



Projet REDSURF : Peut-on rendre les forêts moins sensibles à la sécheresse par la sylviculture ? Effet de la réduction de la surface foliaire et de sa répartition dans le peuplement. Approches empirique et fonctionnelle. Rapport final d'activité

Francois Courbet, Nicolas Martin-StPaul, Guillaume Simioni, Claude Doussan, Jean Ladier

► **To cite this version:**

Francois Courbet, Nicolas Martin-StPaul, Guillaume Simioni, Claude Doussan, Jean Ladier. Projet REDSURF : Peut-on rendre les forêts moins sensibles à la sécheresse par la sylviculture ? Effet de la réduction de la surface foliaire et de sa répartition dans le peuplement. Approches empirique et fonctionnelle. Rapport final d'activité. [Contrat] 2019. hal-02791401

HAL Id: hal-02791401

<https://hal.inrae.fr/hal-02791401v1>

Submitted on 5 Jun 2020

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Projet REDSURF :

Peut-on rendre les forêts moins sensibles à la sécheresse par la sylviculture ? Effet de la réduction de la surface foliaire et de sa répartition dans le peuplement. Approches empirique et fonctionnelle.

F. Courbet, N. Martin-St Paul, G. Simioni (INRA-URFM)

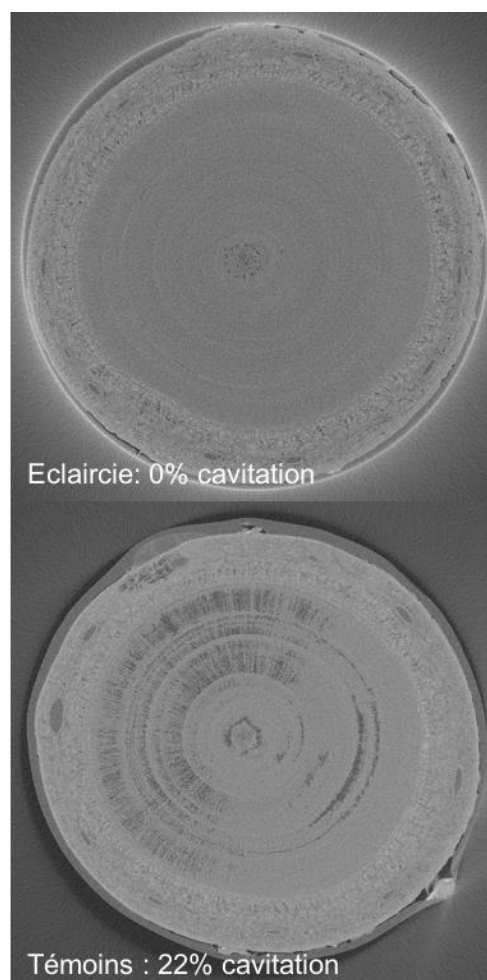
C. Doussan (INRA-EMMAH)

J. Ladier (ONF)

Porté par l'INRA dans le cadre du RMT AFORCE (Réseau Mixte Technologique consacré à l'Adaptation des Forêts au Changement Climatique), avec la participation de l'Office National des Forêts.

Durée du projet : 1^{er} avril 2017 - 31 décembre 2018

Rapport final d'activité



SOMMAIRE

1. Contexte, enjeux et objectifs du projet

2. Partenariat et pilotage

3. Étapes du travail. Déroulement du projet

3.1 Dispositifs expérimentaux

3.1.1 Dispositif expérimental de Valliguières (30)

3.1.2 Dispositif expérimental de Comefroide-Picaussel (11)

3.2 Opérations et mesures réalisées

3.2.1 Dispositif sylvicole de Valliguières (cèdre)

- Mesures dendrométriques et observations sanitaires réalisées sur le peuplement et les arbres abattus
- Estimation de l'indice foliaire
- Mesures réalisées sur le sous-bois
- Mesures écophysiologiques
- Mesures et observations du sol

3.2.2 Dispositif sylvicole de Comefroide-Picaussel (sapin pectiné)

- Mesures dendrométriques et observations sanitaires réalisées sur le peuplement
- Estimation de l'indice foliaire
- Mesures réalisées sur le sous-bois
- Mesures et observations du sol

3.3 Modèles utilisés

4. Résultats

4.1 Dispositif sylvicole de Valliguières (cèdre)

4.1.1 Résultats dendrométriques

4.1.2 Analyse des nécroses cambiales et canaux résinifères

4.1.2.1 Niveau peuplement

4.1.2.2 Niveau intra-arbre (analyse des rondelles)

- Chronologie des nécroses. Lien avec les canaux résinifères.
- Nécroses et âge cambial
- Hauteurs des nécroses dans l'arbre
- Orientation des nécroses
- Liaison nécroses-croissance-climat (période 2001-2017)
- Lien avec la croissance
- Lien avec le climat et les indices de stress

- 4.1.3 Analyse des largeurs de cerne
- 4.1.4 Sous-bois
- 4.1.5 Estimation du LAI. Photos hémisphériques
- 4.1.6 Variables et traits écophysologiques
- 4.1.7 Caractérisation du substrat
- 4.1.8 Analyse spatialisée
- 4.2 Dispositif sylvicole de Comefroide-Picaussel (sapin)
 - 4.2.1 Résultats dendrométriques
 - 4.2.2 État sanitaire
 - 4.2.3 Estimation de l'indice foliaire
 - 4.2.4 Sous-bois
 - 4.2.5 Mesures et observations du substrat
- 4.3 Simulations
 - 4.3.1 Dispositif sylvicole de Valliguières (cèdre)
 - Biljou
 - NOTG
 - 4.3.2 Dispositif sylvicole de Comefroide-Picaussel (sapin)
 - Biljou

5. Référentiel

6. Conclusions-Valorisation

7. Références bibliographiques

Annexe 1. Liste des personnes impliquées dans le projet (hors personnel administratif) et répartition par tâche.

Annexe 2 : plan du dispositif de comparaison de modalités d'éclaircie et d'élagage du Cèdre de l'Atlas. Forêt communale de Valliguières (30).

Annexe 3. Plan de répartition et numérotation des fosses pédologiques. Dispositif expérimental de Valliguières (cèdre).

Annexe 4. Résultats dendrométriques du dispositif de Valliguières.

Annexe 5. Relations allométriques entre diamètre, extension et biomasse d'aiguilles (mesures réalisées sur cèdre dans le dispositif de Valliguières).

Annexe 6. Paramètres utilisés par les simulations réalisées avec Biljou et Sureau.

Annexe 7a. Réunions de coordination du projet.

Annexe 7b. Sommaire du référentiel

Annexe 7c. Composition du comité de contributeurs-relecteurs du référentiel.

Annexe 7d. Difficultés rencontrées au cours du projet.

1. Contexte, enjeux et objectifs du projet

La rapidité et l'ampleur du changement climatique en cours et à venir pose des défis majeurs et sans précédent à la forêt française. Compte tenu de l'âge d'exploitabilité moyen des peuplements (de 50 à 100 ans), le climat que connaîtront les peuplements forestiers en fin de révolution sera très différent de celui qu'ils ont connu au moment de leur installation. Les questions d'adaptation sont donc au centre des préoccupations des forestiers (Legay, 2015). Au terme imposé, on ne peut raisonnablement compter ni sur l'adaptation génétique trans-générationnelle des peuplements en place, ni sur la migration naturelle (particulièrement en plaine compte tenu des distances à franchir en un temps réduit) pour répondre aux enjeux.

Cela nécessite de prendre des mesures adaptatives pour les peuplements en place qui peuvent prendre deux directions complémentaires :

- la substitution des espèces vulnérables par du matériel forestier plus adapté installé en reboisement. Cette voie nécessaire fait l'objet de nombreux programmes de recherche et développement;
- le contrôle du couvert par la sylviculture.

Cette dernière action se base sur l'hypothèse que la suppression d'une partie du feuillage par l'éclaircie ou l'élagage de branches vertes améliore le bilan hydrique des arbres en peuplement par la diminution de la consommation en eau (e.g. Guillemot et al. 2015 ; Rodriguez-Calcerrada et al. 2011 ; Sohn et al. 2016). Si la plupart des travaux ont montré qu'une réduction de la compétition aboutissait bien à un meilleur confort hydrique des arbres, militant ainsi pour une réduction de la densité des peuplements, les gestionnaires se posent des questions sur la façon d'appliquer cette réduction à l'intérieur du peuplement. À quel stade intervenir? Une éclaircie trop forte ne risque-t-elle pas de favoriser le recru du sous-bois ou des arbres à houppiers très développés et plus sensibles, annihilant tout ou partie de l'effet bénéfique attendu? Une fois l'objectif de densité fixé, comment répartir le prélèvement entre arbres? Quelle est l'influence du statut social sur la vulnérabilité des arbres en cas de sécheresse? Faut-il favoriser les arbres dominants ou les arbres co-dominants à houppier moins développé? Quel peut être le rôle de l'élagage artificiel de branches vertes sur la résistance des arbres à la sécheresse? Les réponses à ces questions ont-elles une valeur universelle ou dépendent-elles de la station? Autant de questions qui intéressent les gestionnaires (Legay, 2015; Sardin, 2015) mais qui restent peu ou pas abordées par la recherche.

Au plan des méthodes, l'influence de la sylviculture sur la réaction des arbres au climat et à la sécheresse en particulier a souvent été étudiée (i) en utilisant le signal de la croissance en diamètre, qui intègre cependant d'autres ressources que l'eau, ou en comparant les traits écophysiologiques mesurés sur des arbres éclaircis ou non (potentiels hydriques de base et minimum, résistance à la cavitation) que l'on peut relier au stress hydrique.

Bien qu'il existe quelques travaux (e.g. Guillemot et al. 2014), les effets favorables d'une sylviculture économe en eau ont rarement été quantifiés et validés à l'aide de modèle de fonctionnement tenant compte de la dynamique du climat, du bilan hydrique à l'échelle de la parcelle et de l'individu, et des traits de résistance à la sécheresse des espèces (e.g. résistance à l'embolie, surface foliaire, régulation stomatique). Cette approche fonctionnelle utilisant les variables du climat est pourtant nécessaire pour tenir compte du changement climatique et en anticiper les effets.

Ce projet de recherche vise à progresser sur cette question en évaluant les effets de diverses options sylvicoles par une approche combinant expérimentation et modélisation.

D'un point de vue expérimental, il s'est agi **de rechercher et d'utiliser des indicateurs de comportement vis-à-vis du climat, en particulier les périodes de sécheresse, et d'analyser leurs variations intra-annuelle et inter-annuelle.**

Deux dispositifs expérimentaux ont été utilisés pour détecter les effets des interventions sylvicoles sur la tolérance à la sécheresse en utilisant la croissance en diamètre, l'état sanitaire ou des caractéristiques de comportement écophysiologique.

Parallèlement, des modèles (BILJOU©—Bréda et Granier 2011— et le modèle hydraulique Sureau —Martin et al 2017— couplé au modèle de bilan hydrique du sol —Ruffault et al 2013—) ont été utilisés pour **évaluer à travers le bilan hydrique la sensibilité au stress des arbres et des peuplements en fonction de la sylviculture expérimentée.**

Le projet a profité de deux outils, encore peu utilisés sur cette question:

- un dispositif expérimental original combinant éclaircie et élagage, réduction de la surface foliaire du peuplement et de l'arbre, de façon indépendante. Sa situation en fait un dispositif particulièrement adapté à l'étude de l'effet des interactions entre climat et sylviculture sur la croissance ou plus généralement le comportement en cas de déficit hydrique important.

- le modèle de fonctionnement hydraulique Sureau (Martin et al 2017) couplé au modèle de bilan hydrique du sol (Ruffault et al 2013).

Deux espèces ont été étudiées : (i) le Sapin pectiné, sensible à la sécheresse dont les peuplements sont menacés; (ii) le Cèdre de l'Atlas plus résistant et souvent mentionnée comme espèce de substitution, notamment en remplacement du Sapin pectiné à moyenne altitude, pour constituer des peuplements moins sensibles au changement climatique.

Le projet prévoyait d'utiliser le modèle de fonctionnement 3D de type arbre dépendant des distances, NOTG (Simioni et al. 2016) pour simuler l'effet de différentes sylvicultures, notamment la répartition de la surface foliaire au sein du peuplement, sous différents scénarios de prévisions climatiques. Cependant, les difficultés rencontrées (annexe 7d) au cours du projet n'ont pas permis de réaliser ces simulations qui seront faites ultérieurement.

2. Partenariat et pilotage

Le projet a réuni des compétences variées en recherche et développement :

- chercheurs et modélisateurs en **écophysiologie** (INRA-URFM Avignon: Guillaume Simioni, Nicolas Martin; CNRS-CEFE Montpellier: Jean-Marc Limousin; INRA-PIAF Clermont Ferrand: Hervé Cochard, Éric Badel), **sciences du sol** (INRA-EMMAH Avignon: Claude Doussan, Simon Carrière), **dendrométrie-dynamique des peuplements** (INRA-URFM Avignon: François Courbet)
- ONF-RDI Avignon: Jean Ladier ingénieur, Charles Tessier, Isabelle Dottarelli (techniciens)
- assistant- ingénieurs et techniciens (INRA-URFM Avignon: Didier Betored, William Brunetto, Jean-Marie Ciappara, Florence Courdier, Pierre-Jean Dumas (CDD), Damien Gounelle, Arnaud Jouineau, Icham Jouineau (CDD), Nicolas Mariotte, Hélène Fargeon (CDD-thèse). INRA-UEFM Avignon: Olivier Gilg. INRA-EMMAH Avignon: Arnaud Chapelet.

La participation des personnes aux différentes tâches est présentée en annexe 1.

Le projet a fait l'objet de deux réunions intermédiaires du comité de pilotage (4 mai 2017 et 11 septembre 2018) qui, outre les participants au projet ont rassemblé Jacques Becquey et Céline Perrier du CNPF-IDF. Des réunions de travail régulières autour des tâches particulières ont rassemblé les personnes concernées (7 juillet 2017 sur Picaussel, 30 avril 2018 pour le creusement des fosses, 20 novembre 2018 sur l'ensemble des données disponibles notamment spatialisées)

Le projet a donné lieu à un rapport intermédiaire remis le 15 janvier 2018.

3. Étapes du travail. Déroulement du projet

3.1. Dispositifs expérimentaux

Deux dispositifs expérimentaux sont concernés.

3.1.1. Dispositif expérimental de Valliguières (30)

Installé en 1991 dans une plantation de cèdre de l'Atlas du Gard en Forêt communale de Valliguières, ce dispositif a expérimenté 4 densités après la première éclaircie réalisée en 1992 (témoin à 1200, 800, 600 et 400 tiges par hectare) combinées à 4 intensités d'élagage réalisées en 1992 et 1996 (rien, élagage des arbres de place à 2 m en 1992, élagage en plein à 2 m en 1992 puis élagage des arbres de place à 4 m en 1996, élagage en plein à 2 m et des arbres de place à 4 m en 1992 puis à 6 m en 1996 (figure 1). Les quatre modalités d'élagage ont été installées dans les

quatre modalités de densité ce qui donne $4 \times 4 = 16$ modalités élagage x éclaircie. Comme le dispositif est composé de huit placettes, chaque modalité d'éclaircie est installée sur deux placettes, chacune d'elle étant divisée en deux demi-placettes pour y pratiquer les quatre modalités d'élagage (annexe 2). Ce schéma expérimental permet de suivre des arbres à houppiers de taille variable au sein de peuplements de surfaces foliaires très différentes. Ce peuplement, planté à l'automne 1968 sur rendzine calcaire et situé à 250 m d'altitude en milieu difficile, est soumis à des sécheresses importantes. Les arbres sont sujets à des nécroses cambiales qui se sont sensiblement aggravées au cours du temps.



Figure 1 : aperçu de la placette 10 (400 tiges élaguées à 6 m) en 1996 à gauche et en 2012 à droite

3.1.2. Dispositif expérimental de Comefroide-Picaussel (11)

Ce dispositif est localisé dans le département de l'Aude, en forêt domaniale de Comefroide-Picaussel. Son objectif est de tester l'efficacité et de préciser les modalités d'une sylviculture à faible densité pour le sapin pectiné visant à réduire la compétition entre individus pour la ressource en eau en vue de l'adaptation du peuplement aux changements climatiques. L'expérimentation est située sur le plateau de Sault, caractérisé par de vastes et remarquables sapinières régulières de type méridional. Le Sapin pectiné représente près de 72% de la surface boisée. Les « sapins du Pays de Sault » étaient déjà appréciés du temps de Colbert qui destinait ces arbres de grande taille à la mâture de la marine royale.

La forêt a subi de forts dépérissements à la suite de la sécheresse et canicule de 2003 en particulier pour les sapins situés en versant Sud, mais aussi en versant Ouest sur sols superficiels. Le peuplement concerné se situe en limite inférieure du sapin, à 860 m d'altitude, à proximité de peuplements dépérissant, mais est encore en bonne santé. Le sol est profond et la fertilité est bonne avec une hauteur dominante supérieure à 26 mètres à 60 ans. Il s'agit d'une futaie régulière en phase d'amélioration avec une surface terrière de 40 m²/ha au moment de l'installation du dispositif. La ronce s'est développée dans la modalité éclaircie.

Cette expérimentation a été installée début 2012 dans le cadre du projet européen For_Climadapt « Adaptation des espaces forestiers méditerranéens aux effets des changements climatiques » cofinancé par le programme MED jusqu'en 2013. Elle s'inscrit ensuite dans un réseau d'essais soutenu par le RMT AFORCE (projet AFORCE "Sylviculture adaptative pour le sapin pectiné dans l'arrière-pays méditerranéen – Constitution d'un réseau d'essais").

Deux modalités sont étudiées (figure 2):

- Témoin = sylviculture « normale » (415 t/ha et 42 m²/ha au moment de l'installation), sans intervention depuis l'installation.
- Densité faible, soit une réduction de moitié de la densité et de la surface terrière (205 t/ha et 22 m²/ha au moment de l'installation), sans intervention depuis.

Le dispositif comporte 2 blocs dont un seulement (le bloc 2) est intégré dans le projet REDSURF.



Figure 2 : aperçu du peuplement dans les deux modalités (éclaircie à gauche et témoin à droite)

3.2 Opérations et mesures réalisées

3.2.1 Dispositif sylvicole de Valliguières (cèdre)

- **Mesures dendrométriques et observations sanitaires réalisées sur le peuplement et les arbres abattus:**

Sur le peuplement de cèdre ont été réalisés successivement fin 2017:

- l'inventaire en plein des circonférences à 1,30 m. L'état sanitaire des arbres, qui avait été noté en plein en 2015, n'a pas été refait en 2017.
- la mesure des arbres-échantillons (circonférence à 1,30 m, hauteur totale, hauteur de base de houppier vivant, hauteur, circonférence et angle d'insertion sur le tronc de la plus grosse branche)
- le marquage de l'éclaircie qui a été exploitée en mars 2018. Les densités ont été ramenées respectivement de 1200 à 800, de 800 à 400 et de 400 à 300 tiges par hectare. Seule la placette témoin n° 3 est restée en l'état sans intervention à la densité de 1200 arbres par hectare.
- parmi les arbres marqués, la sélection et l'abattage de 84 arbres. L'échantillon a été stratifié selon (i) la densité du peuplement, (ii) le niveau d'élagage de l'arbre (0-2m, 4m et 6m), (iii) la classe de diamètre. Dans chaque classe de diamètre on a choisi un arbre plus affecté par les nécroses cambiales et un arbre plutôt épargné. Sur ces arbres ont été prélevées une rondelle à 1.30m puis une rondelle tous les deux mètres de hauteur. Pour l'évaluation de la biomasse foliaire, sur six d'entre eux ont été prélevées trois branches vivantes par arbre selon (j) leur diamètre à

l'insertion sur le tronc, (jj) leur position dans le houppier (une dans le tiers supérieur, une dans le tiers médian et une dans le tiers inférieur).

De janvier à mai 2018, les rondelles ont été scannées à 600 dpi. Sur 8 rayons équidistants de 50 grades (4 équidistants de 100 grades pour les rondelles de 25 cm de circonférence et moins) ont été mesurées à l'aide du logiciel WinDendro® les largeurs de cerne annuel, l'année du cerne correspondant à la limite duramen-aubier, en cas de canaux résinifères présents, l'année du cerne affecté.

