 000 m² ; par coupe à blanc.
- Bouquets de taille moyenne : de 3 000 m² à 1 ha, par éclaircies successives uniformes.

Au niveau opérationnel, cela s'est généralement traduit par la recommandation de générer des clairières par coupe rase uniquement lorsque la taille de la trouée est inférieure à deux fois la hauteur des arbres. Une fois l'abattage effectué, on considère que la durée de la période de régénération est de 20 ans et qu'elle est atteinte lorsque le nombre d'arbres régénérés dépassant 1,30 m de hauteur est supérieur à 3 000 pieds/ha.

Suivi des parcelles : le réseau de parcelles de démonstration du CPF

Face à la difficulté d'obtenir une nouvelle régénération de pin sylvestre dans plusieurs peuplements où ces coupes ont été initiées, la question se pose : ces principes sont-ils toujours valables dans les nouvelles conditions climatiques, ou faut-il introduire de nouvelles considérations pour obtenir une régénération en Catalogne ?

En 2007, le CPF a lancé le suivi d'un réseau de parcelles de démonstration en pin sylvestre et en pin laricio afin d'évaluer la faisabilité de différentes méthodes de régénération et les variables les plus influentes dans le succès de la régénération. Le réseau comprend 10 propriétés situées dans des endroits différents et dans des conditions de sol et de climat différentes, où la réussite de la régénération

est étudiée dans le cadre de traitements successifs uniformes d'éclaircie, de taillis et de coupe à blanc. Dans 4 de ces propriétés, en collaboration avec le CTFC et l'UdL, nous étudions différentes origines de pin sylvestre et de pin laricio dans des conditions environnementales contrastées, et l'effet du sous-bois sur la survie des semis dans des peuplements où des bouquets de régénération ont été ouverts. Les résultats préliminaires de ces expériences sont rapportés dans Baiges et al. (2019) et indiquent ce qui suit :

- Dans les conditions méditerranéennes et les projections de périodes de sécheresse plus longues, il sera nécessaire d'évaluer de manière adéquate le degré d'altération du microclimat supposé par l'abattage, en particulier dans les peuplements au relief hétérogène, où les microstations devront plus que jamais être prises en compte.
- Dans certaines pinèdes des Pré-Pyrénées, on a observé des taux de germination faibles qui s'améliorent toutefois légèrement si le sol est travaillé.
- Dans les études réalisées, aucun effet de facilitation ou de concurrence de la végétation herbacée ou arbustive sur le développement des scions n'a été observé jusqu'à présent, mais il est clair qu'une gestion adéquate des broussailles devra être prise en compte dans les traitements de régénération.
- Il y a des indications d'un effet potentiel des ravageurs et des champignons pathogènes sur la viabilité des graines, la germination des graines et le développement de la régénération du pin, qui doivent être étudiées plus en détail.



Transect pour le suivi de régénération après coupe de régénération par bouquets.



Bibliographie

- Baiges, T. (2018). *Tallada arreu per faixes en un bosc de pi roig del pre-pirineu*. Fitxa pràctica. Revista *Silvicultura* núm. 70. https://cpf.gencat.cat/web/.content/or_organismes/or04_centre_propietat_forestal/03_linies_actuacio/transferencia_de_coneixement/fixtes_tecniques/Tallada-arreu-per-faixes-en-un-bosc-de-pi-roig.pdf.
- Baiges, T., Coll, Ll., Casals, p. (2019) *Tractaments de regeneració en boscos de pi roig en un context de canvi climàtic*. Actes de les XXVI Jornades Tècniques Silvícules Emili Garolera.
- De Cáceres M., Martínez-Vilalta J., Coll L., Llorens P., Casals P., Poyatos R., Pausas J.G., Brotons L. 2015. *Coupling a water balance model with forest inventory data to predict drought stress: the role of forest structural changes vs. climate changes*. *Agricultural and Forest Meteorology* 213: 77-90.
- Galiano L., Martínez-Vilalta J., Lloret F. 2010. *Drought-induced multifactor decline of Scots pine in the Pyrenees and potential vegetation change by the expansion of co-occurring oak species*. *Ecosystems* 13: 978-991.
- Hódar J.A., Zamora R. 2004. *Herbivory and climatic warming: a Mediterranean outbreaking caterpillar attacks a relict, boreal pine species*. *Biodiversity and Conservation* 13: 493-500.
- Hódar J.A., Zamora R., Cayuela L. 2012. *Cambio climático y plagas: algo más que el clima*. *Ecosistemas* 21(3):73-78.
- Jaime L., Batllori E., Ferretti M., Lloret F. 2022. *Climatic and stand drivers of forest resistance to recent bark beetle disturbance in European coniferous forests*. *Global Change Biology* 28: 2830-2841.
- Martínez-Vilalta J., Aguade D., Banque M., Barba J., Yuste J.C., Galiano L., García N., Gomez M., Heres A., Lopez B.C., Lloret F., Poyatos R., Retana J., Sus O., Vayreda J., Vilà-Cabrera A. 2012. *Las poblaciones ibéricas de pino albar ante el cambio climático: con la muerte en los talones*. *Ecosistemas* 21: 15-21.
- Ninyerola M., Serra-Díaz J.M., Lloret F. 2010. *Atlas de idoneidad topo-climática de leñosas*. *Servidor de mapas*. Universitat Autònoma de Barcelona. URL: <http://www.opengis.uab.cat/ldoneitatPI/index.html>.
- Palero, N., Baiges, T. (2017) *Tallades per bosquets en una massa irregular de pi roig*. Fitxa pràctica. Revista *Silvicultura*, núm. 67. https://cpf.gencat.cat/web/.content/or_organismes/or04_centre_propietat_forestal/03_linies_actuacio/transferencia_de_coneixement/fixtes_tecniques/fpractica3.pdf.
- Palero N., Pedret, M., Baiges, T. (2022). *Instal·lació de regenerat de pi roig en obertures per bosquets fetes fa 10 anys, al Solsonès*. Fitxa pràctica de la revista *Silvicultura* núm. 85. https://cpf.gencat.cat/web/.content/or_organismes/or04_centre_propietat_forestal/03_linies_actuacio/transferencia_de_coneixement/fixtes_tecniques/Fitxa-practica_85.pdf
- Piqué 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.
- Vericat P., Piqué M., Koua O., Pla M., 2010. *Mapa de formacions forestals pures i mixtes de Catalunya a partir del Mapa Forestal de Espanya 1:50.000 digitalitzat*. Centre de Ciència i Tecnologia Forestal de Catalunya.
- Vilà-Cabrera A., Martínez-Vilalta J., Vayreda J., Retana J. 2011. *Structural and climatic determinants of demographic rates of Scots pine forests across the Iberian Peninsula*. *Ecological Applications* 21: 1162-1172.
- Vilà-Cabrera A., Rodrigo A., Martínez-Vilalta J., Retana J. 2012. *Lack of regeneration and climatic vulnerability to fire of Scots pine may induce vegetation shifts at the southern edge of its distribution*. *Journal of Biogeography* 39: 488-496.

