

# PROJET REDSURF

RÉDUCTION DE LA SURFACE FOLIAIRE OU TERRIÈRE  
PEUT-ON RENDRE LES FORÊTS MOINS SENSIBLES À LA  
SÉCHERESSE PAR LA SYLVICULTURE ?



## CONTEXTE ET OBJECTIFS DU PROJET

Dans le contexte du changement climatique et compte tenu de l'âge d'exploitabilité des peuplements, le climat en fin de révolution de ces peuplements sera probablement très différent de celui connu lors de l'installation. Des mesures de gestion adaptative, passant par le contrôle du couvert forestier, pourraient permettre de réduire leur consommation en eau et donc de faire face aux périodes de stress hydrique. De nombreux gestionnaires se questionnent sur la façon d'appliquer cette réduction du feuillage par l'éclaircie ou l'élagage à l'intérieur du peuplement. Ce projet vise à progresser sur cette question en évaluant les effets des interventions sylvicoles par une approche associant expérimentation (analyse des variations intra-annuelle et inter-annuelle d'indicateurs de comportement vis-à-vis du climat) et modélisation (modèles BILJOU et Sureau).

## CONTENU DU PROJET



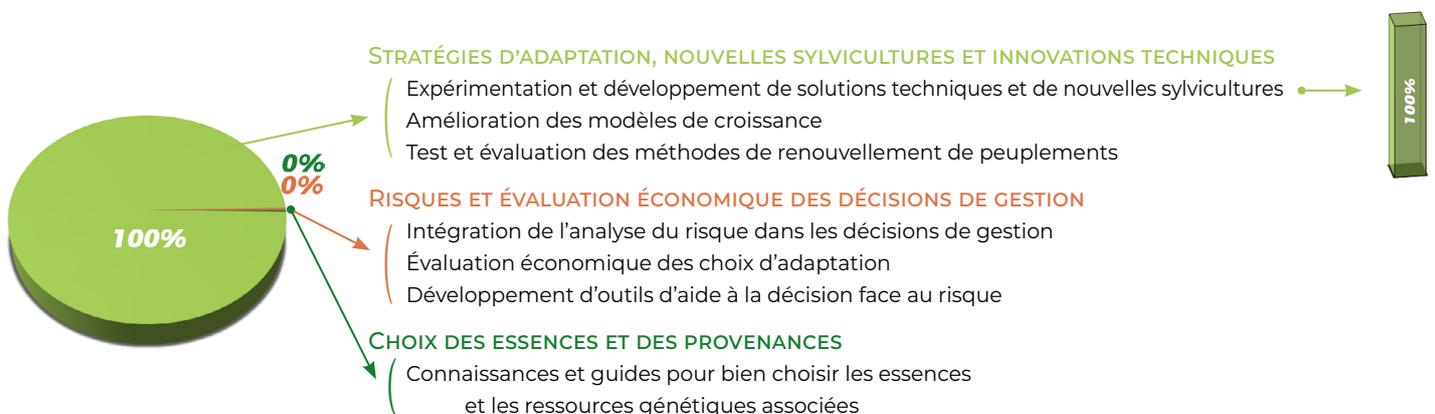
Le projet se scinde en quatre parties (Fig. 1) :

- Une caractérisation de la sécheresse (climat, sol) et de la végétation pour fournir des indications précises du contexte dans lequel les effets ont été quantifiés et fournir des données d'entrée aux modèles ;
- Une étude des effets de la sylviculture sur les indicateurs de comportement (état sanitaire, croissance, variables écophysiological) ;
- Des simulations à différentes densités avec des valeurs du climat prédites par deux scénarios climatiques ;
- La rédaction d'un référentiel présentant le fonctionnement hydrique des arbres forestiers.



Figure 1 : Aperçu du dispositif de Comefroide-Picaussel dans deux modalités.  
Légende : témoin à gauche et éclaircie à droite.

## CONTRIBUTION DU PROJET AUX THÉMATIQUES D'AFORCE



## PARTENAIRES DU PROJET

## MATÉRIEL ET MÉTHODES

### Essences étudiées

Deux espèces ont été étudiées : le Sapin pectiné sensible à la sécheresse et le Cèdre de l'Atlas réputé plus résistant. Pour chaque espèce, un dispositif expérimental sylvicole a été utilisé en situation exposée d'un point de vue climatique.

### Dispositifs expérimentaux

#### Dispositif sylvicole de Comefroide-Picaussel

L'essence présente est le Sapin pectiné.