En outre sur l'ensemble de la rondelle ont été notées les années et la partie du cerne annuel (bois de printemps ou bois d'été) affectées par chaque nécrose cambiale présente.

Les données de l'échantillon :

84 arbres échantillons, 648 rondelles, 17044 accroissements en surface terrière.

Répartition du nombre d'arbres :

Numéro de demi-placettes	Densité théorique n/ha	Non élagués	Élagués à 2m	Élagués à 4m	Élagués à 6m	Total nombre d'arbres par demi-placette (densité x élagage)	Total nombre d'arbres par densité
21	1200	0	4	5	0	9	17
22	1200	0	4	0	5	8	
41	800	0	4	3	0	7	21
42	800	0	4	0	3	7	
71	800	0	2	0	0	2	
72	800	5	0	0	0	5	
11	600	0	3	5	0	8	24
12	600	0	3	0	5	8	
51	600	4	0	0	0	4	
52	600	3	1	0	0	4	
91	400	0	3	0	0	3	22
92	400	5	0	0	0	5	
101	400	0	0	0	7	7	
102	400	0	0	7	0	7	
Total		17	28	20	20	84	84

Tableau 1 : répartition du nombre d'arbres échantillons par traitement expérimental

Hauteur rondelles	Numéro de rondelle	Nombre de rondelles	Nombre d'accroissements annuels
1.30 m	R1	84	3363
2 m	R2	84	3171
4 m	R3	84	2732
6 m	R4	84	2389
8 m	R5	84	2034
10 m	R6	82	1620
12 m	R7	78	1133
14 m	R8	53	506
16 m	R9	14	91
18 m	R10	1	5
Total R1 à R10		648	17044

Tableau 2 : répartition du nombre de rondelles et d'accroissements mesurés par niveau

- **Estimation de l'indice foliaire** (LAI=Leaf Area Index) :

Deux méthodes ont été utilisées.

- La première par **photographie hémisphérique**, basée sur le principe de l'interception de la lumière par la végétation. Bien que dans ce document nous utilisons le terme indice foliaire (ou LAI), strictement parlant, on devrait parler de surface végétale, sachant que branches, troncs, cônes, peuvent aussi intercepter la lumière

L'indice foliaire par photographie hémisphérique a été estimé pour les parcelles 1, 2, 4, 9 et 10, à deux dates, avant (11/10/2017) et après (19/06/2018) éclaircie. Pour chaque parcelle, plusieurs photos ont été prises à intervalle régulier dans un interligne sur deux. L'intervalle a été choisi selon deux critères : que chaque arbre apparaisse au moins sur une photo (intervalle de 10 m), et avoir une information plus fine le long des transects de résistivité électrique (intervalle de 5 m) (voir ci-dessous les mesures et observations du sol). Les photos ont été prises une hauteur de 1.3 m, le standard préconisé en forêt, sachant qu'à certains endroits le sous-bois dépasse 1.3 m et peut donc contribuer au LAI estimé. Lors de la prise de vue, les photos sont enregistrées au format RAW. Elles sont ensuite, sur ordinateur, développées avec l'outil DCRAW sans correction gamma et converties en noir et blanc en ne conservant que le canal bleu, de manière à mieux distinguer le ciel de la végétation. Pour chaque image, la séparation entre ciel et végétation a été faite par double seuillage selon la méthode de Leblanc et al. (2005). Pour chaque image seuillée est ensuite calculé un indice de trouée (pourcentage de ciel visible) et un LAI selon la formule de Miller. À noter qu'en l'absence d'information, nous n'avons pas fait de correction pour prendre en compte le niveau d'agrégation des aiguilles autour des rameaux, souvent élevé chez les conifères, mais variable d'une espèce à l'autre. Les LAI obtenus peuvent donc être sous-estimés.

- La deuxième méthode est basée sur des **relations allométriques** entre diamètre à hauteur de poitrine du tronc et biomasse d'aiguilles. À notre connaissance, Durkaya et al. 2013 est la seule publication présentant une telle relation pour le genre *Cedrus*, mais il s'agit du *Cedrus libani*. Des travaux précédents sur le cèdre de l'Atlas laissaient présager que nous pouvions produire une relation pour cette espèce, moyennant quelques mesures sur des branches. En effet Courbet et al (2007) ont proposé une approche Markovienne pour prédire la position des branches le long d'un tronc, sur la base de mesures architecturales, et Courbet et al. (2012) ont établi des équations pour calculer le diamètre de base d'une branche selon sa position dans le houppier d'un individu. Nous avons donc, dans le cadre du projet, cherché à compléter ces informations en établissant une relation diamètre de branche – surface d'aiguille. Ainsi, le diamètre à l'insertion et la longueur totale des branches-échantillons ont été mesurés ainsi que la biomasse de leurs aiguilles après tri et séchage à l'étuve. L'ensemble des équations a ensuite été intégré dans un script R sous forme d'un modèle stochastique prédisant la surface foliaire d'un arbre en fonction de son diamètre de tronc, de sa hauteur, de sa hauteur de base de houppier, et avec l'option de forcer avec la branche de plus gros diamètre lorsque celui-ci était connu. Le modèle a été appliqué à l'ensemble des arbres échantillons du projet pour 1996 et 2017, deux dates pour lesquelles les diamètres, hauteurs, et bases de houppier étaient connus, et de manière à avoir la plus large de gamme de diamètres possible. Du fait de la nature stochastique de ce modèle, 200 runs ont été faits pour chaque arbre, dont on a conservé la surface foliaire moyenne prédite. L'ensemble des résultats a ensuite servi à établir une relation diamètre – surface d'aiguille, qui a ensuite été appliquée à l'ensemble des arbres des parcelles 1, 2, 4, 9, et 10 pour en estimer les LAI à chaque date d'inventaire. Nous avons aussi estimé les LAI avec la relation de Durkaya et al. (2013).

- **Mesures réalisées sur le sous-bois** :

Sur le sous-bois des parcelles 1, 2, 4, 9 et 10 (cf annexe 2) a été réalisé l'inventaire des circonférences à 1,30m des espèces sur un échantillon représentant 50% de la surface (un interligne sur 2)

De plus des placettes temporaires circulaires de 9 m de rayon, centrées sur un point de prise de vue de photo hémisphérique quand présent, ont été installées dans chaque demi-placette du dispositif. Sur ces placettes ont été estimés les taux de recouvrement, la hauteur moyenne et les diamètres maximum du houppier et celui perpendiculaire au maximum par espèce et par strate (0-50 cm, 50-100 cm, 100-200 cm, >200 cm).

- **Mesures écophysiologicals sur les arbres :**

Différents types de variables écophysiologicals liées à la vulnérabilité à la sécheresse ont été mesurées pendant le projet à fin d'évaluer l'effet d'une éclaircie sur le statut hydrique des arbres et leur acclimatation. D'une part nous avons mesuré les potentiels hydriques de base (avant l'aube) et minimum (autour du midi solaire) à la chambre à pression (ou bombe de Scholander). Ce sont des variables dynamiques dans la saison qui caractérisent l'état de stress des arbres à une date donnée. Elles permettent d'évaluer l'état de tension de la sève brute. Pour prendre tout leur sens, ces variables doivent être comparées à des traits qui caractérisent les capacités intrinsèques de résistance de l'individu tel que la résistance à la cavitation ou le potentiel hydrique de perte de turgescence. Ainsi si le potentiel mesuré à une date est proche des seuils causant de la cavitation ou de la perte de turgescence on peut identifier l'existence d'un stress. Nous avons également mesuré directement le niveau de cavitation native (i.e. celle présente à un moment donné dans les échantillons de xylème) suite à la sécheresse extrême ayant eu lieu en 2017. Différentes techniques existent, nous avons utilisé la tomographie rayons X sur des échantillons de branche collectés sur le terrain à l'automne 2017. Ces mesures écophysiologicals ont été réalisées sur le terrain pour le potentiel hydrique et à l'URFM ou au PIAF (en collaboration avec H. Cochard et E. Badel) pour les traits et la cavitation native. Le potentiel hydrique de quatre échantillons de 12 arbres chacun (un échantillon par densité) a été suivi au cours des étés 2017 (4 dates avant coupe) et 2018 (3 dates après coupe), en placettes 1, 2, 4, (12 arbres dans chacune) et 9 et 10 (6 arbres dans chacune) auxquelles on a ajouté la placette 3 restée à 1200 tiges/ha en 2018. Le niveau de cavitation native ainsi que les traits (courbes pression-volume et de résistance à la cavitation) ont été estimés sur 5 arbres de chacun des traitements d'éclaircies les plus éloignés (400 et 1200 tiges/ha).

Des courbes pression-volume ont été réalisées en novembre 2018 sur des arbres des traitements contrôles (1200 tiges/ha, placette 2 et 3) et éclaircie (placette 10, 400 tiges/ha). La méthode consiste à laisser des tiges feuillées d'une dizaine de cm se déshydrater à l'air libre afin de mettre en relation la perte en eau des feuilles (équivalent du volume) et le potentiel hydrique. Les courbes permettent ensuite de calculer quatre paramètres qui sont impliqués dans la tolérance à la sécheresse.

- **Mesures et observations du sol :**

Des mesures de résistivité-conductivité du sol ont été faites dans le dispositif. Ces mesures varient selon le taux d'humidité du sol, la charge en éléments grossiers (rochers, blocs).

- Mesure de la résistivité électrique de surface par signal électromagnétique sur la totalité du dispositif (EM31) en juin 2017 avec un appareil à induction électromagnétique (Géonics EM31) qui permet de cartographier la conductivité électrique du sol et sous-sol intégrée sur une profondeur d'environ 3 à 4m. On peut ainsi évaluer l'hétérogénéité du milieu sur une profondeur compatible avec l'enracinement des arbres.

- Sur la base de cette variabilité, quatre lignes d'électrodes ont été installées pour réaliser des mesures de tomographie de résistivité électrique (ERT) dans les placettes 1, 2, 4 et 9, suivant l'axe de la ligne de plantation environ Est-Ouest (figure 33). Les électrodes sont espacées de deux mètres sur une longueur de 100 à 120 m. Ces mesures résultent en une section verticale de la distribution des résistivités électriques sous la ligne d'électrodes. Une mesure à l'état sec a été faite en août et décembre 2017 pour les placettes 1, 2, et 4 et en septembre 2017 pour la placette 9. Un point humide a été fait en avril 2018 dans les 4 placettes. En un temps donné cette variation est fonction, au premier ordre, de la nature du substrat et de la teneur en eau. Par contre, la variation dans le temps, à un même endroit, de la résistivité est essentiellement liée à la variation de teneur en eau du milieu (et pour une part à la variation de température), ce qui permet de situer la zone d'influence des arbres en profondeur en terme de prélèvement hydrique.

- Fosses pédologiques. Le 30 avril 2017 un ensemble de fosses pédologiques ont été creusées à l'aide d'un tractopelle à proximité des transects tomographiques et des arbres-échantillonnés pour les mesures de potentiels. Deux fosses ont été creusées dans chaque placette 1 et 2, une fosse dans chaque placette 4, 9 et 10 (figure 3 et annexe 3). Chaque fosse a fait l'objet d'une description.



Figure 3. Creusement des fosses dans le dispositif cèdre de Valliguères

3.2.2 Dispositif sylvicole de Comefroide-Picaussel (sapin pectiné)

- Mesures dendrométriques et observations sanitaires réalisées sur le peuplement

Sur le peuplement de sapins (placette témoin et placette éclaircie) ont été réalisés successivement :

- l'inventaire en plein des circonférences à 1,30 m
- la mesure de la hauteur totale de 40 arbres-échantillons
- l'état de santé de la sapinière a été évalué sur un échantillon d'arbres identifiés dans les deux parcelles avant la coupe réalisée dans la modalité « éclaircie ».

À l'issue des deux premières campagnes, il est apparu que l'effectif de l'échantillon faisant l'objet des observations sanitaires (18 arbres par modalité) était trop faible. Il a donc été élargi à l'ensemble des 40 arbres objectifs suivis individuellement pour la dendrométrie (NB ces résultats dendrométriques ne sont pas présentés ici). Dans le même temps, le protocole appliqué, celui du DSF, a été simplifié en abandonnant les critères « branches mortes » et « coloration anormale » pour se concentrer sur le déficit foliaire. En effet, le taux de déficit foliaire est le critère le plus intégrateur et le plus pertinent pour rendre compte de l'état sanitaire des arbres et de son évolution.

- Estimation de l'indice foliaire (LAI=Leaf Area Index):

Le suivi de l'indice foliaire a commencé à l'été 2013, lorsque la compétence requise a été acquise en interne.

L'indice foliaire a été évalué à l'aide d'un analyseur de couvert (Li-Cor LAI 2000 prêté par l'INRA). Les mesures ont été réalisées sur 5 points d'observation de la végétation (cf. ci-après) dans chaque placette. L'indice foliaire a été calculé par la méthode d'interpolation, une mesure de référence étant faite à découvert avant et après les mesures sous couvert.

- Mesures réalisées sur le sous-bois :

La végétation du sous-bois fait l'objet d'une évaluation et d'un suivi pour quantifier sa part dans la consommation d'eau, avec l'idée que son développement est favorisé par l'éclaircie et est susceptible d'atténuer le bénéfice que les arbres peuvent tirer de la diminution de concurrence entre eux. Elle est quantifiée en **phytovolume**, par catégorie de plantes (graminées et graminoides, autres herbacées et semi-ligneux, ligneux) et qualifiée (espèces principale) sur 5 placeaux de 4 m² par placette de mesure. Le phytovolume est, pour chaque catégorie de plantes, le produit du

recouvrement en % et de la hauteur en dm, ce qui donne un résultat en décimètre cube par mètre carré. 7 échantillons de végétation de 1 m² ont été prélevés, dans des faciès représentatifs de la diversité des situations décrites depuis l'installation du dispositif expérimental pour estimer l'**indice foliaire**. Ces échantillons ont été triés par catégorie de végétaux (graminoïdes, autres herbacées et semi-ligneux/ligneux) et ont fait l'objet d'une mesure de biomasse foliaire et d'une mesure de la surface foliaire. Quelques échantillons (5) répartis dans chaque catégorie ont été prélevés, mis à sécher, pesés et leur surface mesurées pour ne déduire le LMA (masse par unité de surface).

- Mesures et observations du sol

Le sol a été observé dans des fosses pédologiques de 1,5 m de profondeur, une dans chaque placette expérimentale, ouvertes à l'aide d'une pelle mécanique en octobre 2017. Bien sûr, l'homogénéité stationnelle avait été vérifiée préalablement puisque c'était une condition nécessaire à l'installation du dispositif expérimental.

3.2. Modèles utilisés

Des simulations de stress hydrique ont été réalisées avec deux modèles présentant certaines différences et complémentarité.

- Le premier modèle est Biljou®, un outil permettant de modéliser le bilan hydrique des peuplements forestiers (Granier et al 1999) . Cet outil est accessible via une plateforme web autorisant un usage simplifié à des non-experts et décrivant les différents processus (<https://appgeodb.nancy.inra.fr/biljou/>). À partir des caractéristiques du sol (réserve utile, teneur en eau au point de flétrissement permanent, densité apparente et profondeur) ainsi que de données climatiques journalières, Biljou® modélise les différentes composantes du bilan hydrique telles que l'interception de la pluie, l'évaporation du sol et du réservoir canopée, la transpiration du couvert forestier et le drainage. Ceci permet de déduire le contenu en eau du sol disponible pour les plantes chaque jour et calculer des indicateurs de stress hydrique basés sur sa durée et son intensité.

- Le second modèle Sureau (figure 4) combine un modèle de bilan hydrique à 3 couches de sol, similaire à Biljou® (décrit dans Ruffault et al 2013) et d'hydraulique initialement développé par Hervé Cochard et présenté dans Martin-St Paul et al 2017. Sureau permet de modéliser, 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. Le modèle présente l'avantage de tenir compte des traits hydrauliques et stomatiques qui caractérisent la résistance à la sécheresse des plantes et que l'on a mesuré dans ce projet (la résistance à la cavitation, la perte de pression de turgescence avec le potentiel hydrique estimé par les courbes pression-volume et la conductance minimale). De plus, la modélisation explicite du potentiel hydrique de base, du potentiel minimum journalier et de la cavitation permet de vérifier la validité du modèle avec les mesures réalisées sur le terrain. Cette version de Sureau constitue en quelque sorte une extension de Biljou® car tous les processus liés au bilan hydrique y sont représentés auxquels s'ajoutent des processus physiologiques des effets de la sécheresse.

La résistance à la cavitation du xylème qui est défini par deux paramètres :

$$PLC = \frac{100}{1 + e^{\left(\frac{pente}{25}(\psi_{plant} - \psi_{50})\right)}}$$

où PLC est le pourcentage de perte de conductivité due à la cavitation, ψ est le potentiel hydrique du xylème, ψ_{50} potentiel hydrique causant 50% de perte de conductivité et la pente (%/MPa) un paramètre de forme décrivant le taux de progression de l'embolie.

Les trois paramètres des courbes pressions-volumes permettent de calculer la régulation stomatique de la transpiration. Il s'agit du potentiel osmotique à saturation en eau (π_0 en MPa), et du module d'élasticité des feuilles (ε en MPa). Ensemble, ils déterminent la valeur du potentiel de perte de turgescence (π_{tlp} en MPa). Cette valeur est importante car elle correspond au potentiel hydrique auquel les stomates sont complètement fermés. Les trois paramètres sont utilisés dans Sureau pour calculer l'évolution de la turgescence (et donc du contrôle stomatique) en fonction du potentiel hydrique de la plante.

La conductance minimale (g_{min} en $mmol/m^2/s$) détermine la perte en eau des feuilles à travers la cuticule. Ce paramètre est important car il détermine le taux de dessèchement lorsque les stomates sont fermés, une fois que le potentiel de la plante a dépassé le potentiel de perte de turgescence.

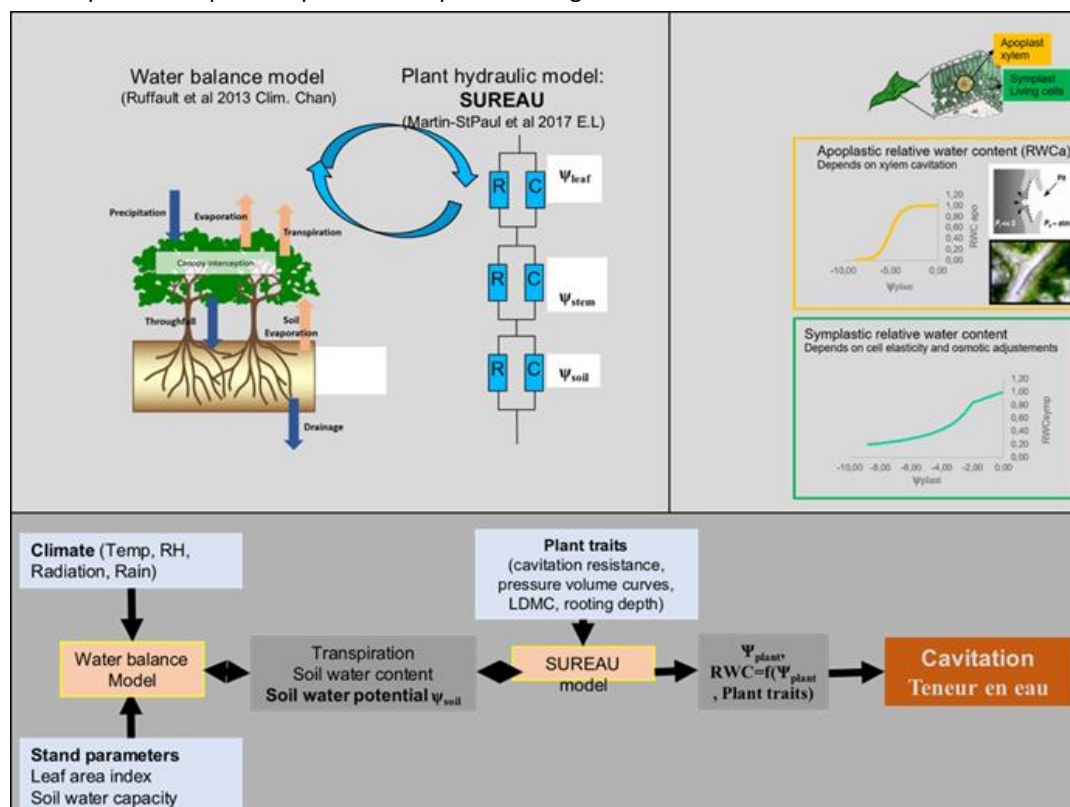


Figure 4. Description schématique du modèle Sureau utilisé pour modéliser le bilan hydrique et le risque de dessèchement par cavitation.