STRATÉGIES D'ADAPTATION AU CHANGEMENT CLIMATIQUE APPLIQUÉES AUX FORÊTS PYRÉNÉENNES

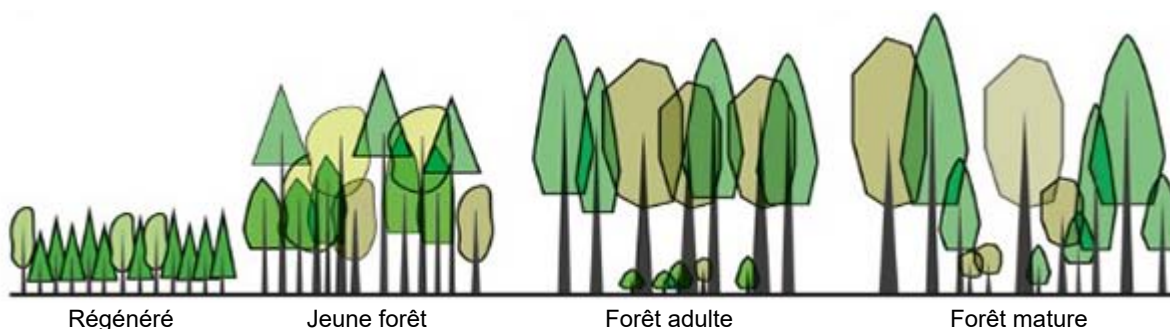


Dans le cadre des projets CANOPEE et ACCLIMAFOR, différents traitements pour l'adaptation des forêts pyrénéennes au changement climatique ont été appliqués et analysés. Les techniques sylvicoles mises en œuvre sont pour la plupart basées sur des techniques déjà couramment utilisées par les gestionnaires forestiers, qui ont été modifiées en fonction du nouveau contexte climatique.

Elles sont regroupées en cinq stratégies principales :

1. Éclaircies et dépressages
2. Adaptation du diamètre de coupe
3. Diversification
4. Réduction du risque d'incendie
5. Choix des espèces et des provenances dans les plantations

Opportunités d'intervention en gestion adaptative en fonction du stade de développement



Sélection des espèces et provenances dans les plantations, comprenant la migration assistée.

Diversification (maintien de peuplements mixtes en régénérations et plantations)

Dépressages et balivages.

Application et adaptation des éclaircies, en modifiant l'intensité, le régime et les critères.

Diversification (promotion des espèces sporadiques, maintien de peuplements mixtes)

Adaptation du diamètre de coupe (réduire les diamètres de coupe ou prolongation des cycles)

Diversification (promotion des espèces sporadiques, maintien de peuplements mixtes)

Guide pratique

Gestion pour l'adaptation des forêts pyrénéennes au changement climatique

Dans le cadre du projet ACCLIMAFOR, deux fiches de synthèse ont été élaborées, avec des exemples du réseau de parcelles expérimentales et de démonstration créé dans le massif pyrénéen :

- *Traitements d'adaptation au changement climatique dans les forêts établies.*
- *Plantations : choix des espèces et des provenances.*

Plus d'informations :

CANOPEE (2019). Guide de gestion forestière pour l'adaptation au changement climatique dans les forêts pyrénéennes. 128 pp. <https://cutt.ly/ZwtzHioP>

Géoportail de l'OPCC, avec des informations provenant du réseau de parcelles : <https://opcc-ctp.org/fr/geoportal>.



Éclaircies, dépressages y balivages

Les éclaircies, dépressages et balivages sont des coupes partielles qui sont effectuées dans un peuplement avec pour objectif d'améliorer la stabilité et la qualité du peuplement, en éliminant les sujets les moins adaptés, en contrôlant la composition spécifique et en favorisant la croissance des individus restants. Dans le cadre de la gestion adaptative, ces actions chercheront à renforcer l'un ou plusieurs de ces objectifs :

- **Augmentation de la vitalité et de la résistance individuelle aux agents biotiques et abiotiques** : chaque arbre conservé peut se développer plus librement et avec un niveau de stress beaucoup plus faible que dans une situation de concurrence, étant dans un meilleur état physiologique et donc plus apte à réagir au stress.

- **Augmentation de la diversité interspécifique et intraspécifique**, pour développer la résistance, la résilience et la capacité d'adaptation des peuplements.
- **Accroître la diversité structurelle**, car, selon l'âge et la taille des individus, la sensibilité au stress biotique et abiotique diffère.
- **Accélération des changements dans la structure ou la composition des espèces**, particulièrement approprié dans le cas d'espèces cibles situées à la limite inférieure de leur aire de répartition.

Ces objectifs sont atteints **en modulant la fréquence, le temps, l'intensité et les critères de sélection des coupes.**

Adaptation du diamètre de coupe

Le diamètre est le paramètre le plus utilisé pour déterminer la maturité d'un individu du point de vue de la production et constitue un critère incontournable de la commercialisation. La question de l'adaptation du diamètre de récolte se pose **lorsque l'espèce cible peut être maintenue, mais qu'il existe un risque évident ou probable de déclin avant**

que le diamètre de récolte ne soit atteint. L'âge des arbres étant l'un des principaux facteurs de vulnérabilité au stress hydrique, pour lequel **la réduction du diamètre de coupe peut être une solution de compromis pour atténuer le risque de dépréciation.**

Guide pratique

Gestion pour l'adaptation des forêts pyrénéennes au changement climatique

En général, le choix du diamètre de coupe est le résultat d'une analyse technico-économique qui tient compte de la croissance du peuplement en fonction de la fertilité, du prix de vente, des frais engagés pendant la rotation et des conditions d'exploitation.

Dans le nouveau contexte climatique, il conviendrait d'ajouter le facteur de risque associé aux sécheresses (sécheresse, canicule) et aux perturbations.

Logiquement, le bénéfice attendu diminue lorsque la notion de risque est introduite, surtout s'il n'y a pas de possibilité de récupération des revenus, en raison de la dépréciation du bois concerné. Ainsi, les critères influençant le choix des diamètres de coupe seraient modifiés par :

- **La probabilité que survienne une perturbation due à la sécheresse/canicule** provoquant des dépérissements et des mortalités,
- **La possibilité de commercialiser le bois affecté.** A priori, plus l'événement climatique est

sévère (perte rapide de la qualité du bois) et plus il est étendu géographiquement (marché du bois saturé), plus la possibilité de tirer un revenu de la vente du bois affecté sera faible.

Au niveau de la gestion adaptative, cela pourrait conduire à remettre en question l'espèce cible et l'existence d'une contrainte technique ou économique pour la remplacer.

L'introduction de ce nouveau critère dans les zones à haut risque ne diminue en rien l'importance du maintien et/ou de la promotion de plusieurs grands/anciens arbres, présentant des dendromicrohabitats importants pour la biodiversité. En effet, dans certaines situations, la prolongation des rotations pour augmenter la maturité des peuplements et améliorer leurs fonctions écologiques pourrait être considérée comme une stratégie de résilience alternative.