Deux modalités ont été étudiées : un témoin à 415 tiges/ha et 42m<sup>2</sup>/ha lors de l'installation et une modalité à faible densité (éclaircie ayant supprimé 50 % de la surface terrière) à 205 tiges/ha et 22 m<sup>2</sup>/ha.

Les mesures réalisées sont : le déficit foliaire des arbres objectifs, l'indice foliaire (LAI) grâce au « LAI2000 » et enfin le LAI du sous-bois par le biais de relations phytovolume - surface des feuilles.

### Modélisation

Des estimations de bilan hydrique et de risque de cavitation ont été réalisées à partir des modèles Biljou© et SurEau, dans les deux dispositifs.

- Biljou©<sup>1</sup> modélise les différentes composantes du bilan hydrique. Ce modèle permet de déduire le contenu en eau du sol disponible pour les plantes chaque jour et de calculer des indicateurs de stress hydrique (sa durée et son intensité).
- Sureau<sup>2,3</sup> modélise (en plus du bilan hydrique) le potentiel hydrique du sol et de la plante, le risque de défaillance hydraulique causée par la cavitation et le dessèchement.

Ces deux modèles sont alimentés par des données climatiques journalières, un indice foliaire (LAI) et par des caractéristiques du sol pour chaque horizon.

Une comparaison des sorties de SurEau et de Biljou© a été réalisée afin de s'assurer que leurs résultats étaient similaires pour des conditions initiales identiques. Ensuite, une majorité des résultats ont été produits avec le modèle SurEau.

Plus d'informations sur les données d'entrées et sur les processus de simulations sont disponibles dans le [rapport final](#).

## RÉSULTATS

### Effet de la sylviculture sur les indicateurs de comportement (Fig. 2)

#### État sanitaire

**Dans le dispositif de Comefroide-Picaussel (Sapin pectiné) :**

L'éclaircie n'a pas eu d'effet bénéfique sur l'évolution du déficit foliaire.

**Dans le dispositif de Valliguières (Cèdre de l'Atlas) :**

Sujet à des nécroses cambiales responsables d'écoulement de résine, les données font apparaître une relation négative entre fréquence des symptômes et stress hydrique, à la fois temporellement et spatialement.

Une hypothèse du développement uniforme des nécroses pourrait être l'intervention d'un parasite de faiblesse, le champignon *Sphaeropsis sapinea*.

#### Croissance (analyse des largeurs de cernes)

**Dans le dispositif de Valliguières (Cèdre de l'Atlas) :**

Le signal correspondant à une interaction entre densité et climat a été isolé à l'aide d'un modèle à effets mixtes. Un effet positif de l'éclaircie est constaté pendant cinq ans après l'éclaircie sur la relation croissance - climat pour les densités extrêmes (10 et 40 m<sup>2</sup>/ha). Cet effet s'estompe après cinq ans. Il peut être dû à la disponibilité en eau et en lumière, mais peut aussi provenir de la mobilisation des réserves carbonées.

#### Dispositif sylvicole de Valliguières

L'essence présente est le Cèdre de l'Atlas.

16 modalités ont été étudiées : une première éclaircie a eu lieu en 1992 conduisant à quatre densités, avec pour chacune quatre hauteurs d'élagage réalisée entre 1992 et 1996.

Les mesures réalisées sont : les ressources en eau du sol, le LAI du peuplement par photographie hémisphérique, la résistivité électrique du sol, le potentiel hydrique foliaire, la présence de cavitation, l'année d'apparition de nécroses cambiales et enfin la mesure des accroissements annuels.

#### Potentiels hydriques et cavitation

**Dans le dispositif de Valliguières (Cèdre de l'Atlas) :**

Malgré la fermeture du couvert dans tous les traitements, les mesures de potentiel hydrique foliaire montrent que les arbres des parcelles éclaircies subissent moins de stress hydrique. Les parcelles à forte densité présentent un risque plus élevé de défaillances hydrauliques face aux parcelles très éclaircies.

Espèce	Variante mesurée	Statut	Effet des éclaircies sur la variable
Sapin pectiné	Déficit foliaire	lien avec le stress hydrique fortement suspecté	Aucun effet favorable
Cèdre de l'Atlas	Écoulements de résine et nécroses cambiales	lien avec le stress hydrique non établi (non déclenchant, éventuellement prédisposant)	Apparition favorisée par le développement du houppier 8 - 12 ans après traitement (effet défavorable de l'éclaircie et favorable de l'élagage d'autant plus que l'éclaircie est forte). Aucun effet après 8-12 ans.
	Part de la croissance annuelle dépendante du climat	En grande partie lié au stress hydrique	Effet favorable pendant les cinq ans suivant l'éclaircie, puis plus d'effet ensuite
	Potentiel hydrique de base	directement lié au stress hydrique	Augmentation du potentiel hydrique (diminution du stress hydrique) encore 25 ans après l'éclaircie
	Proportion de cavitation dans le bois	directement lié au stress hydrique	Réduction du taux de cavitation encore 25 ans après éclaircie

Figure 2 : Effets des éclaircies sur les variables mesurées dans les dispositifs expérimentaux.