Ces deux modèles sont alimentés avec des données climatiques journalières (température moyenne, minimale et maximale, humidité relative, précipitation, vitesse du vent, rayonnement global), un indice foliaire (LAI), des caractéristiques du sol par horizon (réserve utile, profondeur d'enracinement, densité apparente, teneur en eau au point de flétrissement et à la capacité au champ).

Afin d'alléger la quantité de travail, nous avons réalisé une comparaison des sorties de Sureau et de Biljou© pour nous assurer que leurs résultats étaient similaires pour des conditions initiales identiques (climat, sol et végétation). Ensuite nous avons produit une majorité des résultats avec Sureau pour les facilités d'utilisation et les avantages qu'il présente en terme de validation (possibilité de comparer aux données de terrain).

Il était aussi prévu d'utiliser NOTG, un modèle 3D et individu-centré (Simioni et al. 2016). Il prend en compte l'ensemble des processus biophysiques impliqués dans les cycles du carbone et de l'eau (transfert radiatif, bilan d'énergie, photosynthèse, transpiration, allocation du carbone entre les différents compartiments de l'arbre, stress hydrique, phénologie, décomposition de la matière organique...), avec un pas de temps journalier. Sa capacité à prendre en compte la structure spatiale en fait un outil de choix pour évaluer les effets d'une éclaircie, lorsque la coupe produit d'importantes discontinuités dans la canopée. NOTG a permis de montrer l'importance de la structure spatiale sur la compétition entre arbres pour la lumière et l'eau dans la forêt mélangée pin d'Alep/chêne vert de Font-Blanche (Simioni et al. 2013, Simioni et al. 2016, Marie 2014, Simioni et al in prep.). Pour des raisons explicitées en annexe 7d, le travail de simulation avec NOTG a été initié et sera finalisé ultérieurement.

4 Résultats

4.1 Dispositif sylvicole de Valliguières (cèdre)

4.1.1 Résultats dendrométriques

Ces résultats sont récapitulés en annexe 4.

Les accroissements moyens en diamètre continuent de diminuer avec l'âge surtout au cours de la période 2015-2017 caractérisée par une année 2017 particulièrement sèche. Les différences entre traitements sur la diamètre et le volume moyens des arbres de place s'accroissent.

4.1.2 Analyse des nécroses cambiales et canaux résinifères

L'analyse au niveau peuplement, placette et inter-arbres ne peut se faire que par les notations réalisées au cours des inventaires. L'échantillon des arbres abattus et des rondelles prélevées a été conçu pour une analyse intra-arbre et chronologique au pas de temps annuel.

4.1.2.1 Niveau peuplement

Des écoulements de résine sont progressivement apparus dans le peuplement (figures 5 et 6). Ils se sont depuis considérablement développés depuis les années 2000, touchant la majorité des arbres (figure 7). La note de gravité, basée sur le nombre de mètres de longueur du tronc, affectés sur au moins 50% de la circonférence, est plutôt constante (figure 7). L'exploitation des arbres atteints ont montré que ces écoulements de résine s'accompagnent de nécroses cambiales qui cicatrisent ensuite progressivement (figure 5). Aucun agent biotique causal n'a été identifié jusqu'à présent.



Figure 5. Différentes manifestations du même phénomène. De gauche à droite : écoulements de résine, nécrose cicatrisée (vue externe et vue interne).

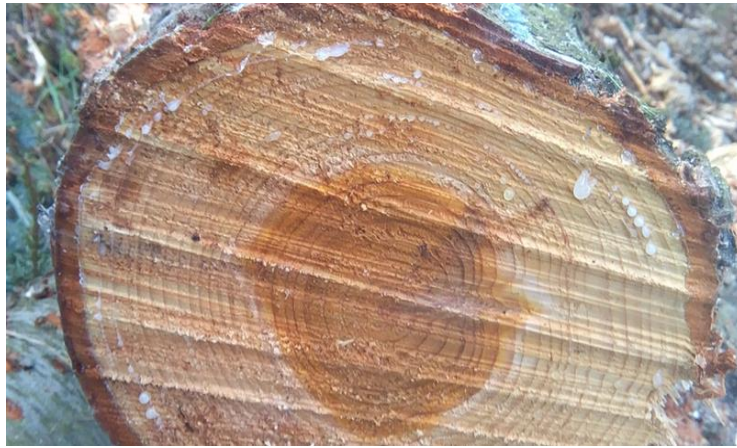


Figure 6. Écoulements de résine suite à la formation de canaux résinifères traumatiques.

Ces symptômes sont proches de ceux décrits sur Douglas (Bréda et Sargent 2015) sur lequel une même nécrose peut affecter plusieurs mètres du tronc, accompagnée dans les cas les plus graves par l'absence d'écorce sur une bonne partie de la circonférence, ce qui n'a pas été observé sur cèdre.

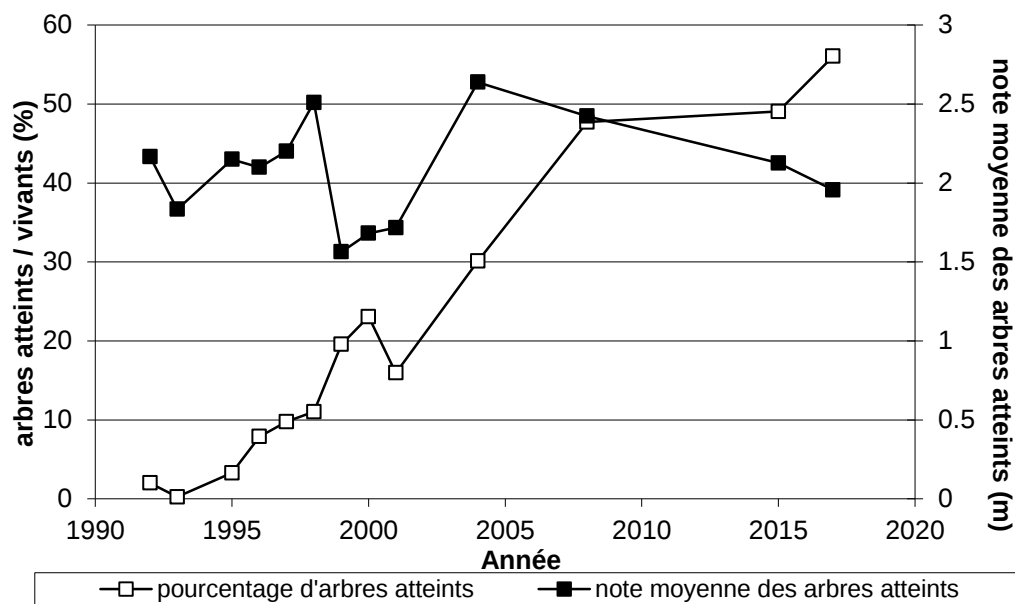


Figure 7 : évolution du taux d'arbres affectés et de l'importance des écoulements de résine dans le dispositif de Valliguières

Lien avec les traitements sylvicoles (figure 8):

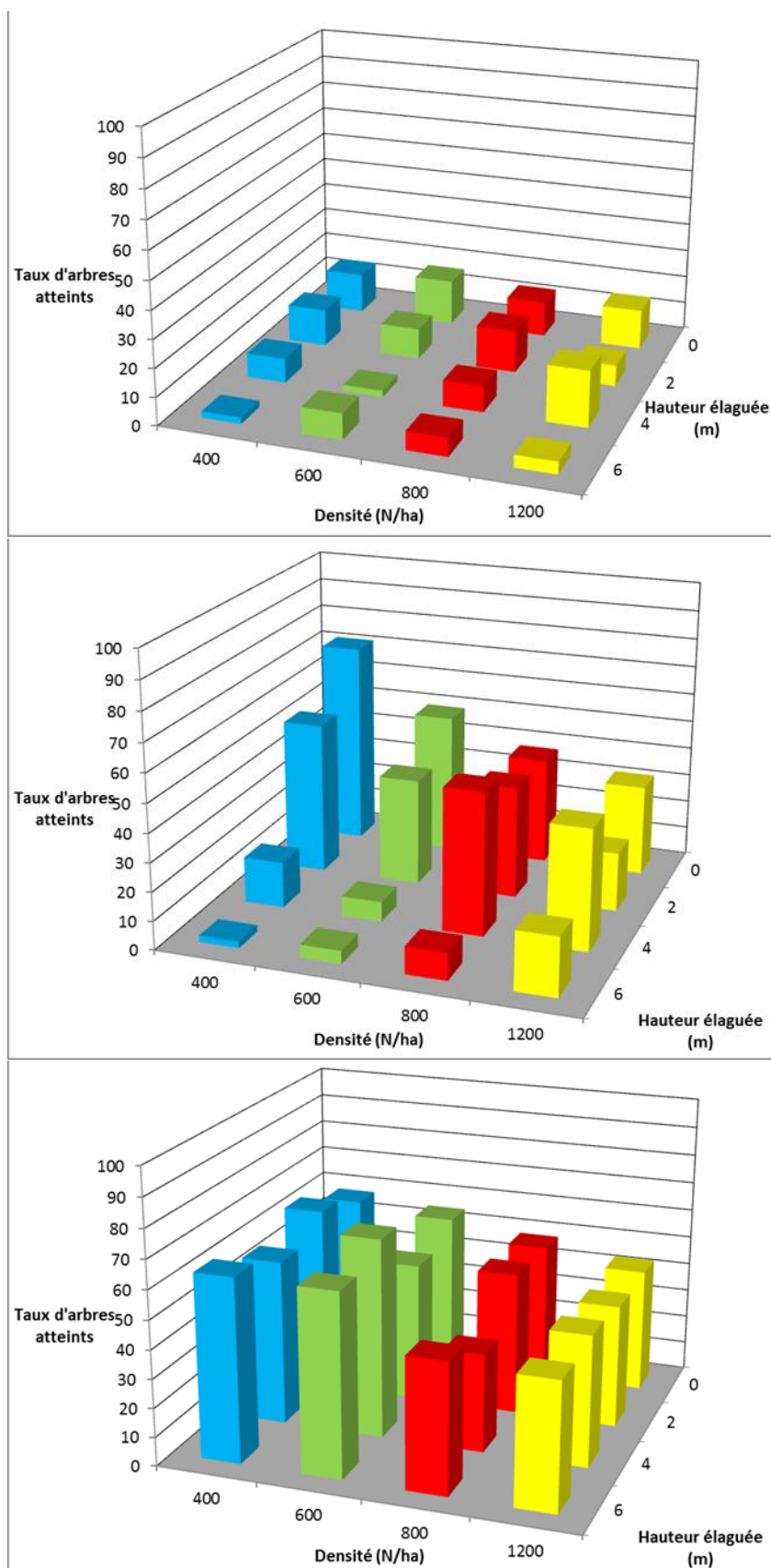


Figure 8. Évolution sur trois dates (de haut en bas : 1998, 2004, 2015) du pourcentage d'arbres affectés en fonction du traitement sylvicole (éclaircie et élagage).

En 1998, le pourcentage global d'arbres atteints est encore modéré (11%) et ne fait pas apparaître de discrimination marquée entre traitements (Figure 9).

En 2004, il apparaît une relation entre le taux d'arbres affectés par les écoulements de résine et les traitements expérimentaux (éclaircie et élagage avec une forte interaction densité x élagage) (figure 8). Les arbres à faible densité et à houppier développés étaient plus touchés que les arbres des placettes témoin, l'élagage artificiel de branches vertes permettant d'inverser cette tendance, cet effet de contre-balancier étant d'autant plus marqué que les arbres étaient à faible densité et que l'élagage concernait donc des branches bien vivantes intervenant dans le bilan hydrique. Ces observations et hypothèse, ajoutés à l'absence d'agent pathogène identifié, nous ont fait envisager d'utiliser les nécroses cambiales, liées aux écoulements de résine, comme un marqueur du stress hydrique subi par les arbres. Dans le traitement sans éclaircie ni élagage (ou élagage des arbres de place à 2 m), il apparaît que les arbres les plus gros sont plus touchés (figure 9):

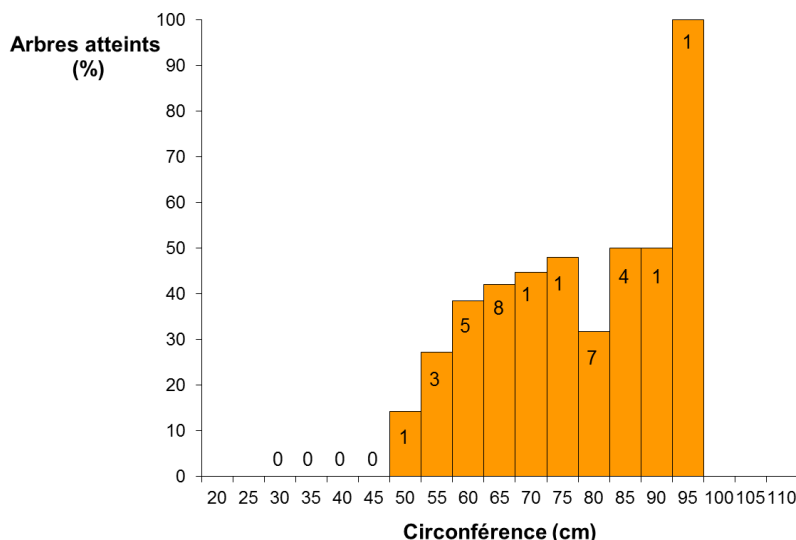


Figure 9 : Proportion d'arbres présentant des écoulements de résine en 2004 dans la placette 3 (1200/ha non élagués ou à 2 m). L'effectif est noté sur chaque barre de l'histogramme.

En 2015 le pourcentage d'arbres atteints est élevé (49%) et ne semble pas varier beaucoup entre traitements (figure 8). La fermeture du peuplement quelle que soit la densité et le niveau d'élagage pourrait expliquer cette uniformisation des symptômes entre placettes.

4.1.2.2 Niveau intra-arbre (analyse des rondelles)

Chronologie des nécroses. Lien avec les canaux résinifères.

La notation des symptômes visibles extérieurement ne permet pas de dater précisément leur apparition et donc de faire le lien éventuel avec les facteurs climatiques, d'une part parce qu'ils ne sont pas observés tous les ans et aussi parce qu'il peut s'écouler un certain temps entre l'apparition de la nécrose et l'écoulement de la résine à l'extérieur du tronc.

L'exploitation des arbres a donc permis de dater l'année d'apparition des nécroses et aussi celle de canaux résinifères d'origine traumatique, puisque le cèdre ne fait pas de canaux résinifères normaux (figure 6).

La figure 10 montre l'évolution de la fréquence des canaux résinifères et des nécroses cambiales qui confirme l'aggravation avec le temps déjà constatée sur les arbres sur pied. Certaines années sont plus propices à ces manifestations (2008 par exemple), d'autres moins comme 2017.

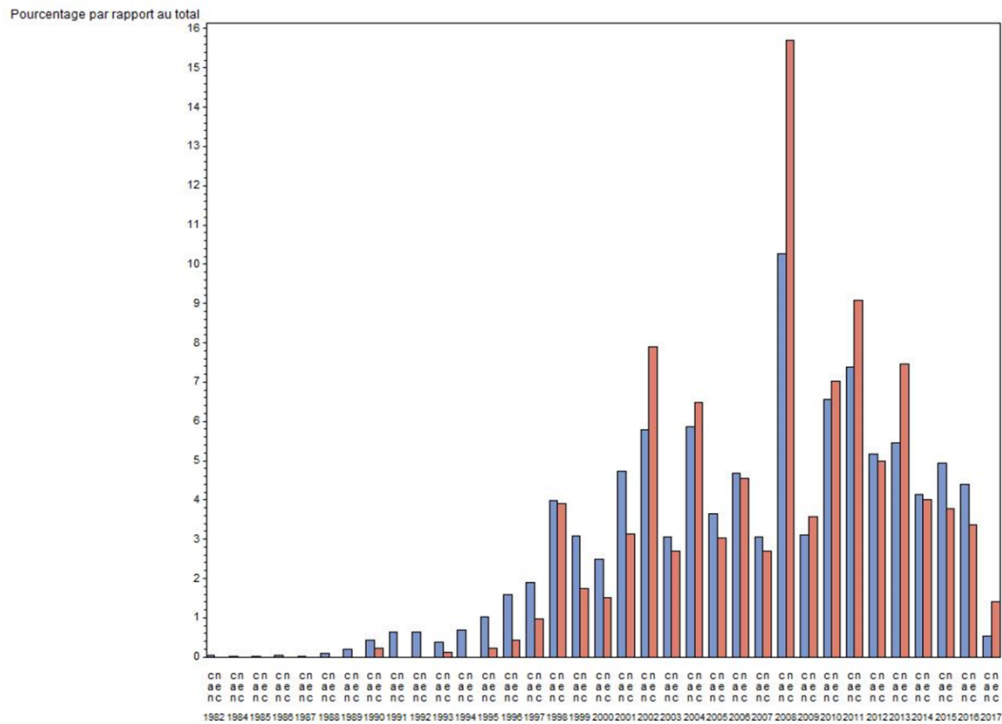


Figure 10. Évolution de la fréquence des canaux résinifères (can en bleu) et des nécroses cambiales (nec en rouge) en fonction de l'année de leur apparition.

En outre il apparaît clairement une relation statistique ($R^2=0.98$) entre l'importance des nécroses cambiales et l'importance des canaux résinifères (qui ne sont pas observés aux mêmes endroits sur les rondelles) sur la figure 11.

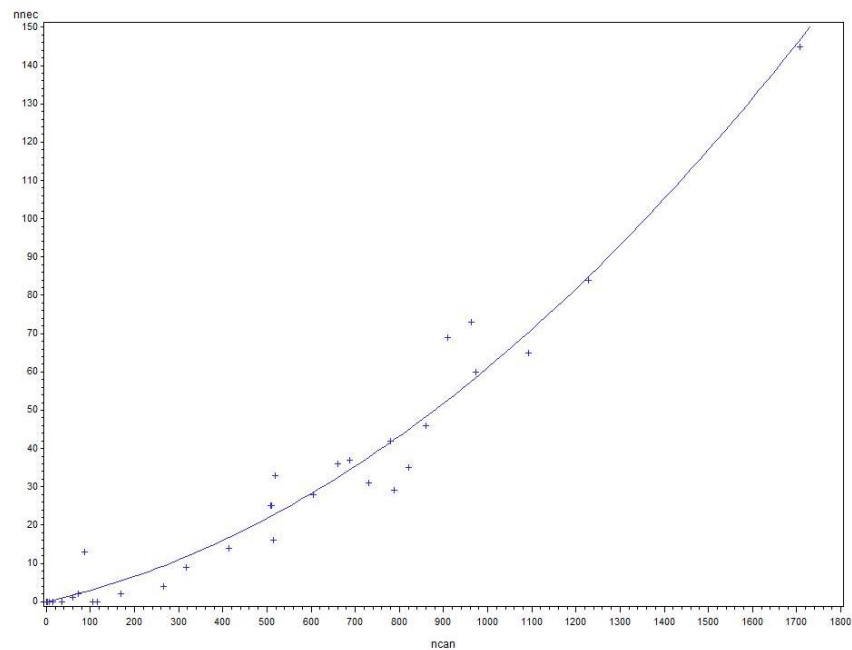


Figure 11. Relation entre le nombre de nécroses cambiales (en ordonnée) et le nombre d'observations de canaux résinifères (en abscisse) par année, observés sur les rondelles ($R^2=0.98$) (1 point=1 année).

L'hypothèse la plus plausible est que l'apparition de canaux résinifères précède celle des nécroses cambiales. Les canaux résinifères ne sont qu'une manifestation moins avancée du même phénomène : les nécroses cambiales et les écoulements de résine associés s'accompagnent obligatoirement de la formation de canaux résinifères dont la résine s'écoule le long du tronc. On retrouverait donc ici ce qui a déjà été observé sur douglas (Bréda et Sargent 2015).