Diversification

Les traitements de diversification visent à **accroître la complexité de la forêt**, entendue comme la diversité à petite échelle de la composition (peuplements mixtes) et des structures dans les dimensions verticales (strates) et horizontales (mosaïques). **Un système forestier complexe et biodiversifié est considéré comme plus résilient et résistant aux chocs du changement climatique** dans la mesure où il favorise l'émergence de réponses adaptatives capables de faire face à l'incertitude associée au changement climatique. Il existe trois échelles de diversification :

- **Diversification génétique** : au sein d'une même espèce, l'objectif est de maximiser la diversité des provenances locales, productives et adaptables, qu'il s'agisse d'espèces indigènes ou acclimatées. L'objectif est de favoriser l'adaptation génétique *in situ* ainsi qu'au moyen de la migration.
- **Diversification des espèces** : au sein d'une communauté, sont privilégiés les mélanges d'espèces d'arbres dominants et sont maintenues, voire introduites par plantations ou régénérations naturelles, les espèces de sous-bois. L'objectif est d'atteindre une augmentation

de la complexité du peuplement en général et de la diversité structurelle verticale (strates).

- **Diversification structurelle** : au sein d'une communauté, le nombre de strates de peuplement est augmenté (structure verticale) ou, au niveau du paysage, l'émergence de différentes communautés ou mosaïques est favorisée (structure horizontale).

De nombreux traitements de diversification ont un effet à la fois sur la diversité compositionnelle et structurelle, et sont souvent appliqués en combinaison les uns avec les autres. En voici quelques exemples :

- **Promotion de la diversité dans les forêts déjà mixtes** :
 - **Sylviculture individuelle** pour la promotion d'espèces sporadiques et d'individus à haute valeur économique ou écologique (tree-oriented silviculture).
 - **Gestion des forêts mixtes bi-stratifiées en "forêt moyenne irrégulière"** (ou *coppice with standards*). Elle comprend une gestion en deux strates :

Guide pratique

Gestion pour l'adaptation des forêts pyrénéennes au changement climatique

une strate inférieure de repousse pour la production de bois de chauffage et une strate supérieure, irrégulière, de semis d'espèces de valeur pour la production de bois d'œuvre.

- **Maintien des éléments clés (ou "retention forestry")**. Maintenir intentionnellement, au moment de la coupe, les structures et les individus importants pour la biodiversité qui resteront dans le peuplement à long terme (tels que les grands vieux arbres, vivants et morts, qui nécessitent un temps de développement au-delà du cycle de coupe).
- **Incorporation de nouvelles espèces dans les peuplements peu diversifiés :**
 - **Appui à la régénération naturelle :** Ouvertures de différentes tailles pour moduler l'entrée de lumière (directe ou latérale), appropriées à l'écologie des espèces et tirant parti de la régénération en attente. Cette pratique génère également une diversité de structures horizontales (petites mosaïques). Il est possible d'envisager l'installation de protections, ou de considérer la broussaille comme un élément de protection et de facilitation plutôt que comme un concurrent.
 - **Plantation (ou ensemencement) d'enrichissement, dans les zones fortement**

simplifiées en tant que composition spécifique ou en tant qu'étape préalable aux ouvertures pour les espèces tolérantes à l'ombre.

- **Pratiques favorisant la diversité et l'adaptation génétique des arbres** afin d'assurer une diversité génétique suffisante et de permettre la possibilité d'une sélection naturelle ultérieure, adaptée aux nouvelles conditions climatiques :
 - **Adapter la densité des arbres et les critères de sélection des arbres dans les coupes de régénération :** Augmenter le nombre d'arbres semenciers dans les coupes de dissémination et maintenir une grande diversité phénotypique.
 - **La migration assistée.** Utilisation d'essences provenant d'autres sources plus conformes à la nouvelle situation climatique actuelle ou prévue.

Au-delà de la gestion à **l'échelle de la forêt ou du peuplement**, sa relation avec **l'échelle du paysage** doit également être prise en compte, en particulier lorsqu'il s'agit de hiérarchiser les actions, par exemple dans les peuplements fonctionnellement moins diversifiés ou en favorisant les espèces qui fournissent de nouveaux traits fonctionnels inexistant dans la totalité du paysage.

Réduction du risque d'incendie

Les zones de montagne telles que les Pyrénées, en raison de leur relief accidenté avec des pentes abruptes, ont historiquement été exposées à des phénomènes naturels défavorables tels que les avalanches, les crues torrentielles et les inondations. La nécessité de vivre avec cette menace impose d'essayer de minimiser le risque et les impacts de ces phénomènes sur les activités et les populations humaines. Pour cette raison, la présence d'un environnement naturel protecteur est cruciale et, dans ce contexte, **les forêts de haute montagne sont très importantes, car elles sont considérées comme des forêts protectrices ou défensives contre ces phénomènes**. Par rapport aux dispositifs et constructions de protection contre les avalanches, les forêts protectrices ont un coût économique très faible et sont également plus respectueuses de l'environnement.

Bien que les Pyrénées soient moins touchées par les incendies que la zone méditerranéenne à ce jour, elles sont plus vulnérables, notamment en raison de leur composition spécifique et du risque de

dégradation de la fertilité des sols. L'augmentation des températures et des périodes sèches est prévisible. De plus, *"Les zones de montagne, telles que les Pyrénées, seront plus vulnérables et exposées à un régime d'incendie plus élevé qu'actuellement. L'inflammabilité de la végétation et la période de susceptibilité au feu augmenteront et, par conséquent, il faut s'attendre à des incendies plus fréquents, plus étendus et plus intenses"*. (COLL, et al., 2019). Ainsi, **leur capacité de récupération sera plus faible**, ce qui peut poser des problèmes importants, notamment pour les forêts de protection contre les risques naturels.

Les actions d'atténuation des incendies de forêt consistent à **réduire la quantité de combustible et sa continuité horizontale et verticale**, car elles ont un impact important sur le comportement du feu (intensité et vitesse de propagation), principalement par le débroussaillage du sous-bois, les éclaircies, les dépressages et l'élagage des arbres.