## Caractérisation de la sécheresse (climat, sol) et de la végétation

### Développement du sous-bois et indice foliaire (LAI)

Dans les deux dispositifs, le développement du sous-bois est lié à l'ouverture du couvert par les éclaircies.

Une fois que la compensation totale de l'indice foliaire par le développement du sous-bois est effective, les effets bénéfiques attendus de l'éclaircie sont minimes.

### Estimation de la réserve utile

Cette estimation par la méthode classique (description du profil de sol par creusement de fosses pédologiques) était suffisante pour le dispositif de Comefroide-Picaussel (Sapin pectiné) mais conduisait à des sous-estimations très importantes dans le dispositif de Valliguières (Cèdre de l'Atlas).

Des mesures de résistivités électriques du sous-sol ont montré que le prélèvement d'eau par les arbres se produisait jusqu'à des profondeurs de trois à six mètres, plus importantes que celles des fosses pédologiques (0,4 à 1 mètres).

De plus, ces mesures indiquent que l'accès à l'eau varie spatialement au sein des parcelles et entre les parcelles.

## Simulations

### Dans le dispositif de Valliguières (Cèdre de l'Atlas) :

Les valeurs simulées de teneur en eau relative du sol utilisable (REW) et du nombre de jours de stress (i.e.  $REW < 0.4$ ) par les modèles Biljou et Sureau sont cohérentes.

Sureau prédit un écart de potentiel hydrique entre les traitements (témoin à 1200 tiges/ha et éclairci à 400 tiges/ha) se traduisant par une différence de cavitation. Sureau tend à surestimer légèrement l'effet du traitement sur le potentiel hydrique. Les analyses de sensibilité ont démontré que l'essentiel de l'écart de potentiel hydrique et de cavitation simulés entre les traitements est causé par les différences d'indice foliaire (LAI).

Les simulations sous changement climatique (Fig. 3) montrent une augmentation du taux de cavitation sous les différents scénarios avec la majorité des modèles climatiques ainsi que pour la trajectoire moyenne. Toutefois, l'augmentation du taux de cavitation est fortement atténuée dans le peuplement éclairci.

### Dans le dispositif de Comefroide-Picaussel (Sapin pectiné) :

Les valeurs simulées de REW et du nombre de jours de stress (i.e.  $REW < 0.4$ ) par les modèles Biljou© et Sureau sont cohérentes.

Les simulations montrent un fort effet positif de l'éclaircie sur la REW, qui ne passe jamais sous la limite de 0.4. L'effet bénéfique de l'éclaircie sur le potentiel hydrique et sur le risque de cavitation simulés par Sureau est supérieur devant l'effet négatif du sous-bois. Le taux de cavitation reste modeste à l'exception de l'année 2003 dans le témoin.

Les simulations sous changement climatique (Fig. 4) suggèrent que le climat futur, pourrait entraîner des taux de cavitation importants sous le scénario le plus sévère. En revanche, éclaircir réduirait considérablement ce risque de cavitation.

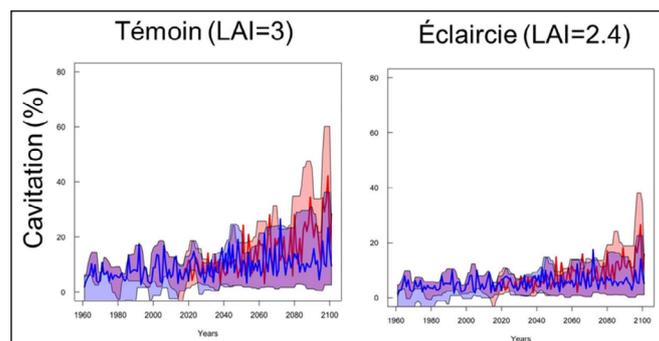


Figure 3 : Taux de cavitation (PLC) en pourcentage prédit par le modèle Sureau sous les scénarios de changement climatique RCP8.5 (rouge) et RCP4.5 (bleu) dans le dispositif de Valliguières.

Légende : Les traits gras montrent la trajectoire moyenne et les zones plus pâles l'écart-type de l'ensemble des modèles climatiques sélectionnés.