Nécroses et âge cambial

Toutes rondelles confondues, la relation entre nombre de nécroses et âge cambial montre une courbe de Gauss très régulière centrée sur 21-22 ans (figure 12).

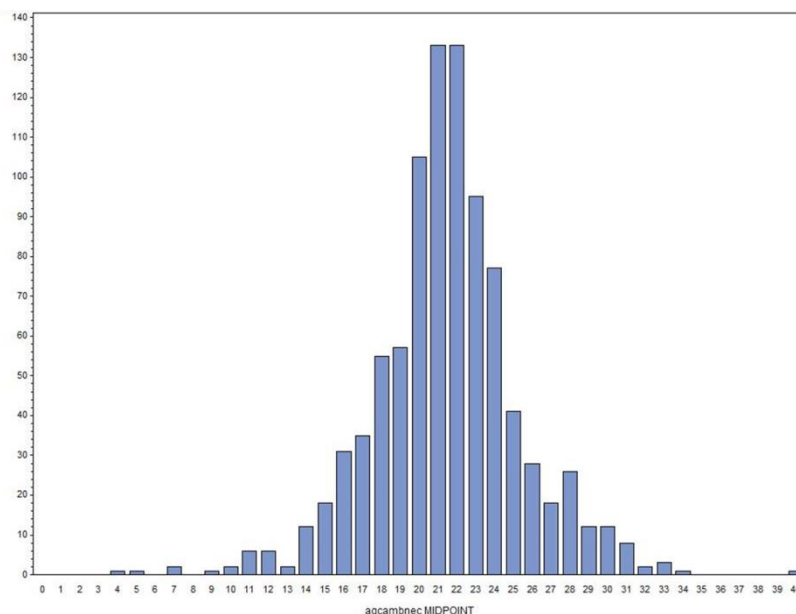


Figure 12. Répartition du nombre de nécroses observées en fonction de l'âge cambial du cerne affecté toutes rondelles confondues

Hauteurs des nécroses dans l'arbre :

Il est donc logique de retrouver une relation entre hauteur d'apparition des nécroses et hauteur de la base de houppier (modélisée interpolée à partir des mesures de terrain 1992, 1994, 1996, 2000, 2004, 2008, 2015, 2017) (figure 13). Cette relation se retrouve aussi en fonction du niveau d'élagage ou il apparaît que le maximum des courbes modélisées se situe légèrement au-dessus de la hauteur d'élagage (figure 14).

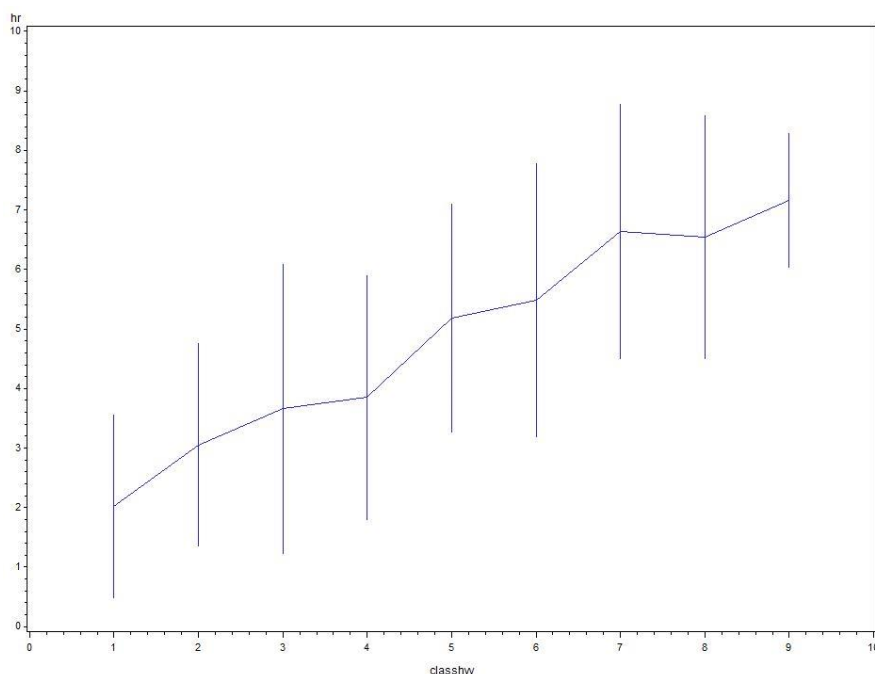


Figure 13. Relation entre hauteur d'apparition des nécroses en ordonnée (moyenne et écart-type) et classe de hauteur (1 m) de la base de houppier en abscisse.

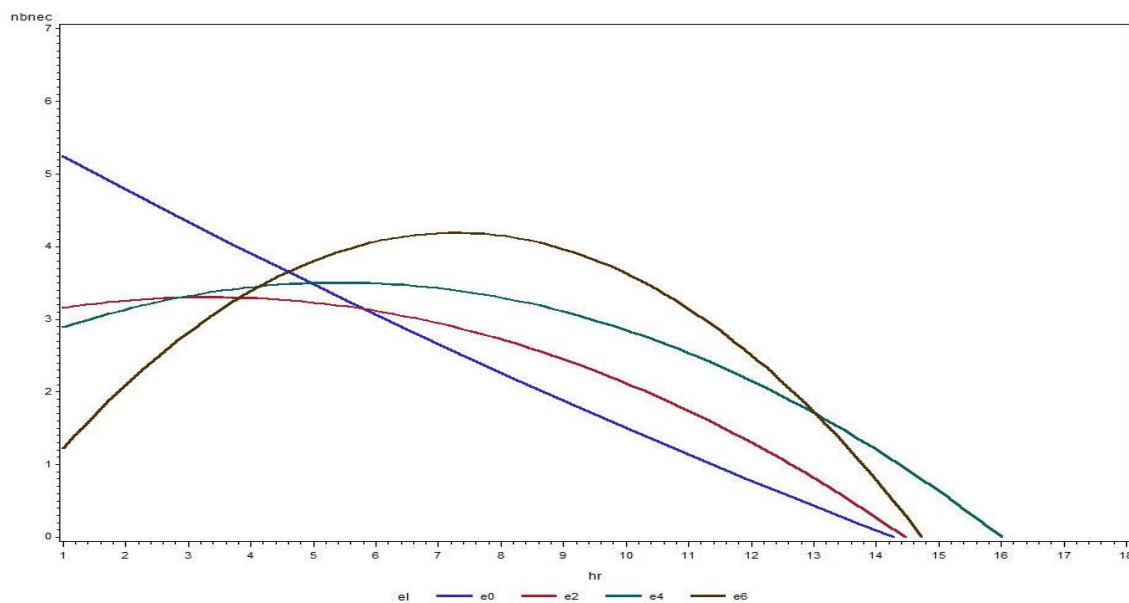


Figure 14. Relation entre nombre de nécroses et heure d'apparition par niveau d'élagage : e0 arbres non élagués en bleu, e2 arbres élagués à 2m en rouge, e4 arbres élagués à 4m en vert, e6 arbres élagués à 6m en noir. Les courbes représentent les données modélisées par un modèle quadratique.

Orientation des nécroses:

Il n'y a pas de direction préférentielle dans le développement des nécroses (tableau 3).

Direction	Nombre de nécroses	Pourcentage
Est	269	29 %
Nord	204	22 %
Ouest	220	24%
Sud	231	25 %
Total	924	100%

Tableau 3 : répartition des nécroses en fonction de leur orientation

Liaison nécroses-croissance-climat (période 2001-2017):

On examine la variabilité interannuelle de la fréquence des nécroses exprimées en pourcentage du nombre total de nécroses observées et en se limitant à la période 2001-2017 où elles se sont bien développées.

Lien avec la croissance :

Il n'y a pas de lien statistique entre la fréquence des nécroses et la croissance en surface terrière à 1.30 m des 84 arbres (figure 15) ou des 17 arbres, non élagués ou élagués à 2 m (l'élagage à 2 m n'a pratiquement pas d'effet sur la croissance en surface terrière), prélevés dans la placette témoin non éclaircie (figure 16), pour s'affranchir de l'effet traitement sur la croissance.

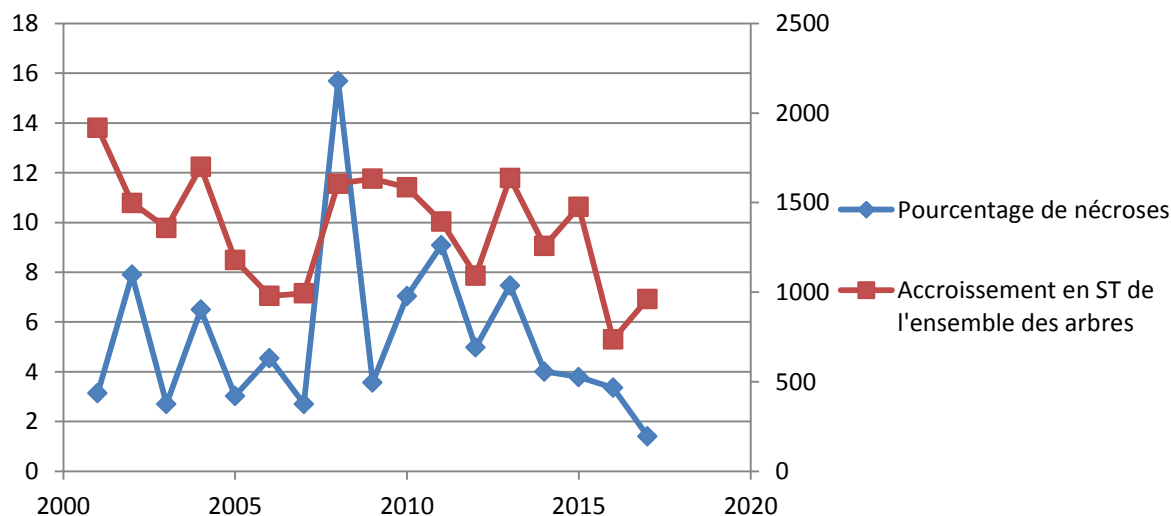


Figure 15. Évolutions comparées du pourcentage de nécroses (2001-2017) et de la croissance en surface terrière des 84 arbres échantillon. Ceux-ci ont été choisis comme indicateurs de la variabilité interannuelle de croissance du dispositif. R^2 non significatif entre les deux variables = 0.126 (modèle linéaire).

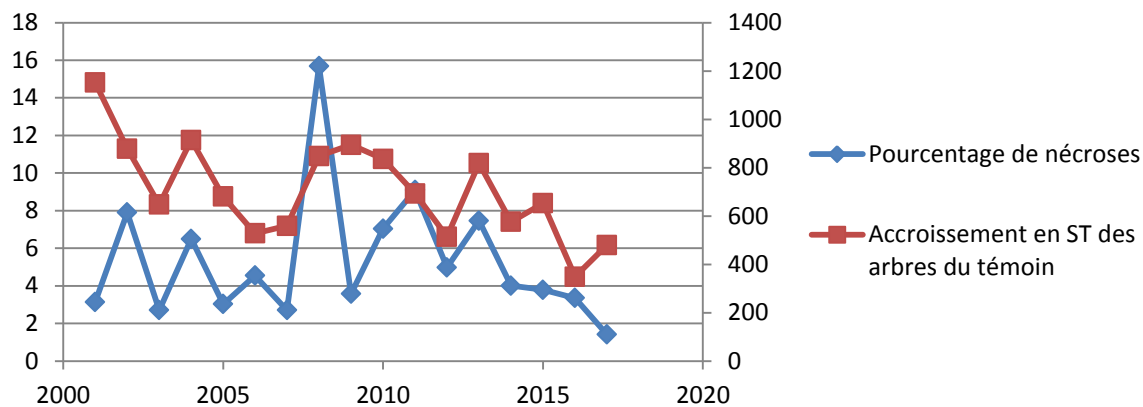


Figure 16. Évolutions comparées du pourcentage de nécroses (2001-2017) et de la croissance en surface terrière des arbres échantillons prélevés dans le témoin. Ceux-ci ont été choisis comme indicateurs de la variabilité interannuelle de croissance du dispositif. R^2 non significatif entre les deux variables = 0.166 (modèle linéaire)

Lien avec le climat et les indices de stress :

Parmi les multiples variables considérées, les meilleures corrélations sont avec l'indice d'aridité de de Martonne (pluviométrie totale/(température moyenne + 10)) calculé sur la période mars-août (figure 17), et la somme annuelle des valeurs absolues journalières de potentiel hydrique simulé inférieures à -0.5 MPa (figure 18).

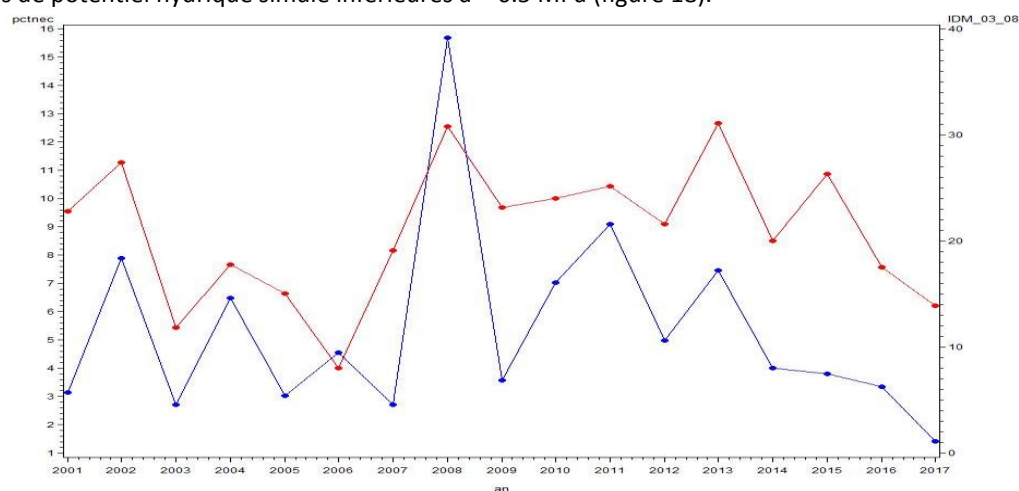


Figure 17. Évolutions comparées du pourcentage de nécroses (2001-2017) en bleu et de l'indice d'aridité de de Martonne en rouge (= pluviométrie totale/(température moyenne + 10)) calculé sur la période mars-août. R^2 entre les deux variables = 0.419 (modèle linéaire, la corrélation est positive et significative)

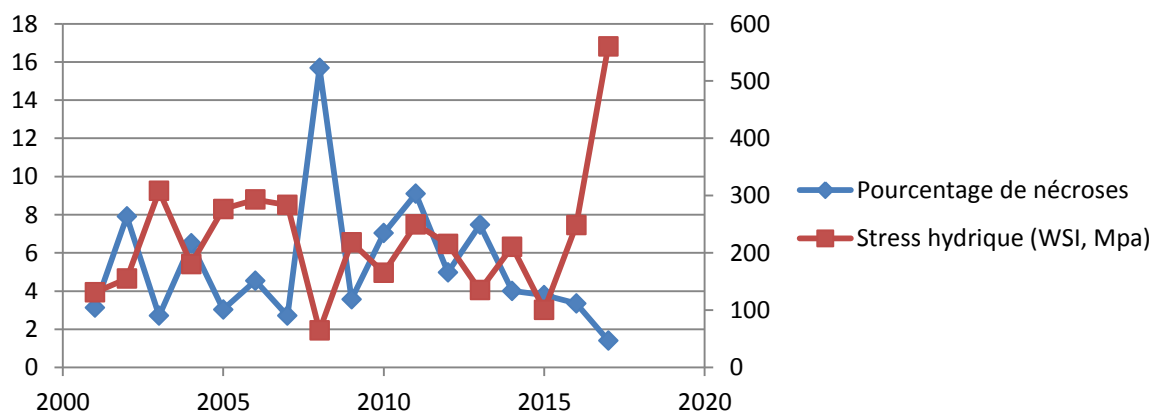


Figure 18. Évolutions comparées du pourcentage de nécroses (2001-2017) et d'un indice de stress hydrique WSI égal à la somme annuelle des valeurs absolues journalières de potentiel hydrique simulé inférieures à -0.5 MPa. R^2 entre les deux variables = 0.338 (modèle linéaire, la corrélation est négative et significative).

On a donc une relation négative entre le taux de nécroses et à la fois un indice climatique de sécheresse et un indice fonctionnel de simulation du stress et, ce qui est plutôt contre-intuitif par rapport à l'idée qu'on se faisait *a priori* sur la cause des nécroses : sécheresse et du bilan hydrique défavorable.

4.1.3 Analyse des largeurs de cernes

L'objectif est d'utiliser les largeurs des cernes annuels pour détecter les effets éventuels de la sylviculture (éclaircie et élagage) sur la relation entre croissance et climat.

Données climatiques :

Les données journalières de température minimale et maximale et de pluviométrie sur les postes météorologiques voisins du dispositif ont été récupérées auprès de Météofrance. La température moyenne journalière a été calculée à partir de la formule : $T_{moy} = (T_{min} + T_{max})/2$.

Les données météorologiques des différents postes ont été comparées aux données Safran (données modélisées sur une maille de 8 km x 8 km). Il s'est avéré que les moyennes calculées à partir des données des deux postes les plus proches du dispositif, Cavillargues au nord et Meynes au sud, étaient proches des données Safran. Ce sont donc les moyennes des données journalières issues de ces deux postes qui ont été utilisées.

Les moyennes mensuelles des températures journalières moyennes, minimales et maximales ont été ensuite calculées ainsi que la pluviométrie mensuelle. Par mois, les températures extrêmes mesurées ont été aussi utilisées ainsi que le nombre de jours de gel et la moyenne des températures minimales des jours de gel.

Ont également été utilisés :

- L'indice de De Martonne ainsi que la pluviométrie sur les périodes mars-juin, mars-juillet, mars-août, mars-septembre.
- La pluviométrie intégrant l'automne-hiver précédent la période de croissance sur les périodes septembre-février, octobre-février, novembre-février, décembre-février, septembre-août, octobre-août, octobre-septembre, octobre-août.

Les indices de De Martonne ont aussi été calculés avec la pluviométrie d'octobre-septembre associée aux températures de mars-septembre et la pluviométrie d'octobre-août associée aux températures de mars-août.

Relation croissance-climat sur les arbres de la placette témoin :

Une première étape a consisté à rechercher les meilleures variables ou indices climatiques expliquant la croissance en surface terrière en l'absence de traitement sylvicole. Les arbres non élagués ou élagués à 2 m ont été sélectionnés dans la placette témoin.

La meilleure relation de la croissance de l'année n est avec l'indice adapté de De Martonne qui fait intervenir la somme des précipitations sur une année complète depuis septembre de l'année n-1 et les températures de la saison de végétation (figure 19).

$IDM_{10_09} = \text{Pluviométrie cumulée de octobre n-1 à septembre n} / (\text{somme des températures moyennes mensuelles de mars à septembre n} / 7 + 10)$.

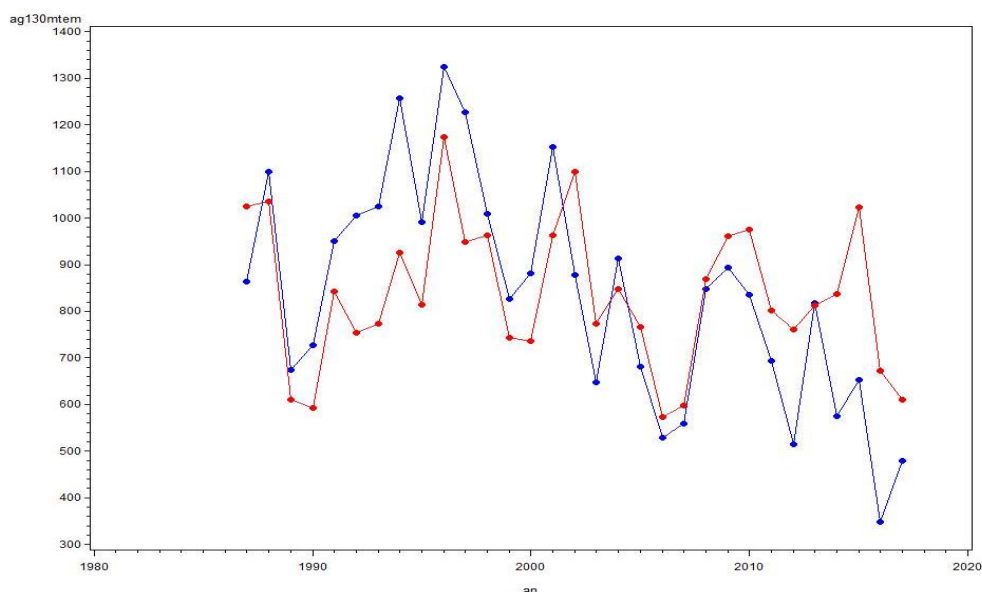


Figure 19. Évolutions comparées de la croissance en surface terrière des arbres de la placette témoin (1987-2017) en bleu et de l'indice d'aridité de de Martonne en rouge (= pluviométrie totale octobre-septembre/(température moyenne mars-septembre + 10)). R^2 entre les deux variables = 0.426 (modèle linéaire, la corrélation est positive et significative). Le modèle ne prend pas en compte l'effet de l'âge (sous-estime au début et surestime à la fin).