Réseau de parcelles expérimentales et démonstratives dans les Pyrénées, créé dans le cadre des projets CANOPÉE y ACCLIMAFOR - Parcelles de gestions forestière dans les forêts existantes

PEUPELEMENTS CANOPEE (2018)

Objectifs	<ul style="list-style-type: none"> Régulation de la concurrence pour accroître la vitalité et l'efficacité en consommation d'eau Maintenir le mélange d'espèces ou favoriser l'espèce la plus adaptée à la sécheresse
------------------	---

Région	Formation forestière	Traitement	Partenaire
Occitanie	Hêtraie de montagne adulte	Eclaircie sélective mixte	ONF
Occitanie	Sapinaie de montagne avec hêtre	Eclaircie sélective mixte	ONF
Occitanie	Taillis de châtaigniers avec acacia	Eclaircie sélective mixte favorisant l'acacia	CNPF
Nouvelle-Aquitaine	Taillis de châtaigniers avec réserve de chêne pédonculé de même âge	Conversion en futaie d'un peuplement bi-stratifié : éclaircissements en futaie et coupe intense en taillis	CNPF
Catalogne	Régénération post-incendie de chênes pubescents avec des populations éparpillées de pins maritimes	Balivage dirigé autour des jeunes pousses de pins	CTFC
Catalogne	Chênaie de montagne. Taillis.	Balivage/Éclaircie basse pour améliorer la vitalité et amélioration de l'eau dans le bassin	CPF
Navarre	Pin maritime (var. Austriaca)	Eclaircie de haute intensité (30% ab) et basse (15% ab)	GAN-NIK
Aragon	Sapinières avec pin sylvestre	Eclaircie sélective d'individus affaiblis	DGA IPE-CSIC
Pays Basque	Taillis de chêne en perchis	Balivage sélectif mixte	HAZI

Objectif	Réduction du risque, de la virulence et de l'intensité des incendies
-----------------	--

Région	Formation forestière	Traitement	Partenaire
Andorre	Forêt de protection de pin sylvestre et de pin maritime	Coupe sanitaire, élagage et débroussaillage	AR+I

Guide pratique

Gestion pour l'adaptation des forêts pyrénéennes au changement climatique

PEUPELEMENTS ACCLIMAFOR (2020)

Objectifs	<ul style="list-style-type: none">• Agir dans des zones identifiées comme "vulnérables au changement climatique" ou en déclin• Dans les régions du versant sud, tester différentes actions sur le pin sylvestre, une espèce d'intérêt économique menacée.
------------------	--

Région	Formation forestière	Traitement	Partenaire
Occitanie	Taillis de chêne avec hêtre	Éclaircie sélective mixte (10% de volume) pour favoriser le chêne	CNPF
Occitanie	Plantation de frêne de 30 ans (50 provenances) avec beaucoup de sous-bois	Débroussaillage total dans 1 rangée sur 2	CNPF
Nouvelle-Aquitaine	Plantation de larix du Japon (L. kaempferi) de 70 ans de 500 pieds/ha instable	Éclaircie sélective pour augmenter la stabilité et la vitalité du peuplement	CNPF
Catalogne	Forêt de pin sylvestre neutrobasophiles et mésophiles	Éclaircie sélective	CTFC
Catalogne	Forêt de pin sylvestre adulte	Adaptation des coupes de régénération. Essai de 5 traitements (bandes, taillis, éclaircissements successifs de 2 intensité, abattage)	CPF
Navarre	Peuplement semi-régulier de pin sylvestre de régénération naturelle, de composition et densité variables	Éclaircie par le haut, avec marquage préalable pied à pied, pour améliorer la vitalité et l'hétérogénéité, favorisant la présence de Quercus humilis, Sorbus torminalis, S. aucuparia et Acer opalus.	GAN-NIK

Pour plus d'informations

Géoportail del OPCC: <https://www.opcc-ctp.org/fr/geoportal>.

Site web ACCLIMAFOR : <https://www.acclimafor.net/>



PLANTATIONS DÉMONSTRATIVES POUR L'ADAPTATION AU CHANGEMENT CLIMATIQUE

La répartition d'une espèce végétale est déterminée par l'existence durable de conditions écologiques minimales qui lui permettent de persister. Chaque espèce arborée occupe une niche écologique spécifique définie notamment par les conditions pédologiques, thermiques et hydriques. Ceci explique, entre autres, l'étagement des espèces forestières en milieu montagnard. Lorsque les conditions minimales ne sont pas réunies, la persistance de l'espèce dépend de sa capacité à migrer vers des lieux favorables. Même si les espèces sont capables de migrer pour suivre leur niche écologique, dans le contexte actuel d'accélération des changements climatiques, on peut douter de la capacité des arbres - immobiles et longévifs - à se disperser au même rythme que l'évolution du climat, en particulier dans les paysages fragmentés. Les espèces végétales s'adaptent également aux changements écologiques en modifiant leurs caractéristiques morphologiques et physiologiques. Cette variabilité est connue sous le nom de plasticité. Cependant, dans certains cas, il est actuellement impossible de savoir si la plasticité des espèces principales ou secondaires d'un peuplement sera suffisante pour couvrir la variation du changement climatique dans de bonnes conditions physiologiques.

Pour faire face aux nouvelles conditions climatiques, il est de la responsabilité du gestionnaire forestier d'appliquer une sylviculture qui favorise les essences les moins vulnérables aux effets du changement climatique. Dans ce sens, il a été suggéré dans certains milieux qu'il convenait de favoriser anthropiquement le déplacement des espèces afin d'anticiper les effets du changement climatique. Ce type d'action, qui relève du concept de migration assistée, peut être envisagé à trois niveaux différents :

Coordination :

Luís Coll (Centro de Ciencia y Tecnología Forestal de Cataluña)
Teresa Baiges (Centro de la Propiedad Forestal)

- 1. la migration assistée des populations :** au sein d'une même espèce, les individus présentent une certaine plasticité phénotypique ou physiologique qui peut être de nature adaptative. Cela explique l'existence de sous-espèces ou d'écotypes différents au sein d'une même espèce. Au moment de la plantation, il est important de bien choisir la provenance de l'espèce en fonction des caractéristiques pédoclimatiques actuelles mais aussi de l'évolution attendue.
- 2. Expansion assistée de l'espèce :** il s'agit du déplacement précoce d'espèces vers des zones limitrophes de leur aire de répartition actuelle, dans le but de faciliter et d'accélérer les processus de migration naturelle.
- 3. Migration assistée "longue distance" :** il s'agit d'introduire des espèces dans des territoires qui ne leur seraient pas accessibles par les processus de dispersion naturelle. On choisira alors des espèces supposées mieux adaptées et plus résistantes aux conditions climatiques à venir.

La méthode de migration assistée n'est ni "sans risque" ni "garantie de succès" et fait l'objet de débats. Dans tous les cas, il convient d'appliquer une approche qui limite au maximum les principaux risques, à savoir un caractère invasif ou un risque d'hybridation non souhaitable avec les populations végétales locales. Pour que ces migrations soient réussies, il est nécessaire de bien connaître :

Guide pratique

Gestion pour l'adaptation des forêts pyrénéennes au changement climatique

- L'autoécologie des espèces et les paramètres influençant leur distribution,
- Les causes de mortalité et la part attribuable au changement climatique,
- Les projections climatiques ; étant incertaines à la fin du siècle, il est plus raisonnable de s'appuyer sur des prévisions à moyen terme : 2030-2060.