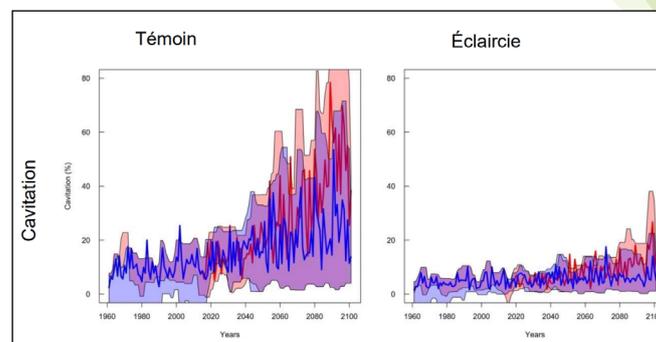


Figure 4 : Taux de cavitation (PLC) en pourcentage prédit par le modèle Sureau sous les scénarios de changement climatique RCP8.5 (rouge) et RCP4.5 (bleu) dans le dispositif de Comefroide-Picaussel.

Légende : Les traits gras montrent la trajectoire moyenne et les zones plus pâles l'écart-type de l'ensemble des modèles climatiques sélectionnés.

## LES PRINCIPAUX ENSEIGNEMENTS

Les différences constatées d'état sanitaire ne semblent pas être dépendantes du seul bilan hydrique ni de l'éclaircie. L'éclaircie améliore la croissance dépendante du climat en conditions sèches, réduit le stress hydrique et diminue le risque de cavitation.

Les simulations sous ces scénarios de changement climatique montrent une augmentation du risque de cavitation, surtout chez les sapins. Ce risque semble toutefois atténué par l'éclaircie.

Les incertitudes concernant la surface foliaire et la réserve utile du sol, auxquelles les modèles sont sensibles, restent cependant fortes.

# PUBLIC CIBLE ET FINALITÉ DU PROJET

Difficulté d'appropriation :  FAIBLE  MOYENNE  FORTE Absence de cette finalité pour ce public :

<b>FINALITÉ</b> <b>PUBLIC CIBLE</b>	<b>Gestion</b> Outils et recommandations	<b>Recherche et développement</b> Outils et création de contenu	<b>Pédagogie</b> Acquisition des connaissances
<b>Propriétaires forestiers</b>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>
<b>Personnel forestier technique</b>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
<b>Acteurs de la recherche et du développement</b>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>
<b>Étudiants de l'enseignement supérieur</b>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>
<b>Étudiants de l'enseignement technique</b>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

Ce projet est principalement à destination des organismes de la recherche et du développement et présente un intérêt pédagogique évident pour les étudiants de l'enseignement supérieur.

Un référentiel pédagogique, à destination des chercheurs et des praticiens, est disponible. Il décrit le fonctionnement hydrique des arbres forestiers ainsi que les processus de modélisation de celui-ci.

## CASTING

Le coordinateur du projet est M. François Courbet (INRAE, Avignon).

Ce projet a été mené avec la participation de M. Eric Badel, M. William Brunetto, M. Simon Carrière, M. Arnaud Chapelet, M. Jean-Marie Chiappara, M. Hervé Cochard, Mme Florence Courdier, M. Claude Doussan, M. Pierre-Jean Dumas, Mme Hélène Fargeon, M. Olivier Gilg, M. Damien Gounelle, M. Arnaud Jouineau, M. Icham Jouineau, M. Nicolas Mariotte, M. Olivier Marloie, M. Nicolas Martin-St Paul et M. Guillaume Simioni (INRA) ; de Mme Isabelle Dottarelli, M. Jean Ladier et M. Charles Tessier (ONF) et enfin de M. Philippe Riou-Nivert (CNPFF-IDF).

## POUR OBTENIR PLUS D'INFORMATIONS

Plus d'informations sur la [page projet REDSURE](#) du RMT AFORCE.

Retrouvez [ici](#) le référentiel pédagogique « Forêts et changement climatique : comprendre et modéliser le fonctionnement hydrique des arbres ».

<sup>1</sup> Granier A., Bréda N., Biron P., Villette S. 1999. A lumped water balance model to evaluate duration and intensity of drought constraints in forest stands. Ecological Modelling 116, 269–283.

<sup>2</sup> B Ruffault J., Martin-St-Paul N., Rambal S., Mouillot F. 2013. Differential regional responses in drought length, intensity and timing to recent climate changes in a Mediterranean forested ecosystem. Climatic Change 117:103–117.

<sup>3</sup> Martin-St Paul N.K., Delzon S., Cochard H. 2017. Plant resistance to drought depends on timely stomatal closure. Ecology Letters 20: 1437-1447.

## FINANCEURS DU PROJET