Effet de la sylviculture sur la relation croissance-climat :

Cette analyse s'est faite à l'aide de modèles à effets mixtes. La variable expliquée est l'accroissement annuel en surface terrière sous écorce en mm². Les modèles ont été ajustés par niveau (rondelle) jusqu'à 14 m. Les cernes des anciennes années disparaissent au fur et à mesure qu'on monte dans l'arbre. C'est pourquoi l'effet annuel n'est pas regardé au-delà de 10 m.

Modèle avec interaction densité x climat :

Effets fixes :

- taille initiale de l'arbre = rayon sous écorce à l'année n-1 en mm. Variable continue. Traduit le fait que les arbres les plus gros poussent plus vite.
- densité = surface terrière du peuplement en m²/ha. Variable continue. Traduit l'effet de l'éclaircie et son amortissement dans le temps avec la reconstitution du couvert.
- indice climatique = l'indice d'aridité de De Martonne (= pluviométrie totale octobre-septembre/(température moyenne mars-septembre + 10)). Variable continue. Traduit l'effet du climat.
- modalité d'élague. Niveaux de facteur = élague à 0, 2, 4 m en 1992, 4 m en 1996, 6 m.
- interaction densité x modalité d'élague. Traduit le fait que la réaction à l'élague varie selon la densité (en fonction de la concurrence subie par le houppier).
- Interaction densité x climat = surface terrière x indice de De Martonne défini ci-dessus. Traduit le fait que la réaction à la densité dépend des conditions climatiques.

Effets aléatoires :

- effet arbre individuel. Traduit l'effet du patrimoine génétique et de l'environnement local.

Autocorrélation :

- autocorrélation d'ordre 1. Traduit le fait que les accroissements successifs ne sont pas totalement indépendants mais corrélés à l'accroissement précédent.

Modèle avec interaction densité x année :

Effets fixes :

- taille initiale de l'arbre = rayon sous écorce à l'année n-1 en mm. Variable continue. Traduit le fait que les arbres les plus gros poussent plus vite.
- densité = surface terrière du peuplement en m²/ha. Variable continue. Traduit l'effet de l'éclaircie et son amortissement dans le temps avec la reconstitution du couvert
- modalité d'élague. Niveaux de facteur = élague à 0, 2, 4 m en 1992, 4 m en 1996, 6 m
- interaction densité x modalité d'élague. Traduit le fait que la réaction à l'élague varie selon la densité (en fonction de la concurrence subie par le houppier).

Effets aléatoires :

- effet arbre individuel. Traduit l'effet du patrimoine génétique et de l'environnement local.
- effet annuel. Traduit l'effet du climat.
- Interaction densité x année. Traduit le fait que la réaction à la densité dépend des conditions climatiques.
- Interaction élague x année. Traduit le fait que la réaction à l'élague dépend des conditions climatiques.

Autocorrélation

- autocorrélation d'ordre 1. Traduit le fait que les accroissements de deux années successives ne sont pas indépendants.

Résultats :

- Pour les deux modèles :

L'effet de la taille initiale est toujours très significatif et positif quel que soit le modèle et le niveau.

L'effet de la densité est aussi très significatif et négatif quel que soit le modèle. Il s'atténue pourtant au fur et à mesure qu'on monte dans l'arbre.

L'effet de la modalité d'élagage est la même pour les deux modèles (climatique ou annuel). Seule la significativité varie un peu selon la hauteur.

- L'effet de l'élagage à 6 m est négatif à 1.30 m, 2 m et 4 m (non significatif à 4 m pour le modèle annuel); positif à 6 m;
- L'effet de l'élagage à 4 m en 1996 n'est significatif et positif qu'à 4 m pour le modèle climatique.
- L'effet de l'élagage à 4 m en 1992 n'est significatif et positif qu'à 4 m.

L'interaction élagage à 6 m x densité est positive et significative à 1.30 m et 2 m, négative et significative à 6 m. L'interaction élagage à 4 m x densité est négative et significative à 4 m. La diminution de croissance due à l'élagage est d'autant plus faible que la densité est forte. De même l'augmentation de la croissance juste sous le niveau d'élagage est d'autant plus faible que la densité est forte: sous l'effet de la densité la remontée naturelle de la base de houppier a pour effet de gommer les différences entre arbres élagués et arbres non élagués.

L'effet aléatoire arbre est toujours très significatif ainsi que l'autocorrélation qui diminue avec la hauteur dans l'arbre

- Modèle avec interaction densité x climat :

Un climat moins sec favorise la croissance jusqu'à 6 m. Le niveau 8 m n'est pas significatif. La relation est ensuite inversée à 10 et 12 m, mais il est difficile de conclure les mêmes années n'étant pas toutes représentées à chaque niveau.

L'interaction densité x climat n'est donc examinée que jusqu'à 6m. L'interaction n'est significative et négative qu'à 1.30 m et 2 m. A ces niveaux, l'effet négatif de la densité s'accroît en cas de sécheresse et inversement. Elle est non significative à 4 m et inversée à 6m.

L'interaction modalité d'élagage x climat testée n'a pas donné d'effet significatif. Elle a donc été retirée du modèle.

- Modèle avec interaction densité x année :

L'interaction densité x année est toujours significative jusqu'à 8 m.

L'effet annuel, donc du climat, se manifeste par un effet année aléatoire et une interaction rendant compte du fait que cet effet annuel varie avec la densité du peuplement. On a :

Accroissement en surface terrière (effet annuel) = effet année + pente x surface terrière.

Pour chaque année on obtient une valeur pour l'effet année (à surface terrière nulle) et une valeur de pente. Du fait de l'interaction, l'effet annuel peut prendre des valeurs négatives ou positives selon la surface terrière considérée. Pour juger de l'effet annuel, il est donc nécessaire de définir à quelle surface terrière on se réfère. La valeur à surface terrière nulle n'est pas un bon critère car elle est très théorique. Nous avons donc décidé de classer les années en fonction de leur accroissement pour la valeur de surface terrière de la placette témoin sans intervention. La valeur de la médiane détermine la séparation entre les années défavorables et les années favorables.

Sont ensuite calculées par type d'année les valeurs annuelles d'accroissement en surface terrière tous les 5 m² de surface terrière.

Les années favorables le sont d'autant moins que la surface terrière est importante (figure 20). Les effets ne sont significatifs qu'entre 10 m² et 40-45 m² de surface terrière (test de Duncan).

Les années défavorables le sont d'autant plus que la surface terrière est faible (figure 21). Les effets ne sont significatifs qu'entre 10 m² et 40-45 m² de surface terrière (test de Duncan).

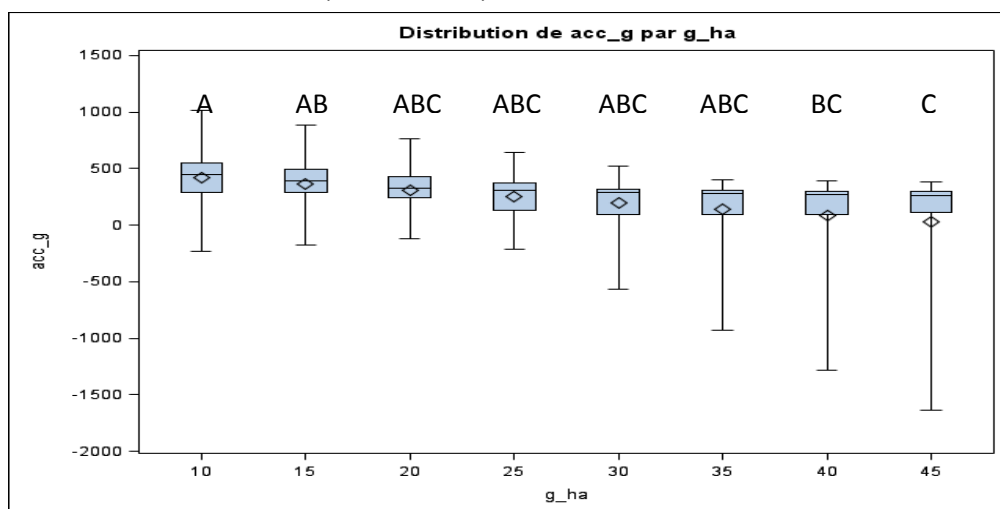


Figure 20. Box-plot montrant l'effet de la densité (g_ha) sur la réponse annuelle de l'accroissement en surface terrière (acc_g) des 13 années les plus favorables. Test de Duncan associé. Deux densités affublées d'une même lettre ne donnent pas des résultats significativement différents sur la moyenne.

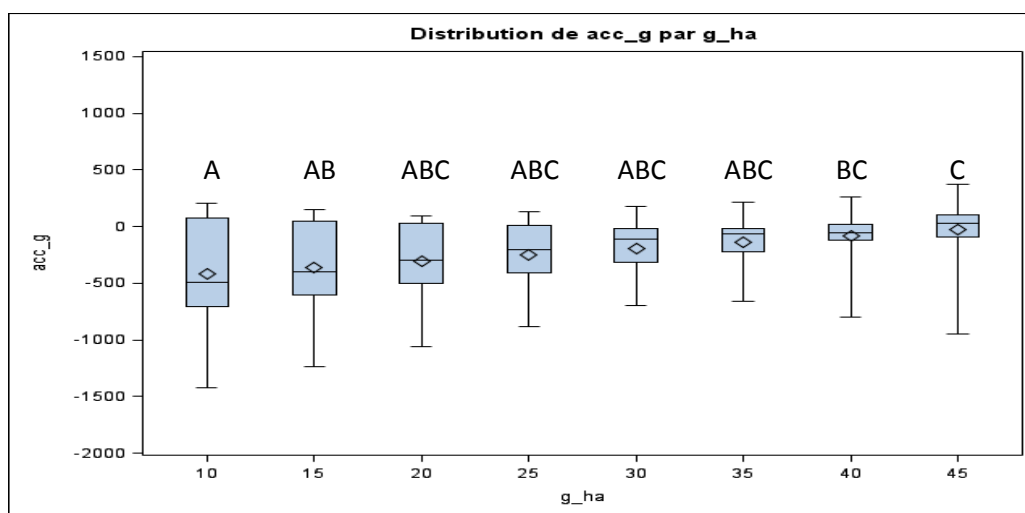


Figure 21. Box-plot montrant l'effet de la densité (g_ha) sur la réponse annuelle de l'accroissement en surface terrière (acc_g) des 13 années les plus défavorables. Test de Duncan associé. Deux densités affublées d'une même lettre ne donnent pas des résultats significativement différents sur la moyenne.

Ces graphiques synthétiques masquent une réalité : la forte dépendance de l'interaction avec le nombre d'années suivant l'éclaircie, malgré l'absence de relation sur le résidu annuel ($R^2=0.17$). On constate que le bénéfice sur la dépendance de la croissance au climat concerne essentiellement les cinq années qui suivent l'éclaircie de 1992 (figure 22, valeurs négatives de pente). Ceci rejoint les résultats obtenus par ailleurs sur cèdre (Guillemot et al 2015).

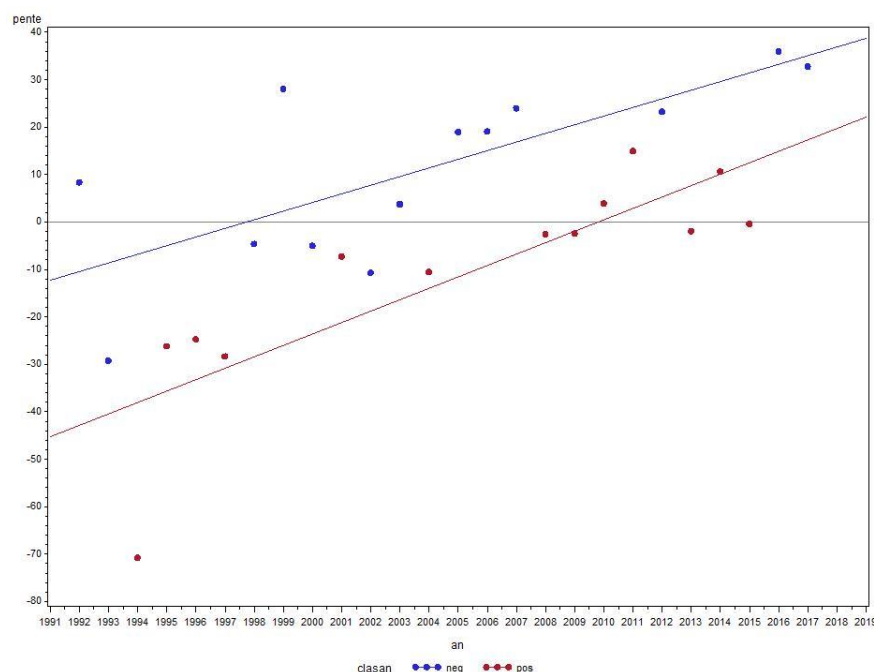


Figure 22. Relation entre la pente de l'interaction densité x année et l'année. En bleu les 13 années les plus favorables ($R^2=0.69$), en rouge années bleu les 13 années les plus défavorables ($R^2=0.54$).

La principale conclusion est qu'il existe bien un effet favorable de l'éclaircie sur la relation croissance-climat. Elle est temporaire et se limite aux quelques années suivant l'éclaircie avant même que le couvert se referme et concerne donc les traitements les plus extrêmes. Cela peut être dû à la disponibilité en eau et en lumière qui augmentent mais aussi à la mobilisation des réserves carbonées, sans qu'il soit possible ici de séparer ces causes.

Effet de la hauteur dans l'arbre : la dépendance des accroissements vis-à-vis du climat et de la densité diminuent avec la hauteur. Il en va de même pour l'interaction densité x climat.

L'interaction élagage x année est très rarement significative, seulement en 1997 l'année qui suit le second élagage, négative pour l'élagage à 6 m, positive pour la modalité non élaguée. Ces résultats se retrouvent à 1.30 m, 2 m et 4 m de hauteur.

4.1.4 Sous-bois

Les surfaces terrières du sous-bois sont plus importantes dans les parcelles les plus éclaircies à 600 et 400 arbres/ha (figure 23).

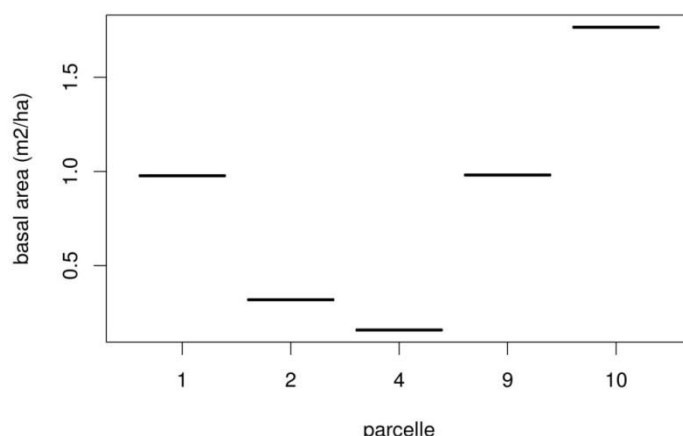


Figure 23 : Surface terrière du sous-bois pour les parcelles témoin (2), 800 arbres/ha (4), 600 arbres/ha (1) et 400 arbres/ha (9 et 10).

Cette tendance est corroborée par les mesures de taux de recouvrement (figure 24). Ceci illustre bien le meilleur développement du sous-bois avec le niveau d'éclaircissement du peuplement. Cependant, il est à nuancer par le niveau de résistivité électrique du substrat. Ce dernier est par exemple plus élevé dans la parcelle 4 (800 arbres/ha), ce qui suggère que la ressource en eau y constituerait aussi une limitation (figures 32 et 33).

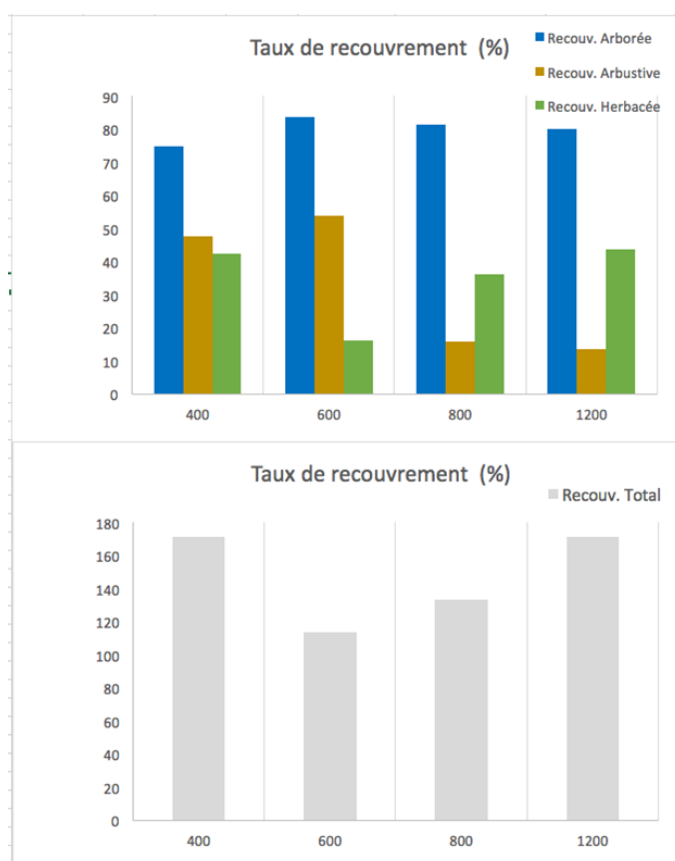


Figure 24 : Taux de recouvrement des plantes de sous-bois par catégories (haut) et toutes catégories confondues (bas). Ces mesures ont été faites sur les parcelles 1, 2, 4, 9 et 10.

4.1.5 Estimation du LAI

- Photos hémisphériques

Les estimations de surfaces végétales par photographies hémisphériques indiquent qu'avant l'éclaircie de 2018, il n'y avait pas de différence significative entre densités de peuplement (figure 25). Après éclaircie, les parcelles initialement à 400 tiges/ha affichent des valeurs légèrement plus élevées que les parcelles initialement à 600 et 1200 tiges/ha. Ces différences peuvent être attribuées à une éclaircie un peu plus faible que pour les autres traitements. L'effet de l'éclaircie opérée en 2018 est, comme attendu, important.

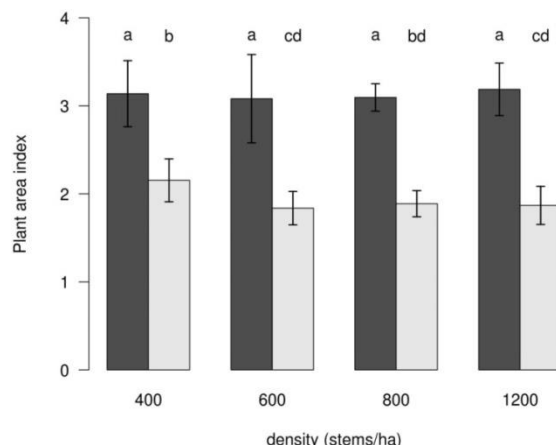


Figure 25 : Indice foliaire avant (noir) et après (gris) éclaircie, en fonction de la densité de tiges. Des lettres différentes indiquent des différences significatives.

- Relations allométriques

L'annexe 5 montre les relations obtenues entre diamètre-extension et biomasse d'aiguilles pour les branches-échantillons.