Dans le cadre de nouvelles plantations forestières, la pertinence de l'utilisation d'espèces ou de provenances caractéristiques de zones plus xériques a été suggérée dans certains milieux : avec une plus grande résistance et capacité d'adaptation à la sécheresse que les espèces indigènes de la région (espèces ou provenances locales). L'utilisation d'espèces qui ne sont pas présentes naturellement dans la forêt nécessite des études préalables approfondies afin de bien caractériser leur adaptabilité, leur capacité de production et même leur potentiel invasif. Ce risque d'invasion biologique est d'autant plus difficile à prévoir qu'il peut se produire sur le long terme. De plus, l'introduction d'espèces dans un nouvel écosystème n'est pas toujours couronnée de succès et de nombreuses plantations échouent pour diverses raisons : problèmes d'adaptation aux nouvelles conditions climatiques, compétition pour les ressources avec la végétation environnante, associations trophiques symbiotiques, etc. Par conséquent, l'introduction de nouvelles espèces dans de nouveaux territoires nécessite une bonne connaissance de l'écologie de l'espèce et une incertitude aussi faible que possible quant aux prévisions climatiques futures. Contrairement à l'introduction de nouvelles espèces, le choix de provenances provenant d'environnements plus secs ou plus chauds est une option plus conservatrice et moins risquée.

À une échelle plus détaillée, les caractéristiques du microsite de plantation contribuent au succès

de la plantation. Ainsi, une fois les semis établis et confrontés à la réduction attendue de la disponibilité en eau en raison d'une demande évaporative accrue, les conditions micro-environnementales du site de plantation détermineront en grande partie leur survie et leur développement ultérieur.

La gestion de la couche herbacée (qui est très compétitive pour les ressources du sol) et le contrôle de la lumière du soleil à laquelle les semis sont exposés peuvent être critiques pour le succès de la plantation. Les méthodes classiques de contrôle de la végétation compétitive comprennent le travail du sol, le désherbage mécanique ou chimique et le paillage (synthétique ou naturel) (Navarro-Cerrillo et al. 2021). Alternativement, la gestion de l'ombrage par les arbres ou la végétation arbustive environnante peut également être utilisée pour limiter le développement de la couche herbacée et ainsi réduire la concurrence à laquelle les semis sont soumis. En outre, la gestion de l'ombrage entraîne une amélioration du microclimat (en réduisant la demande évaporative) et facilite globalement l'établissement et le développement des semis. Ces interactions positives (ou mécanismes de facilitation) entre la végétation existante (généralement ligneuse) et la régénération naturelle ou artificielle ont été observées, en particulier dans des environnements défavorables (Gómez-Aparicio et al. 2004).

Par conséquent, la disponibilité d'expériences scientifiquement conçues, capables de fournir des informations contrastées, est essentielle pour réduire l'échec des futures plantations.

Les fiches ci-jointes présentent les résultats obtenus dans le cadre de plantations forestières de démonstration, établies et suivies dans le cadre des projets CANOPEE et ACCLIMAFOR, financés par le Programme INTERREG V-A Espagne-France-Andorre (POCTEFA). Ces plantations intègrent dans leur conception des critères de migration assistée et de d'associations de plants / « arbuste protecteur ».

Exemples : Plantations démonstratives

1) PLANTATIONS SUR LE VERSANT SUD DES PYRENEES

Lladurs et Gòsol, Catalogne

Conception de la plantation

Au cours du printemps 2018, une plantation de démonstration a été réalisée sur le versant sud des Pyrénées (Catalogne) à l'intérieur et dans la zone

adjacente de six bosquets (entre 0,2 et 0,4 ha) créés en 2011 pour favoriser la régénération du pin sylvestre (*Pinus sylvestris* L.). Trois des bosquets étaient situés à une altitude de 1200 m, dans le "Bosque de Vilanova" (municipalité de Lladurs, région de Solsonès) et les trois autres dans le domaine de "La Collada" (municipalité de Gòsol, région de Berguedà), à une altitude de 1400 m (Fig. 1).

Guide pratique

Gestion pour l'adaptation des forêts pyrénéennes au changement climatique

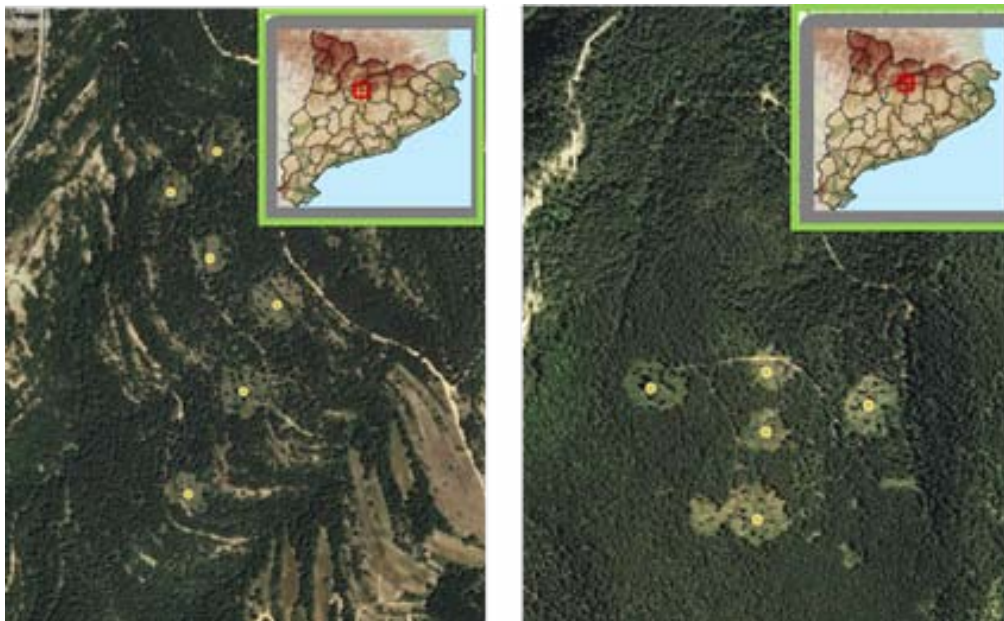


Figure 1 : Bosquets destinées à promouvoir la régénération du pin sylvestre à Lladurs (à gauche) et à Gósol (à droite), où les plantations de démonstration ont été réalisées.

Dans chaque bosquet, 120 plants ont été établis, dont la moitié (60) de l'espèce locale dominante (pin sylvestre) et l'autre moitié (60) de pin laricio (*Pinus nigra Arn.*), l'espèce destinée à migrer au niveau altitudinal. Pour chaque espèce, deux provenances ont été utilisées : une provenance locale (pyrénéenne) et une provenance de zones plus arides (méditerranéenne). Afin de tester l'effet de l'ombrage sur la survie et le développement des semis, la moitié d'entre eux a été plantée à l'intérieur des bosquets (60 semis, 15 par combinaison d'espèces et de provenances) et l'autre moitié sous la canopée du peuplement environnant. De plus, afin d'évaluer le rôle des interactions semis-végétation, des individus ont été établis dans trois conditions micro-environnementales : "sans compétition herbacée" (après application d'herbicide), "sous buisson protecteur" et "compétition herbacée" (Fig. 2).

Après la plantation, la survie et l'état ("vivant", "mort") de tous les semis ont été enregistrés chaque année dans chaque bosquet.



Figure 2. Vue panoramique des bosquets de Lladurs (à gauche) et détail d'un semis de pin sylvestre planté à l'intérieur d'un des bosquets (à droite).

Guide pratique

Gestion pour l'adaptation des forêts pyrénéennes au changement climatique

Résultats et conclusions

Trois ans après la plantation, la survie des plantules établies après l'application d'un herbicide était très faible, probablement en raison de problèmes liés à l'application du produit. Il a donc été décidé de renoncer à cette approche et d'évaluer les résultats uniquement pour les micro-environnements "avec concurrence herbacée" et "sous buisson nourricier".

En général, la survie des semis a été plus élevée dans l'exploitation Gòsol, atteignant des niveaux d'environ 75 %. En raison de sa situation, cette exploitation a une pluviométrie plus élevée que celle de Lladurs et, en général, une couche herbacée moins développée, ce qui devrait favoriser la survie et le développement des semis (Fig. 3).

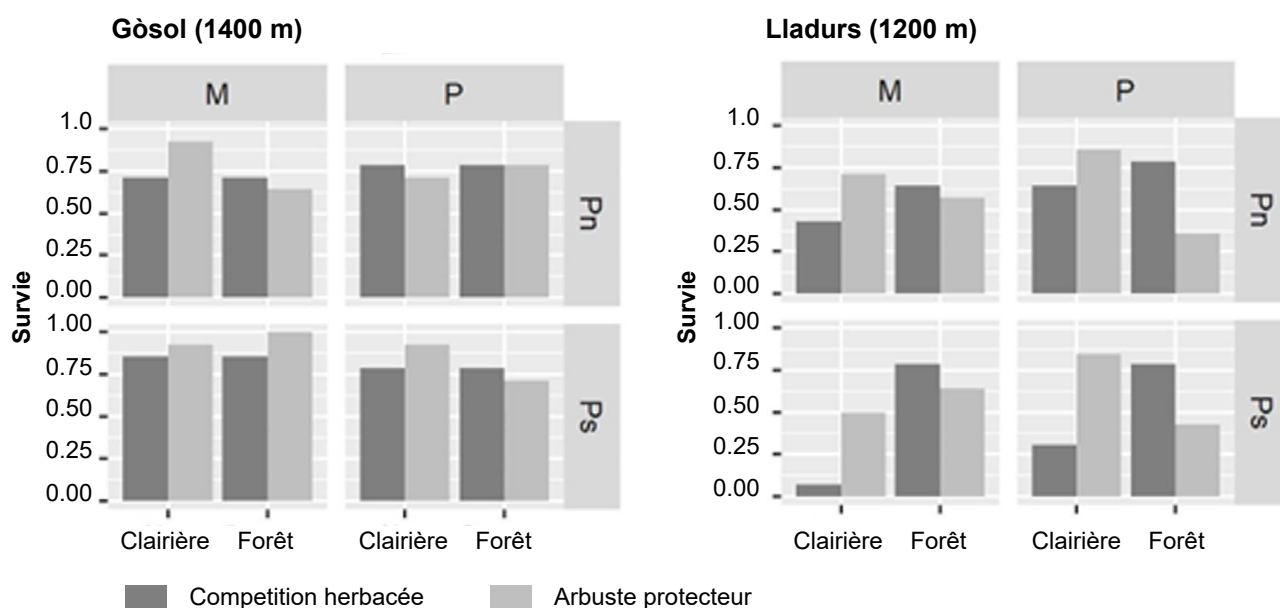


Figure 3 : Survie des semis établis dans les propriétés de Gòsol et de Lladurs, à l'intérieur du taillis (clair) et sous la canopée environnante (forêt). En gris foncé, les semis établis sans contrôle de la végétation herbacée et en gris clair, les semis établis sous un buisson protecteur. Les deux figures supérieures correspondent à des semis de Pinus nigra (Pn) et les deux figures inférieures à des semis de Pinus sylvestris (Ps). La colonne de gauche représente les plants d'origine méditerranéenne (M) et la colonne de droite les plants d'origine pyrénéenne (P).

Dans la propriété de Lladurs, située à une altitude plus basse et soumise à un régime hydrique moins favorable, une augmentation de la survie des plantules établies dans la clairière a été observée lorsqu'elles se sont développées sous la protection d'un buisson protecteur. Ces résultats indiquent un processus de facilitation du buisson protecteur, probablement lié au différentiel de rayonnement et à la réduction consécutive de l'évapotranspiration des plantules. Il n'est pas non plus exclu que la réduction du développement de la végétation herbacée à la base de l'arbuste, induite par l'ombrage, réduise la compétition pour les ressources du sol à laquelle la plantule est soumise. Cette compétition semble particulièrement intense au vu du faible taux de survie (inférieur à 50%) de trois des quatre combinaisons espèces/provenances testées.

D'autre part, lors de l'analyse des semis établis sous la canopée du peuplement forestier environnant,

une survie plus faible a été observée pour les semis plantés sous l'arbuste protecteur. Dans ces conditions, la lumière disponible pour les semis est très faible (en raison de l'effet conjoint de l'interception de la lumière par la canopée de l'arbre et par l'arbuste), atteignant des niveaux qui sont probablement létaux pour leur survie, étant donné le tempérament des deux espèces (pénombre dans les premiers stades de développement).

Après trois saisons de croissance, aucune différence notable de survie n'a été observée entre les espèces et les provenances testées.

Ces résultats présentent une double lecture. D'une part, ils montrent la robustesse de l'espèce et de la provenance locale (pin sylvestre des Pyrénées), qui se comporte de la même manière (en termes de survie) que les semis d'espèces et de provenances caractéristiques de zones plus exigeantes en eau.

Guide pratique

Gestion pour l'adaptation des forêts pyrénéennes au changement climatique

D'autre part, les résultats montrent la capacité du pin laricio et des provenances méditerranéennes à survivre et à s'établir dans ces zones et donc la pertinence de leur utilisation potentielle à des fins de reboisement dans un scénario de changement climatique sévère.

Enfin, il est important de mentionner la nécessité de continuer à surveiller le développement de ces plantations à court et à moyen terme, afin d'évaluer plus en détail le développement et la croissance des différentes espèces et provenances et d'avoir ainsi plus d'informations sur la pertinence de leur utilisation à des fins de reboisement.

Forêts publiques et privées du Pays Basque

Conception de la plantation

Au cours de la période 2020-2022, des plantations de différentes espèces ont été réalisées dans plusieurs forêts publiques et privées du Pays Basque afin de tester leur capacité d'adaptation au changement climatique (Fig. 4). Les espèces utilisées sont les suivantes : *Pinus pinaster*, *Abies grandis*, *Cedrus atlantica*, *Cryptomeria japonica*, *Picea sitchensis*, *Pinus taeda*, *Pinus brutia* et *Pinus radiata* (variétés commerciales et résistantes à la bande rouge).