La figure 26 compare les résultats obtenus par les différentes méthodes pour reconstituer l'indice foliaire. Pour le dispositif de Valliguières, les différentes méthodes ne convergent pas vers les mêmes grandeurs de LAI. Utiliser la relation de Durkaya et al. (2013) donne des valeurs proches de celles obtenues par photos hémisphériques. Cependant, si on tente de prendre en compte le degré d'agrégation du feuillage avec un coefficient moyen pour les conifères, les estimations par photos hémisphériques peuvent augmenter de 2 points. Les différences entre méthodes allométriques sont tout aussi contrastées.

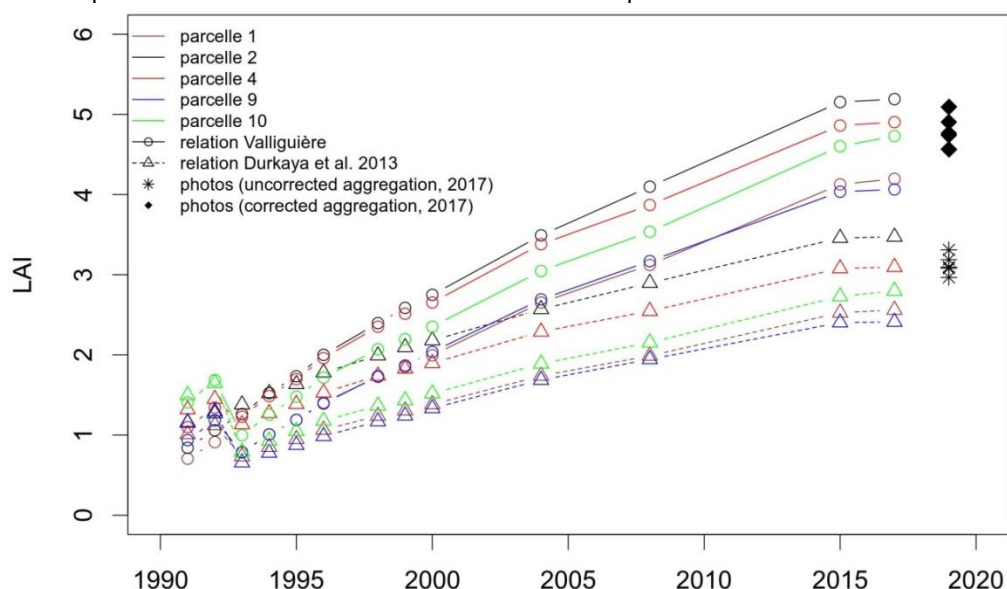


Figure 26 : Reconstitution de l'indice foliaire par parcelle à partir de relations allométriques calculées au cours de ce projet (relation Valliguières), ou proposée par Durkaya et al. (2013). À titre de comparaison, sont indiquées les estimations par photos hémisphériques pour 2017 sans (comme dans la figure 25) ou avec agrégation du feuillage (degré d'agrégation moyen pour les conifères). Parcelle 1 : 600 arbres/ha; parcelle 2 : 1200 arbres/ha; parcelle 4 : 800 arbres/ha; parcelles 9 et 10 : 400 arbres/ha.

Au delà du niveau de LAI, les estimations par relations allométriques donnent des différences plus marquées entre traitements.

Avec les méthodes allométriques l'effet de l'éclaircie de 1992 sur le LAI reste perceptible en 2017, la parcelle témoin affichant le LAI le plus élevé, suivi de la parcelle éclaircie à 800 tiges/ha, les autres traitements affichant des valeurs similaires. Toutefois, on ne retrouve pas de différence entre traitements pour les LAI estimés par photos hémisphériques. Cela peut venir d'une compensation par le sous-bois comme mis en évidence par les estimations du taux de recouvrement herbacées et arbustif, qui est plus important dans les parcelles éclaircies.

Il est difficile de trancher quant à la bonne valeur de LAI à utiliser pour modéliser le bilan hydrique de ces peuplements. Si on considère seulement le cèdre (en faisant l'hypothèse d'une différenciation parfaite des niches entre arbustes/herbacées et cèdre) l'utilisation des allométries seraient pertinentes. Toutefois l'incertitude vis à vis des relations utilisées mérite d'être éclaircie.

Cependant, les valeurs obtenues avec la relation allométrique de Durkaya et al. (2013) sont proches de celles obtenues par photos hémisphériques, et c'est donc cette relation que nous avons utilisé pour la modélisation.

4.1.6 Variables et traits écophysologiques

- Effet sur le potentiel hydrique et la résistance à la cavitation

L'effet des traitements d'égagement sur le potentiel hydrique de base étant parfois significatif à certaines dates (données non montrées), nous avons séparé le jeu de données selon les deux traitements d'égagement les plus représentés afin de nous focaliser sur l'effet de l'éclaircie. Les deux traitements sont : (1) Élagage à 2 m + 400-450 tiges /ha à 4 m en 1992, puis à 6 m en 1996 et (2) Élagage à 2 m en 1992 + puis 400-450 tiges/ha à 4 m en 1996 (figures 27 et 28, tableaux 4 et 5)

L'été 2017 a été l'un des plus secs des 50 dernières années. Lors de cette sécheresse extrême, le potentiel de base a montré des valeurs basses dès le printemps (-1.5 MPa en juin), ce qui est indicateur d'une sécheresse précoce (les valeurs de potentiel attendu lorsque le sol est plein d'eau étant de l'ordre de 0 à -0.5 MPa). À cette date, un effet traitement était déjà perceptible sur le potentiel de base (entre le traitement 400 tiges/ha et 1200 tiges/ha notamment) mais aucune différence n'était significative pour le potentiel minimum. La sécheresse s'est ensuite aggravée, le potentiel minimum ayant atteint des valeurs de l'ordre de -3.5 MPa dans les traitements à forte densité. Les traitements à forte densité (1200 tiges/ha et 800 tiges/ha dans une moindre mesure) ont montré des différences significatives par rapports aux autres traitements (400 et 600 tiges/ha) pour le potentiel de base et le potentiel minimum. Les valeurs très basses de potentiel atteintes dans la parcelle à 1200 tiges/ha ont probablement entraîné un peu de cavitation (figure 29) bien que le faible échantillonnage (n=5) n'ait permis d'obtenir qu'une différence marginalement significative (P=0.08).

Suite à la coupe de mars 2018, les différences de potentiel entre traitements se sont largement estompées. Le manque d'effet du traitement peut également être causé par la faible intensité de sécheresse en 2018.

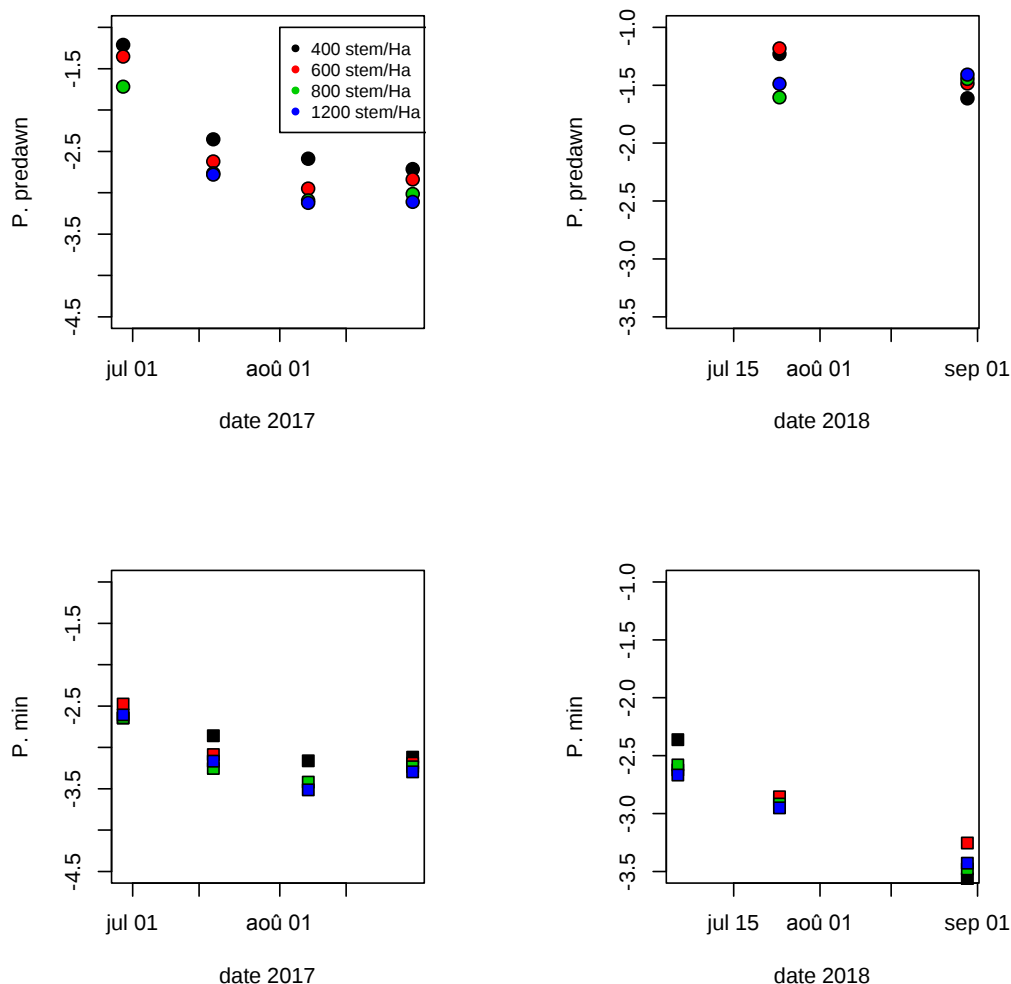


Figure 27 : Potentiels hydriques de base (P. predawn) et minimum (P. min) selon le niveau d'éclaircie 1992. Ces valeurs correspondent aux mesures faites sur le traitement d'élagage à 2 m en plein + 400-450 tiges/ha à 4 m en 1992 puis à 6 m en 1996.

date	potentiel de base				potentiel de minimum			
	modèle linéaire	student test	student test	student test	modèle linéaire	student test	student test	student test
	Potentiel = traitement	400 vs 1200	600 vs 1200	800 vs 1200	Potentiel = traitement	400 vs 1200	600 vs 1200	800 vs 1200
29/06/17	0.0169	0.0384	0.0804	0.0656	0.6596	0.467	0.9366	0.4012
18/07/17	0	0.0268	0.0012	0.0014	0.0054	0.0283	0.0173	0.1623
07/08/17	0	0.0399	0.0038	0	0.0126	0.0005	0.0035	0.8198
29/08/17	0	0.011	0.0002	0.0001	0	0.0002	0.0002	0.0046
04/07/18	0.8393	0.8488	0.9734	0.9167	0.0042	0.064	0.0086	0.059
24/07/18	0.2221	0.9178	0.0491	0.2385	0.5088	0.1286	0.0084	0.1401
30/08/18	0.334	0.1073	0.1841	0.6255	0.3739	0.4042	0.6437	0.9787

Tableau 4: P-value du modèle linéaire testant l'effet traitement par date et tests de student sur les différences de moyennes entre les densités pour le traitement d'élagage à 2 m + 400-450 tiges/ha à 4 m en 92 puis à 6 m en 96. La comparaison est faite entre chaque traitement et le témoin à 1200 tiges/ha. L'amplitude et le sens de l'écart peut être lus sur la figure des dynamiques de potentiel (figure 27).

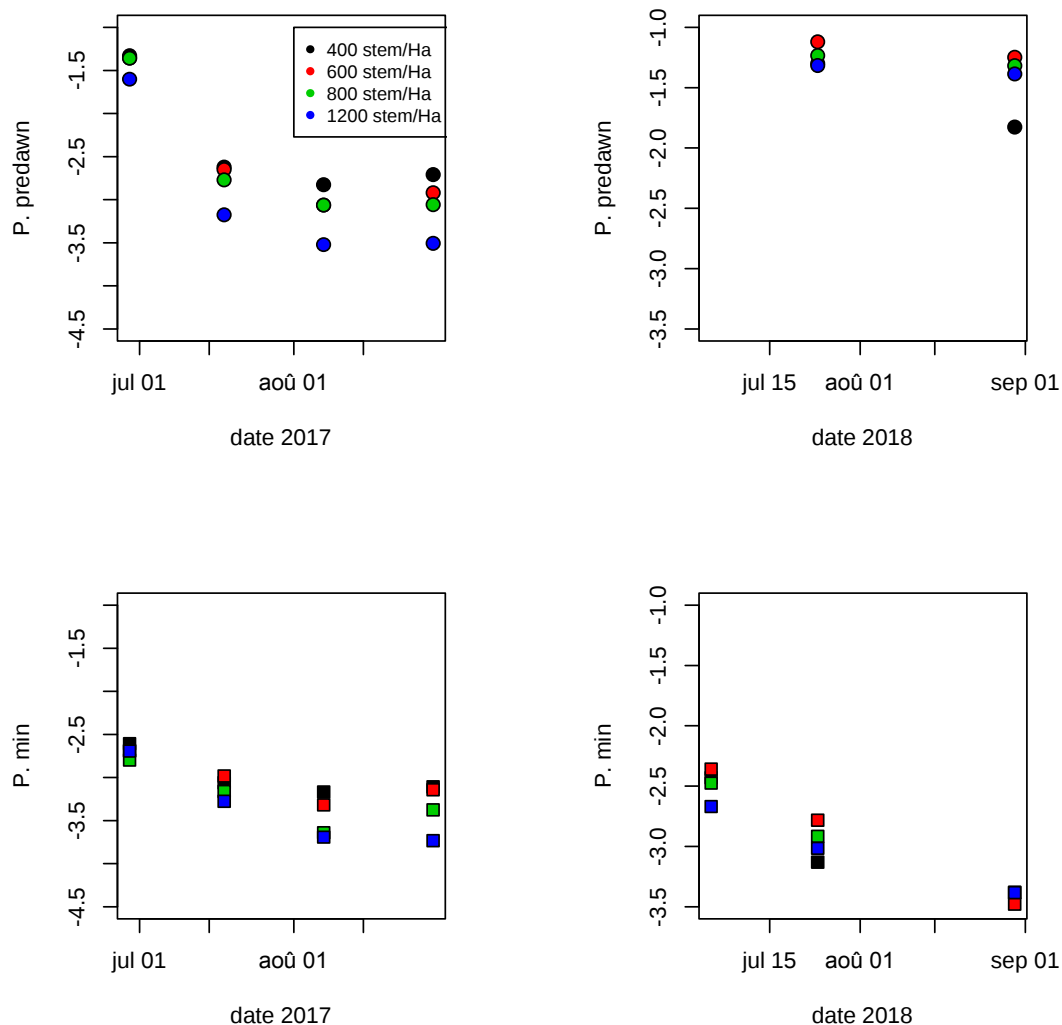


Figure 28 : Potentiels hydriques de base (P. Predawn) et minimums (P. Min) selon le niveau d'éclaircie 1992. Ces valeurs correspondent aux mesures faites sur le traitement d'égavage à 2 m en 1992 puis 400-450 tiges/ha à 4 m en 1996.

date	potentiel de base				potentiel de minimum			
	modèle linéaire	student test	student test	student test	modèle linéaire	student test	student test	student test
	Potentiel = traitement	400 vs 1200	600 vs 1200	800 vs 1200	Potentiel = traitement	400 vs 1200	600 vs 1200	800 vs 1200
29/06/17	0.1088	0.1115	0.1643	0.028	0.5095	0.375	0.1104	0.5399
18/07/17	0.0086	0.0063	0.1881	0.8839	0.0437	0.1176	0.2349	0.2991
07/08/17	0.01	0.0339	0.2114	0.8321	0.0009	0.0076	0.0206	0.3638
29/08/17	0.0067	0.0336	0.0976	0.5473	0.1616	0.1718	0.3995	0.5003
04/07/18	0.1324	0.0809	0.3536	0.3417	0.0813	0.1002	0.6482	0.3443
24/07/18	0.0385	0.3133	0.034	0.3575	0.3023	0.5371	0.3346	0.7578
30/08/18	0.47	0.4519	0.7685	0.867	0.8919	0.2029	0.2602	0.7259

Tableau 5: P-value du modèle linéaire testant l'effet traitement par date et tests de student sur les différences de moyennes entre les densités pour le traitement d'égavage à 2 m + 400-450 tiges/ha à 4 m en 96. La comparaison est faite entre chaque traitement et le témoin à 1200 tiges/ha. L'amplitude et le sens de l'écart peut être lus sur la figure des dynamique de potentiel (figure 28).

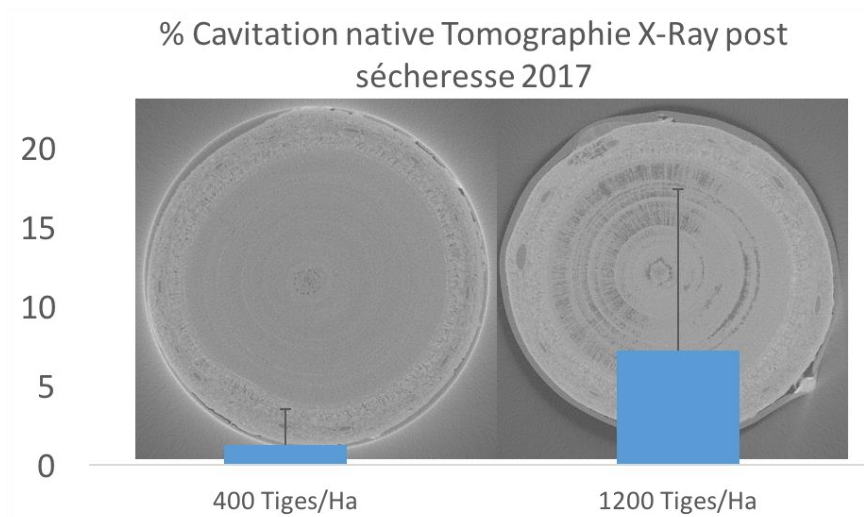


Figure 29. Cavitation native suivant l'été 2017

- Effet sur la résistance à la cavitation et les courbes pression-volume

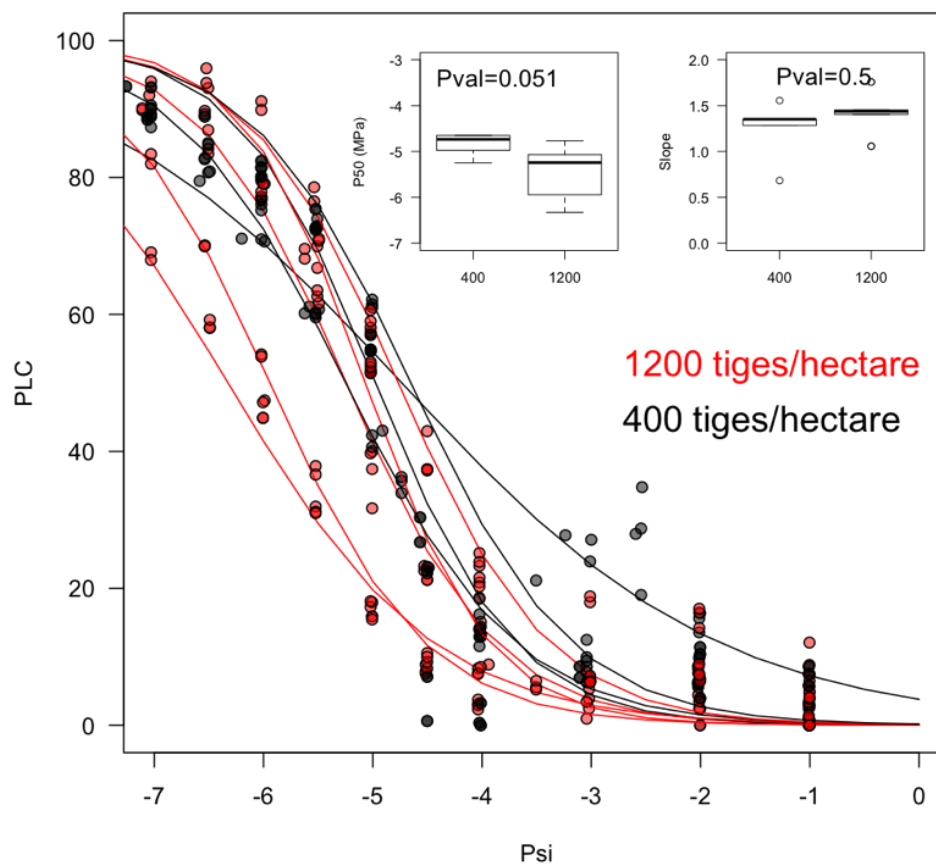


Figure 30: Courbes de vulnérabilité à la cavitation réalisées avec la méthode du cavitron au PIAF. Une différence de vulnérabilité à la cavitation faiblement significative est mise en évidence avec des P50 (50 % de cavitation, soit PLC=50) moins négative dans les traitements éclaircis que dans le témoin