Différentes provenances de pin maritime ont également été testées dans des plantations : (i) basques (A1, B1, Lapzide, Arza), (ii) aquitaines (VG2, VG3), (iii) galiciennes (Bóveda et Vilalba) et (iv) de la vallée de Tiétar.



Figure 4 : Localisation des plantations (points jaunes, à gauche) et détail de la pépinière où certains des plants utilisés ont été produits (à droite).

2) PLANTATIONS SUR LE VERSANT NORD DES PYRENEES

Celles, Ariège 09, Occitanie

Une plantation expérimentale de Douglas a été réalisée en février 2020 à Celles (Ariège, Occitanie), sur le versant nord des Pyrénées françaises (Fig. 5). L'objectif de cette plantation est de tester deux provenances différentes de celles historiquement utilisées dans la région en termes de résistance à la sécheresse estivale. En outre, l'objectif est de comparer, à moyen terme, les différences de productivité entre les deux nouvelles provenances et la provenance précédemment utilisée sur le même

site, qui a été coupé à blanc l'hiver précédent (en 2019).

La plantation a été réalisée sur 10 ha d'une exploitation située à une altitude de 650-700 m, sur une pente modérée (30 % à 40 %) et orientée vers le nord. Le sol est profond (> 60 cm), de texture limoneuse et d'acidité modérée (pH = 6).

Les deux provenances testées sont Luzette et Washington 2. La plantation a été réalisée dans un cadre de 3 x 3 m (1100 individus/ha), avec des plants en conteneurs de 200 cm³ (Fig. 6).

Guide pratique

Gestion pour l'adaptation des forêts pyrénéennes au changement climatique

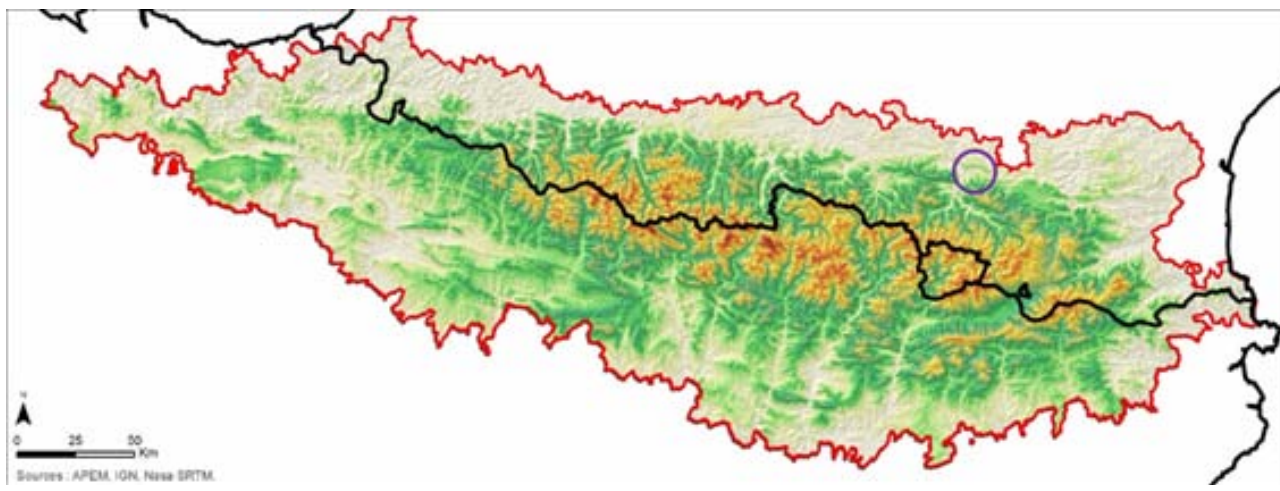


Figure 5 : Localisation de la plantation expérimentale dans le massif pyrénéen (cercle violet).

Deux mois après la plantation (avril 2020), la hauteur, l'état de santé et les dommages potentiels causés par l'abrutissement aux semis établis ont été caractérisés sur le terrain. Il est prévu de répéter ces mesures 1, 2, 3 et 5 ans après la plantation (et tous les 5 ans par la suite).



Figure 6 : Gros plan sur des semis de douglas établis. L'image de gauche montre la provenance Luzette et l'image de droite montre la provenance Washington 2.

Rieucazé, Haute-Garonne, Occitanie

Conception de la plantation

L'objectif de cette plantation est de tester l'opportunité de convertir une forêt mixte de taille moyenne, composée de chênes, de hêtres et de châtaigniers, en plantation de douglas. Une plantation expérimentale de Douglas a été réalisée en février 2019 à Rieucazé (Haute-Garonne, Occitanie), sur le versant nord des Pyrénées françaises (Fig. 7).

La plantation a été établie sur 2 hectares de la formation précédente qui ont été coupés pendant l'hiver 2017-2018. A des fins de comparaison, une petite parcelle a été conservée non coupée. L'hiver suivant (2019), des plants des deux provenances ont été établis dans 3 parcelles : une parcelle avec la provenance Luzette, une parcelle avec la provenance Californienne et une parcelle avec les deux provenances. Les plants ont été établis à racines nues suivant un cadre de plantation de 4 x 3 m (833 individus/ha).

Guide pratique

Gestion pour l'adaptation des forêts pyrénéennes au changement climatique

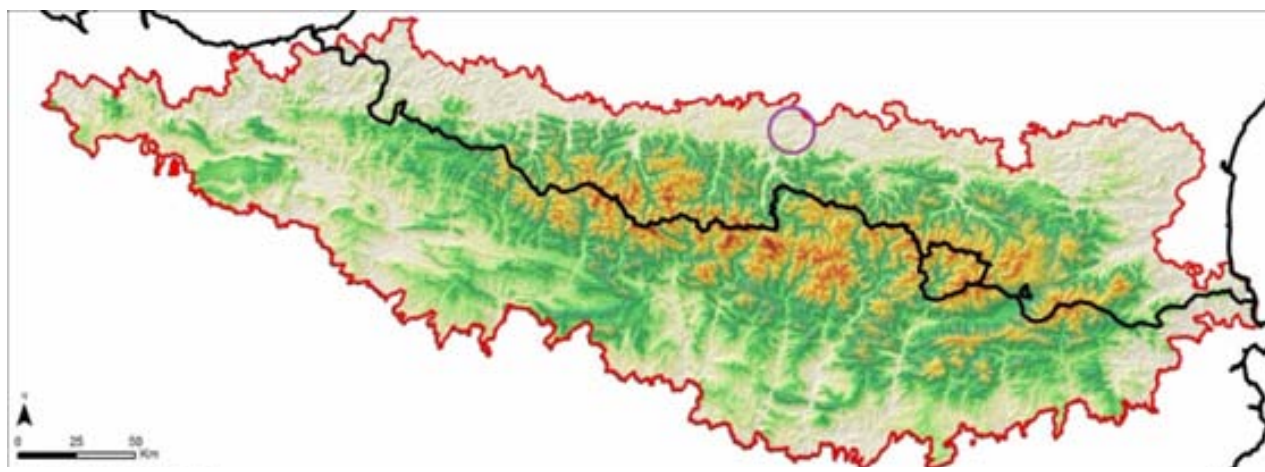


Figure 7 : Localisation de la plantation expérimentale dans le massif pyrénéen (cercle violet).