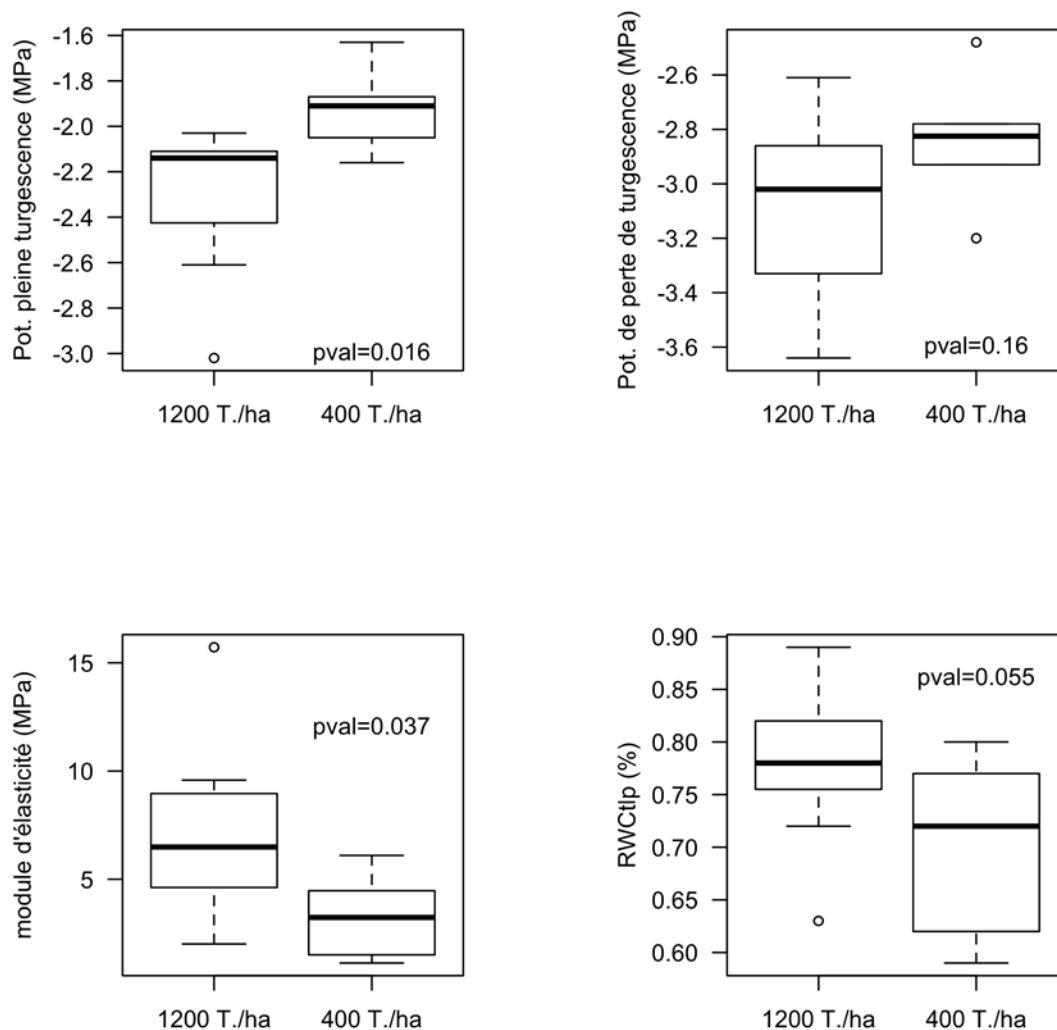


Figure 31. Paramètres des courbes pression-volume pour des arbres de deux traitements de densité sur le site de Valliguières. Quatre paramètres sont montrés (de gauche à droite et de haut en bas): le potentiel osmotique à pleine turgescence (π_0 , MPa), le potentiel de perte de turgescence (π_{tlp} , pour turgor loss point en MPa), le module d'élasticité (ϵ en MPa/%) et le contenu en eau au point de perte de turgescence.

Les courbes pression-volume ont permis de calculer quatre paramètres qui sont impliqués dans la tolérance à la sécheresse. Un paramètre important que l'on dérive est le potentiel de perte de turgescence (π_{tlp}), il est lié au potentiel hydrique causant le « flétrissement » des feuilles, la fermeture des stomates et donc l'incapacité pour la plante à maintenir ses fonctions métaboliques correctement et à puiser de l'eau dans le sol. Plus π_{tlp} est négatif et plus la plante est considérée « tolérante » ou « acclimatée » à la sécheresse. Du point de vue des mécanismes, π_{tlp} est principalement associée au potentiel osmotique à pleine turgescence (π_0 , MPa) qui est associé à la teneur en solutés des cellules. Des valeurs plus négative de π_0 indique une plus grande accumulation en soluté des cellules. Le module d'élasticité (ϵ en MPa/%) correspond à l'inverse de l'élasticité des parois (plus sa valeur est grande plus les parois cellulaire sont rigides). Ainsi des ϵ élevés permettent de compenser les forces de pression associées à des potentiels négatifs pendant la sécheresse et permettent de conserver un contenu en eau dans les cellules plus élevé au-delà de la perte de turgescence (RWCTlp).

L'ensemble de ces paramètres ont montré des réponses cohérentes avec le stress hydrique mesuré (i.e. potentiels hydriques) dans les parcelles étudiées (figure 31). En effet, les arbres les plus stressés (1200 tiges à/ha) ont montré des π_0 et des π_{tip} plus négatifs ainsi que des ε et des RWC_{tip} plus élevés que dans les traitements éclaircis. Bien que l'échantillonnage soit faible, ces résultats corroborent les mesures de résistance à la cavitation qui ont également montré un décalage vers des valeurs plus négatives dans les peuplements ayant les plus fortes densités et ayant subi les stress hydriques les plus importants (figure 30).

Ces résultats indiquent qu'il existe une acclimatation au stress hydrique qui se joue au niveau des tissus et des cellules dans le cas où les peuplements subissent plus de stress hydrique dans les parcelles à forte densité (vraisemblablement associé à de plus grandes surfaces foliaires et de plus forte consommation en eau). Ces ajustements des traits ne semblent pas permettre pas d'éviter la cavitation, plus présente dans les traitements à forte densité suite à la sécheresse extrême de 2017.

Les paramètres des courbes pression-volume ont également servi à calibrer le modèle *sureau* qui utilise ces valeurs pour calculer la régulation de la transpiration (par conductance stomatique).

Conclusion

Au-cours de la sécheresse 2017 (l'une des plus fortes sécheresses des 60 dernières années dans la région), nous avons mis en évidence un meilleur état hydrique dans les parcelles éclaircies. Ce résultat est notable car il indique un effet bénéfique de l'éclaircie même après 20 ans, et lorsque le LAI cumulé arbres + sous-bois semble identique.

Cet effet s'est traduit par une cavitation légèrement plus importante dans le traitement témoin par rapport au traitement le plus éclairci. Cela suggère que des sécheresses plus fortes pourraient avoir des effets très néfastes sur la survie des arbres, un taux de cavitation supérieur à 50% pouvant entraîner la mortalité (Brodribb et Cochard 2009).

D'un autre côté, nous avons trouvé que les cèdres dans le traitement témoin à forte densité semblent légèrement plus résistants à la cavitation (figure 30).

Nos mesures de potentiel et de cavitation peuvent servir à valider des modèles fonctionnels utilisés ensuite, et les traits stomatiques et hydrauliques peuvent être utilisés pour calibrer les modèles fonctionnels afin de prédire l'effet du climat et du niveau d'éclaircie sur le stress hydrique et la cavitation (cf § 4.3).

4.1.7 Caractérisation du substrat

- Contexte topographique et géomorphologique

Le dispositif est situé sur un plateau calcaire. L'assise géologique est un calcaire urgonien, compact, pur et dur en pendage horizontal conforme. La pente est très faible partout, les blocs mis à jour le long des raies de sous-solage attestent de la présence des bancs de roche, plus ou moins altérés mais en place, à faible profondeur, sur l'ensemble des placettes expérimentales.

- Prospection géophysique initiale : cartographie de la conductivité du sol/sous-sol avec un EM31

Les conductivités mesurées s'étalent de 2.5 à 7.5 mS/m (soit de 130 à 400 Ohm.m environ en résistivité). Des conductivités plus faibles peuvent être liées à une charge en cailloux plus importante ou de la roche moins altérée proche de la surface, ou encore une variation importante de la teneur en eau. On observe un gradient Sud – Nord d'augmentation de la résistivité sur les placettes 1 à 4, une variabilité importante pour la placette 2 (plus conductrice également) et pour les placettes 7 et 9 (figure 32).

Cartographie EM31 - dipole horizontal

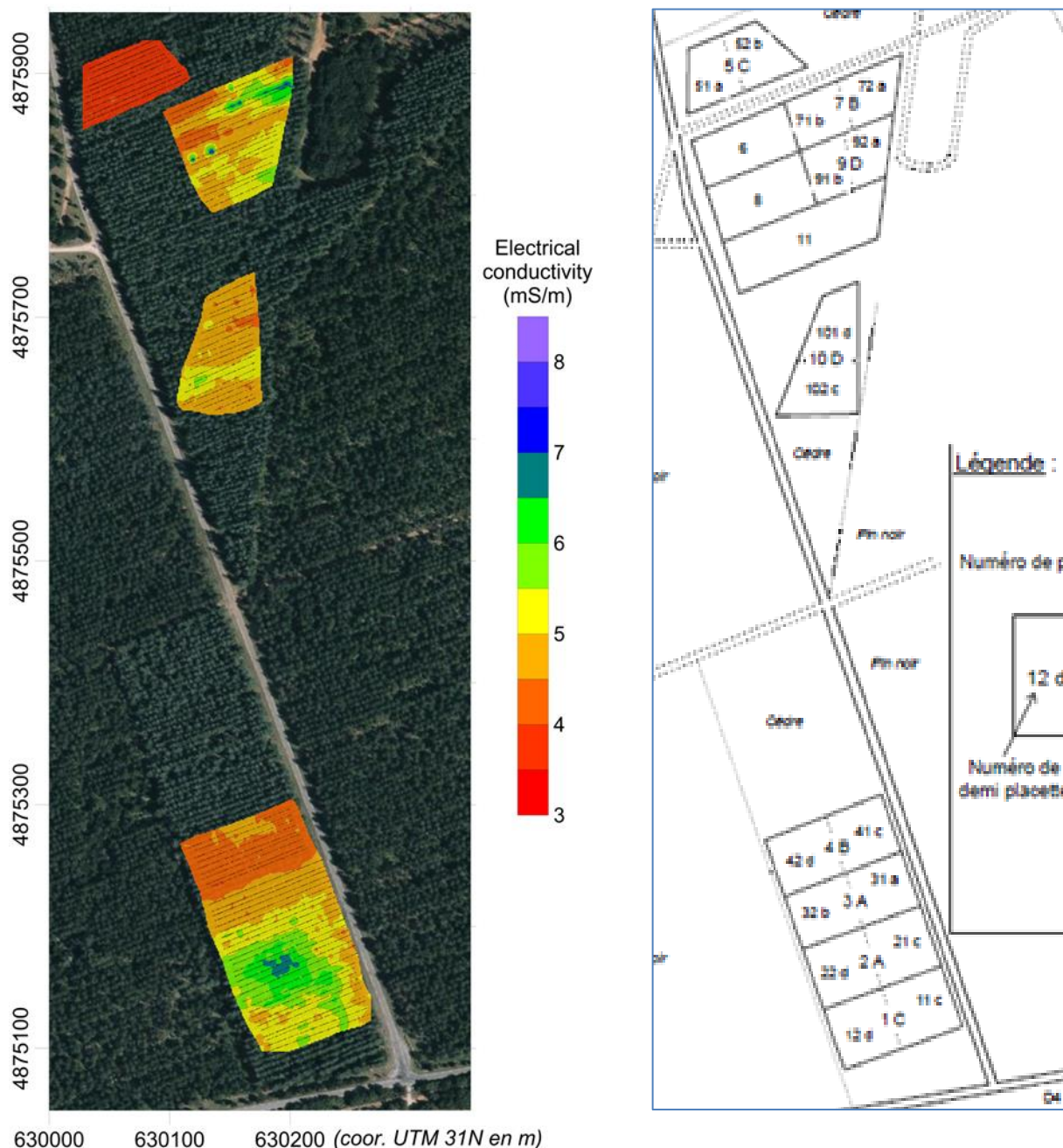


Figure 32 : Cartographie spatiale horizontale de la conductivité du site de Valliguières (juin 2017)

- Mesures ERT

La figure 33 montre la distribution des résistivités du sol, tirée des mesures ERT, sur une profondeur d'une vingtaine de mètres à la verticale des lignes d'électrodes sur les placettes 1,2,4,9 pour une période sèche (fin août 2017, placettes 1,2,4 – septembre 2018 placette 9) et une période humide (Avril 2018). Sur cette période humide en avril, les zones avec une résistivité supérieure à 800 Ohm.m dénotent plutôt des zones de calcaire peu altéré devenant probablement compact et massif à partir de 1600 Ohm.m et donc à priori des obstacles forts à l'enracinement. On distingue ainsi sur les placettes 1, 4, 9 des zones plus résistantes, de calcaire peu altéré, à l'ouest de 3 à 5 m de profondeur à sub-affleurant. Les placettes 4 et 9 montrent des zones très résistantes entre 2.5 et 5 m de profondeur, qui sont assez continue sur la placette 9. La placette 1 est la moins résistante globalement parmi ces 3. Sur ces 3 placettes on trouve des zones plus conductrices (du centre vers l'est pour 1 et 4) signalant des zones de calcaire plus altéré. Ces résultats se relient assez bien aux profils pédologiques. La placette 2 cependant se distingue de trois autres avec un comportement anormal, en étant la placette la plus conductrice sur l'ensemble du profil et en ne correspondant pas aux observations pédologiques, où on trouve un calcaire peu altéré et peu profond (donc normalement plus résistant) au centre de la parcelle. On constate également sur cette parcelle une évolution plus faible en surface entre

période sèche et humide, et quasiment nulle en profondeur, avec des résistivités qui restent faibles. La différenciation en profondeur peut être liée à un changement de lithologie, que l'on retrouve également à l'est sur la parcelle 1.

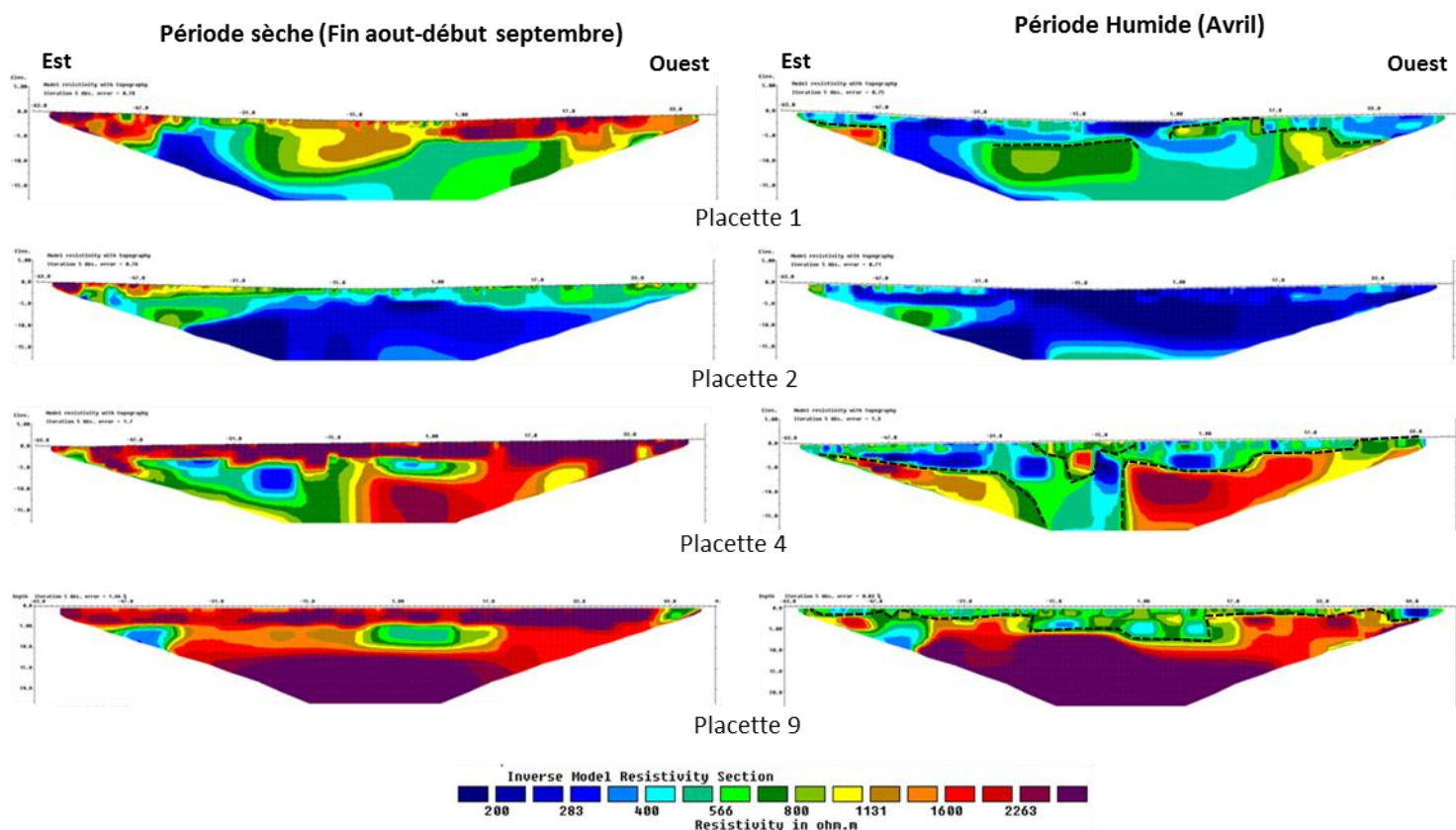


Figure 33 : Distribution de la résistivité du sol mesurée par ERT en section verticale sous les placettes 1, 2, 4 et 9 à deux périodes : humide et sèche (fin d'été et début printemps). Les traits en pointillés sur les sections de la période humide représentent une limite possible du calcaire peu altéré.

Profils pédologiques

Les fosses ouvertes à la pelle mécanique (cf plan en annexe 3) sont peu profondes, de 50 à 120 cm, limitées soit par un dallage de blocs résultant du démantèlement sur place des bancs de calcaire, soit par la roche peu altérée. Les différences de profondeur de ces fosses reflètent sans doute moins une limite pédologique que la capacité de creusement de la pelle mécanique.

- Profil de sol type:

Le matériau parental du sol est l'altérite de la roche en place.

Le sol est peu différencié avec un profil Aci/Sci/Cci.

- L'horizon A est mince, assez clair, limoneux décarbonaté.
- L'horizon S est brun-rouge (teinte 5 YR 3/4 ou 5 YR 4/4) limono-argileux, décarbonaté, assez bien structuré et peu compact. Il est relativement épais, atteignant, sauf dans un cas, 40 à 70 cm de profondeur, mais avec une charge très forte (75 à 80 %) en blocs et pierres de calcaire dur, aux arêtes émoussées, souvent agencés selon l'orientation des bancs de roches. Seule une petite portion du volume du sol est donc prospectable par les racines, qui sont déviées par ces blocs et plus ou moins contrariées par leur organisation en lit horizontaux.
- L'horizon C sous-jacent se distingue de l'horizon S par une structure lithique plus nette et une terre fine très peu abondante, localisée dans les fissures de la roche. Il n'a pas toujours été atteint car les blocs présents dans l'horizon S peuvent former un dallage impossible à démanteler. Le faible volume de la terre fine rend difficile son observation et sa description (texture, compacité, ...). C'est pourquoi elle n'est pas décrite dans les fiches. Cependant, cette terre fine présente des caractéristiques proches de celle de l'horizon S : même couleur, sans doute un peu moins structurée et un peu plus compacte. Elle contient toujours des racines, moins nombreuses qu'au-dessus et de petite taille. La limite de prospection racinaire n'a jamais été atteinte.