Après la plantation, la croissance en hauteur, l'état de santé et les dommages causés par l'abroustissement des jeunes plants ont été caractérisés. Le même suivi sera effectué annuellement pendant les 5 premières années après la plantation et tous les 5 ans à partir de la 5ème année.

Cardeilhac, Haute-Garonne, Occitanie

Conception de la plantation

L'objectif de cette plantation est de tester la plantation en parallèle de deux espèces de chênes qui s'hybrident déjà naturellement en forêt : le chêne pubescent (*Quercus pubescens*) et le chêne sessile (*Quercus petraea*).

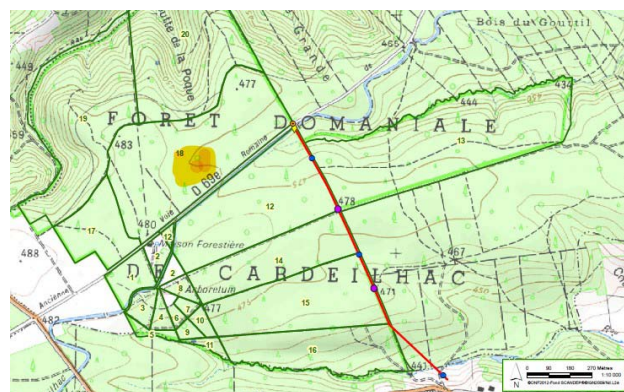
L'hybridation est un facteur d'adaptation au changement climatique comme l'a récemment écrit Antoine Kremer dans un article (Kremer et al., 2020) : "L'hybridation joue également un rôle clé dans l'adaptation de ces espèces [de chênes], par le transfert d'allèles bénéfiques entre différentes espèces, illustré par l'adaptation au froid du chêne sessile dans les forêts pyrénéennes".

On peut supposer que ces mêmes mécanismes sont déjà à l'œuvre dans le contexte du changement actuel. Les chênes dits tempérés (*petraea*, *robur*) ont des espèces apparentées au tempérament plus méditerranéen (*pubescens*, *faginea*, etc.), avec lesquelles ils ont maintenu une interfécondité. Ces dernières pourraient, par introgression adaptative, contribuer à favoriser l'adaptation des chênes tempérés aux changements climatiques en cours."

La parcelle 18 de la forêt domaniale de Cardeilhac (Haute-Garonne) a subi un incendie en 2013, puis, en 2020, une tempête qui a abattu tous les arbres déstabilisés restants.

En décembre 2021, sur cette parcelle, deux placettes ont été plantées côte à côte :

- 1 920 plants de chêne pubescent (Provenance Gascogne) sur 1,12 ha, soit 1714 plants / ha.
- 500 plants de chêne sessile (de Gascogne) sur 0,47 ha, soit 1064 plants/ha.



Guide pratique

Gestion pour l'adaptation des forêts pyrénéennes au changement climatique

Les deux plantations sont situées dans la région du plateau de Lannemezan. Localement, la parcelle est située sur un petit plateau à 475 m d'altitude, donc avec très peu de pente.



Les deux plantations feront l'objet d'un suivi pour détecter les différences de croissance et de résistance à la sécheresse, mais aussi, à long terme, pour l'hybridation dans le cadre de la production de semences. L'objectif est de combiner dans la descendance les bonnes qualités technologiques

Le climat est relativement doux et humide avec 900 mm/an (200 mm en juin/juillet/août). La température moyenne annuelle est de 11-12°, et la température maximale moyenne en août est de 25-26°. Le climat local est sous influence atlantique et montagnarde.

Le sol est composé d'argile avec des galets provenant de l'érosion des Pyrénées. Les sols sont acidophiles, avec une texture argileuse et une tendance à l'hydromorphie.



Fiches descriptives des plantations réalisées

dans le cadre des projets CANOPEE et ACCLIMAFOR

Les fiches descriptives contenant les détails techniques des plantations sont disponibles sur le géoportail de l'OPCC : <https://www.opcc-ctp.org/es/geoportal>

	Région	Espèce	Objetif	Densité (pies/Ha)	An-née	Responsable
1	Occitanie	Abeto Douglas (<i>Pseudotsuga menziesii</i>)	Tester 2 provenances (Luzette y California) et leur combinaison	780	2018	CNPF
2	Occitanie	Abeto Douglas (<i>Pseudotsuga menziesii</i>)	Tester 2 provenances (Luzette y California) et leur combinaison	1.100	2020	CNPF
3	Occitanie	Chêne Pubescent (<i>Quercus pubescens</i>) - Provenance Languedoc	Provoquer l'hybridation avec le Chêne sessile (Kremer et al., 2020)	1714	2020	ONF
4	Occitanie	Chêne sessile (<i>Quercus petraea</i>) - Provenance Gascogne	Provoquer l'hybridation avec le Chêne pubescent (Kremer et al., 2020)	1064	2020	ONF
5	Catalogne	Pin noir (<i>Pinus nigra Arn.</i>)/Pin sylvestre (<i>Pinus sylvestris</i>)	Tester 2 provenances de chaque espèce : une locale (pyrénéenne) et une provenant de zone plus sèche (méditerranée). Plantation expérimentale en bosquets ouverts dans un peuplement de pin sylvestre.	300-600	2020	CTFC

Bibliographie

Gómez-Aparicio L., Zamora R., Gómez J.M., Hódar J.A., Castro J., Baraza E. 2004. Applying plant positive interactions to reforestation in Mediterranean mountains: a meta-analysis of the use of shrubs as nurse plants. *Ecological Applications* 14: 1128–1138.

Mueller J.M., Hellmann J.J. 2008. An assessment of invasion risk from assisted migration. *Conservation Biology* 22(3): 562-567.

Navarro-Cerrillo R., Ceacero C.J., Coello J., del Campo A. 2021. Control de la competencia en repoblaciones forestales. En: Pemán J., Navarro-Cerrillo R., Prada M.A., Serrada R. (coord.). Bases técnicas y ecológicas del proyecto

de repoblación forestal. Tomo 1. pp 884-935. Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. Madrid.

Serrada R., Aroca M.J, Roig S., Fravo A., Gómez V. 2011. Impactos, vulnerabilidad y adaptación al cambio climático en el sector forestal. Notas sobre gestión adaptativa de las masas forestales ante el cambio climático. Ministerio de medio ambiente y medio rural y marino. Madrid. 129 p. ISBN: 978-84-491-1131-0.

Ste-Marie C., Nelson E.A., Dabros A., Bonneau M.E. 2011. Assisted migration: Introduction to a multifaceted concept. *The Forestry Chronicle* 87(6): 724-730.