Ce sol peut être rattaché à la fois aux CALCISOLS de par ses caractéristiques chimiques et sa saturation en calcium (diagnostic basé sur le contexte géomorphologique et non sur une analyse chimique) et aux PEYROSOLS pierriques de par ses caractéristiques physiques et sa très forte charge en blocs de calcaire.

Il s'agit d'un substrat typique des situations de plateau sur calcaire dur, avec un sol développé dans les fissures et joints de stratification de la roche. La terre fine est décarbonatée mais le complexe absorbant reste dominé par le calcium qui limite la minéralisation de la matière organique. Pour autant, ces sols ne présentent pas de carence trophique. Leur principal facteur limitant est d'ordre physique, avec une proportion de blocs extrêmement élevée qui réduit fortement le volume de terre fine prospectable par les racines et la réserve utile. Cette charge en éléments grossiers est en partie compensée par des fissures et diaclases souvent larges, qui atteignent sans doute plusieurs mètres profondeur, qui ne sont pas accessibles par les moyens classiques d'observations mais qui sont prospectées par les racines, notamment celles du Cèdre. C'est pourquoi des techniques d'exploration géophysique en profondeur basée sur la tomographie des résistivités électriques ont été utilisées.

- Variations

Il est difficile de déceler une structuration géopédologique à partir des profils décrits car les différences sont ténues. On peut cependant distinguer des variantes par rapport au profil type (annexe 3):

Fosse 1 – ouest de la placette 2. Position légèrement surélevée par rapport au reste de la placette avec des blocs plus gros le long des raies de sous-solage. La fosse est très peu profonde (50 cm) et la prospection racinaire faible dès 15 cm. La fosse 5a (ouest de la placette 1) s'en rapproche avec une roche peu altérée, à fissures étroites dès 45 cm de profondeur.

Fosse 5b – est de la placette 1. Le calcaire est moins homogène, avec des poches de roche altérée friable. La terre fine est très limoneuse et non décarbonatée (effervescence à HCl - profil Aca/Sca/Cca). La fosse 2 s'en rapproche, avec un horizon C présentant de la roche pourrie et de la terre fine calcaire.

Fosses 4 et 6 – partie nord du dispositif. Des racines de toute taille sont bien visibles sur le plancher de la fosse, attestant d'une prospection racinaire profonde peut-être plus importante que dans les autres substrats décrits.

- Calcul de la réserve utile

La réserve utile a été évaluée sur la base des fonctions de pédotransfert d'Al Majou, (tableaux 6 et 7) et en considérant que les éléments grossiers ne stockent pas d'eau.

classe de texture	correspondance Jamagne	surface (0-20cm)	profondeur (>20cm)
very fine	ALO	1.34	0.99
fine	AS, A, AL	1.31	1.17
medium fine	LA, LM, LL	1.7	1.45
medium	(SA), LSA, LAS, LS, LMS, LLS	1.68	1.39
coarse	(SA), SL, S	1.14	0.9

Tableau 6 : fonctions de pédotransfert d'Al Majou et correspondance avec les classes de texture de Jamagne

n° fosse	n° demie placette	n° transect ERT	CEG S	limite S / C	CEG C	profondeur fosse	RU fosse	RU fosse + 3 m +300
1	22	T2	80	15	90	50	10	32
2	21	T2	80	50	90	120	26	47
3	41	T4	80	70	90	110	27	49
4	101/10	sans	75	40	85	65	21	43
5a	12	T1	75	45	90	70	21	43
5b	11	T1	75	50	90	100	27	48
6	92	T9	85	70	90	70	16	38

Tableau 7 : caractéristiques des profils de sols et calcul de la réserve utile

Si l'on s'en tient aux profils de sols qui ont pu être décrits dans les fosses pédologiques, il apparaît clairement que la faible profondeur et la forte charge en éléments grossiers induisent une réserve utile extrêmement faible, inférieure à 30 mm, incompatible avec un peuplement de cèdre de bonne fertilité.

De fait, il est clair que le substrat prospecté par les racines de cèdre est plus profond que les fosses ouvertes. Si l'on extrapole les caractéristiques de l'horizon C sur une profondeur supplémentaire de 3 mètres, la réserve utile est encore en deçà de 50 mm, ce qui reste très faible. Il existe donc sans doute un compartiment hydrique non accessible à ce type d'observation.

4.1.8 Analyse spatialisée

Les mesures géophysiques (transects ERT et cartographie EM31) ont été mises à profit pour examiner d'une part la distribution du prélèvement hydrique des arbres (ERT, cartographie verticale) et, d'autre part, les relations spatiales avec l'état sanitaire des arbres (EM31, cartographie horizontale).

- Distribution et profondeur du prélèvement en eau

La différence de résistivité en un même endroit entre des valeurs mesurées à une période humide et sèche dépend ici, au premier ordre, de la variation en teneur en eau du milieu. La relation résistivité-teneur en eau n'est cependant pas linéaire, mais plutôt en puissance (loi d'Archie) avec un exposant plus ou moins proche de 2 (hypothèse faite ici). Dans ces conditions, on peut exprimer le rapport des teneurs en eau en période sèche sur celle de la période humide par : $\frac{\theta_s}{\theta_h} = \sqrt{\frac{\rho_h}{\rho_s}}$ avec θ_s et θ_h les teneurs en eau en période sèche et humide ; ρ_s et ρ_h les résistivités estimées (au même endroit) en période sèche et humide. On considérera donc ici $\sqrt{\frac{\rho_h}{\rho_s}}$ comme un proxy de la variation de teneur en eau qui est représenté figure 34 pour les quatre parcelles mesurées.

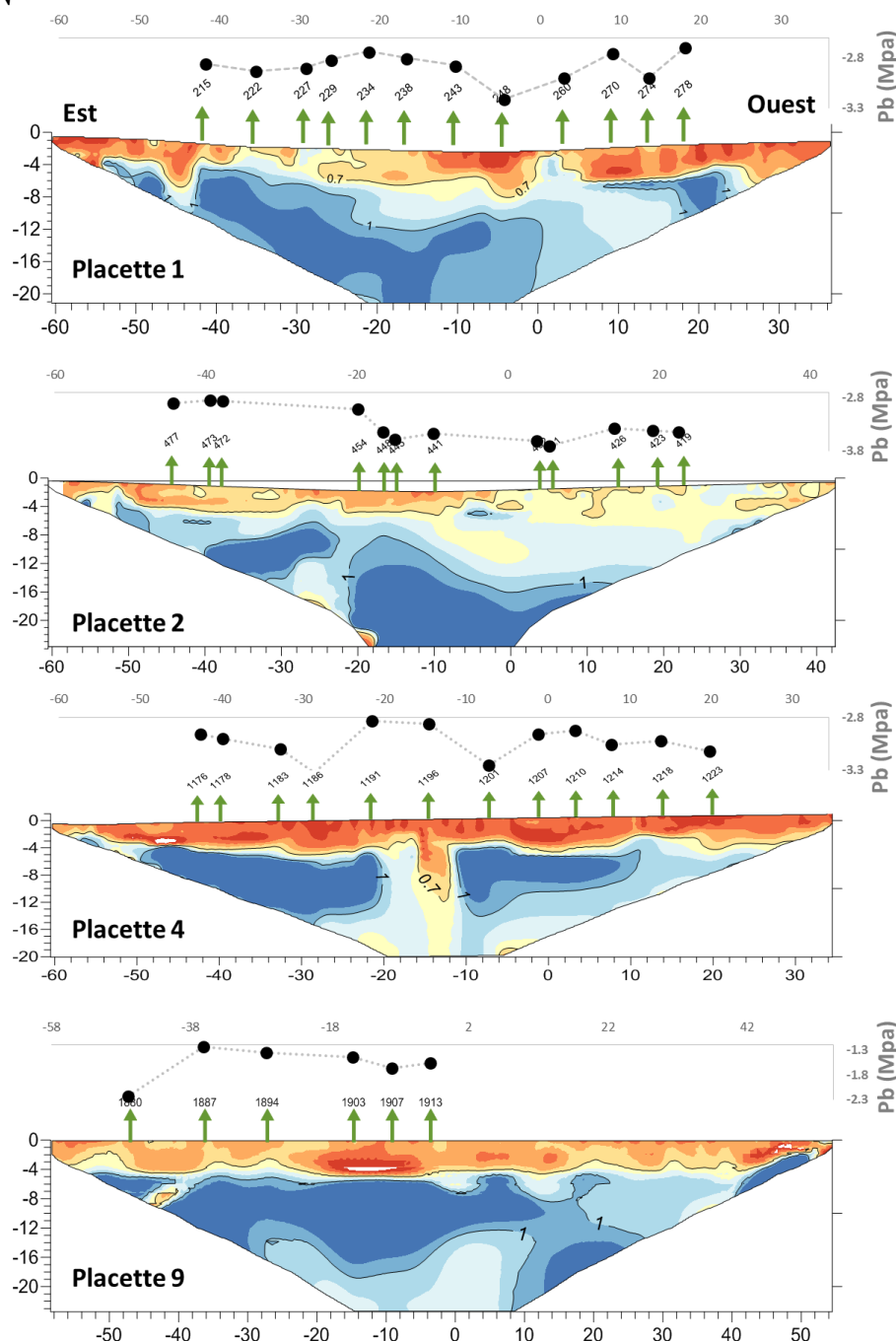


Figure 34 : Section verticale sur les placettes 1, 2, 4 et 9 du proxy du ratio de teneur en eau période sèche/humide estimé par les résistivités électriques ($\sqrt{\frac{\rho_h}{\rho_s}}$) déduites des mesures ERT. Les arbres mesurés sont figurés par des flèches vertes et les potentiels de base (Pb) fin août ou septembre (en sec) sur ces arbres sont également présentés.

La zone de sol/sous-sol fortement influencée par les arbres pour l'eau (délimitée ici par le contour à 70% de la teneur en eau de la période humide sur la figure 34) est variable selon les sites : de 0 m (placette 2) à 4-5 m voire plus de 10 m (placette 4). Ceci conforte l'analyse de la Réserve Utile par profil pédologique, qui montrait la nécessité d'un prélèvement plus profond que le premier mètre. Le classement des placettes par profondeur moyenne de variation hydrique intégrée sur le long du transect (surface < 70% divisée par la longueur de profil) donne : Placette 2 (1200 arbres/ha, H0=14.8 m) : 1.8 m < Placette 1 (600 arbres/ha, H0=15.7 m)) : 3 m < Placette 92 (400 arbres/ha, H0=17.4 m)) : 3.7 m ≤ Placette 4 (800 arbres/ha, H0=15.4 m) : 3.9 m.

Il n'y a pas de lien évident et consistant entre intensité/profondeur de prélèvement et potentiel de base mesuré fin Aout 2017 (ou Septembre 2018, placette 9), que ce soit au niveau arbre individuel (figure 34) ou au niveau valeur moyenne par placettes. Cependant, si on considère les résistivités prises sous les arbres (dans un rayon de 2 m) intégrées sur une profondeur de 0-2 m (réservoir de « surface ») et de 2-6 m (réservoir plus « profond »), il ressort des relations significatives :

- (i) en moyenne sur les placettes entre potentiel de base et résistivité :

$$Pb_{moyen} = -8.35 \cdot 10^{-4} R_{aout.02} + 1.93 \cdot 10^{-3} R_{aout.26} - 3.6$$

$$(r^2=0.9998, p=0.7\%, n=4)$$

- (ii) en considérant chaque arbre individuellement, sur toutes les parcelles :

$$Pb_{arbre} = -5.6 \cdot 10^{-4} R_{aout.02} + 6.4 \cdot 10^{-4} R_{aout.26} + 2.8 \cdot 10^{-3} R_{avril.02} - 3.89$$

$$(r^2=0.667, p=3 \cdot 10^{-7}\%, n=42, RMSE=0.34 \text{ MPa})$$

où $R_{aout.02}$, $R_{aout.26}$, $R_{avril.02}$ sont les résistivités estimées par ERT sous chaque arbre intégrées sur 0-2 m et 2-6 m en août (période sèche) et sur 0-2 m en Avril (période humide) respectivement.

L'intégration de la densité du peuplement permet d'améliorer quelque peu le modèle (ii) arbre individuel :

$$(iii) \quad Pb_{arbre} = -4.7 \cdot 10^{-4} R_{aout.02} + 4.5 \cdot 10^{-4} R_{aout.26} + 2.1 \cdot 10^{-3} R_{avril.02} - 7.9 \cdot 10^{-4} \text{ densité} - 2.89$$

$$(r^2=0.736, p=2 \cdot 10^{-8}\%, n=42, RMSE=0.30 \text{ MPa})$$

Ces relations montrent que l'augmentation de la résistivité dans la couche de surface (0-2 m) sous l'arbre, et donc la chute de sa teneur en eau, diminue le potentiel de base tandis que la couche plus profonde (2-6 m) tamponne cette diminution. Les différences spatiales en profondeur seraient plus le résultat du prélèvement d'eau par les arbres et où une zone plus résistive pourrait signaler une meilleure contribution du réservoir profond. Pour une zone donnée, la densité du peuplement va jouer à un niveau plus global sur les valeurs minimales que peut atteindre le potentiel de base.

- Lien distribution spatiale des conductivités et état sanitaire-nécroses des arbres:

On constate un lien spatial et temporel entre la conductivité électrique locale du sol (EM31 figure 32, intégrée sur 2 m de rayon autour de l'arbre) et l'augmentation du nombre d'arbres portant des nécroses de plus en plus étendues (figure 35, pour parcelles 1, 2, 4, 9, 10). De 2001 à 2015, on passe d'une situation avec quelques arbres atteints disséminés sur l'ensemble des parcelles, à une situation où ce sont les zones les plus conductrices, puis les plus résistantes qui donnent lieu au plus grand nombre d'arbres et d'aggravation des symptômes. La distribution de ces zones plus favorables à l'apparition de symptômes de nécrose est présentée figure 36A.

En lien avec les analyses des fosses pédologiques, la zone plus conductrice ne représente pas vraiment une zone de sol plus profonde sur la parcelle 2 (c'est même l'inverse, avec des blocs de roches sub-horizontaux peu altérés), mais en fait globalement une zone où l'eau est moins exploitée par les arbres (d'après les profils ERT). Ces zones de faibles et fortes conductivités peuvent donc représenter des zones de contraintes fortes à l'enracinement, ou au stockage d'eau, qui pourraient être une des raisons de l'apparition de nécroses plus fréquentes et plus sévères au cours du temps dans ces zones.

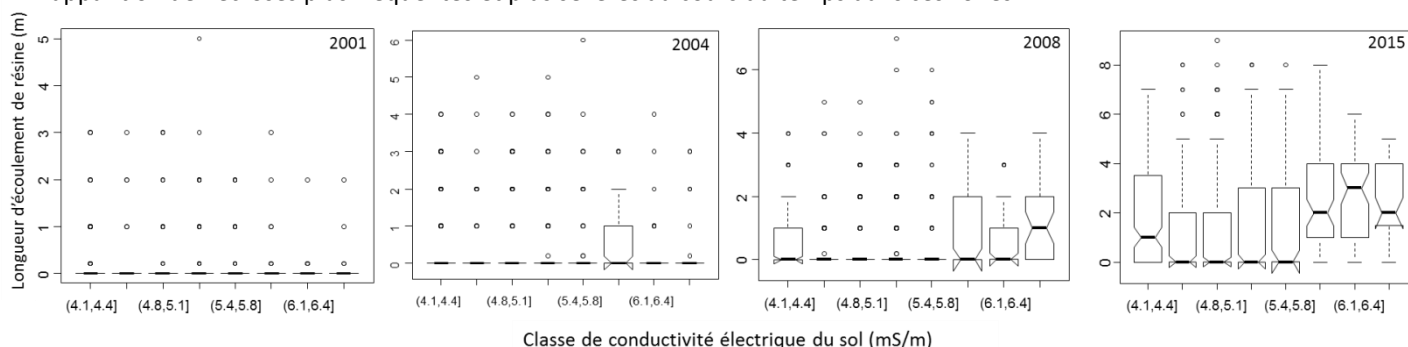


Figure 35 : Intensité de nécrose représentée par la longueur d'écoulement de résine le long du tronc de 2001 à 2015 en fonction de la conductivité locale du sol sur lequel a poussé l'arbre, pour toutes les parcelles (boxplot : médiane, quartiles 25% et 75%).

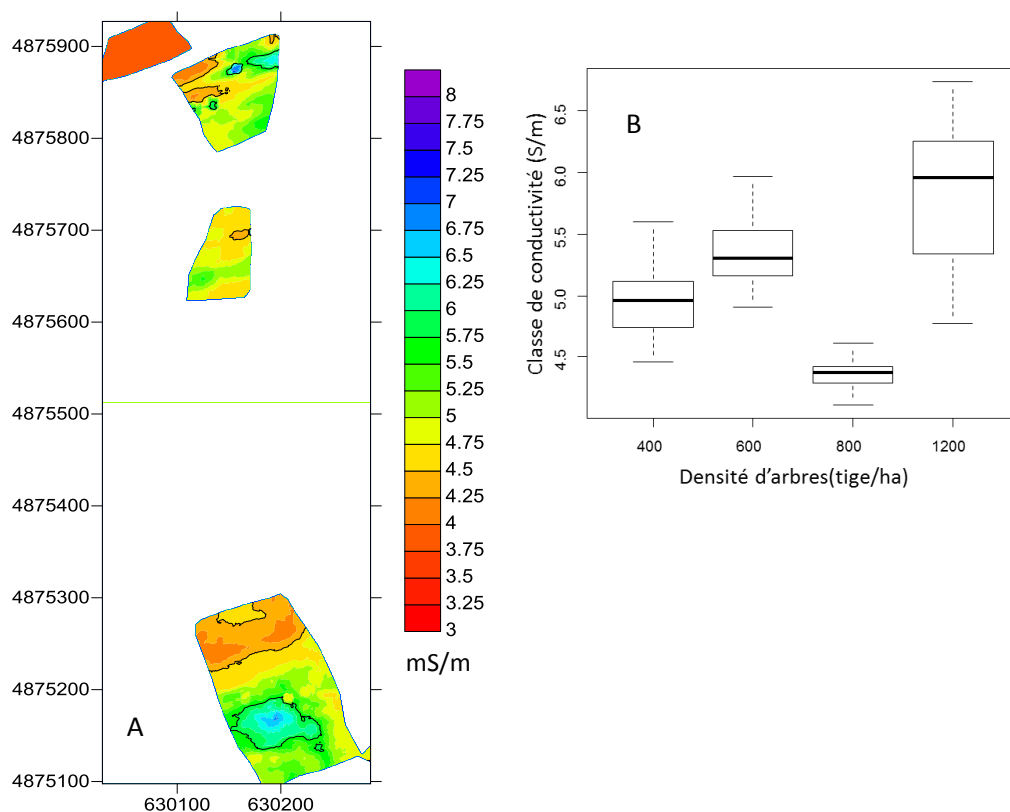


Figure 36 : A/ Zones de faibles et fortes conductivité (en rouge et bleu, entouré par des isocontours noirs) dans lesquelles le nombre et l'intensité des nécroses a progressé plus rapidement qu'ailleurs. B/ Distribution des conductivités du sol sous les parcelles avec différentes densité d'arbres.

Par contre, il n'y a pas de lien spatial évident en considérant uniquement l'intensité de nécrose (longueur d'écoulement de résine) et la conductivité électrique en analysant l'ensemble des parcelles. Cependant, les densités des différentes parcelles ne sont pas équivalentes en terme de conductivité (figure 36B). Si on s'intéresse alors à la nécrose intra parcellaire (et pour une densité donnée), on constate que l'effet « local » du milieu reflété par la conductivité électrique s'exprime essentiellement pour la densité la plus faible à 400 arbres/ha, à partir de 2004, avec une tendance à l'augmentation de la nécrose quand la conductivité électrique du sol augmente (figure 37).

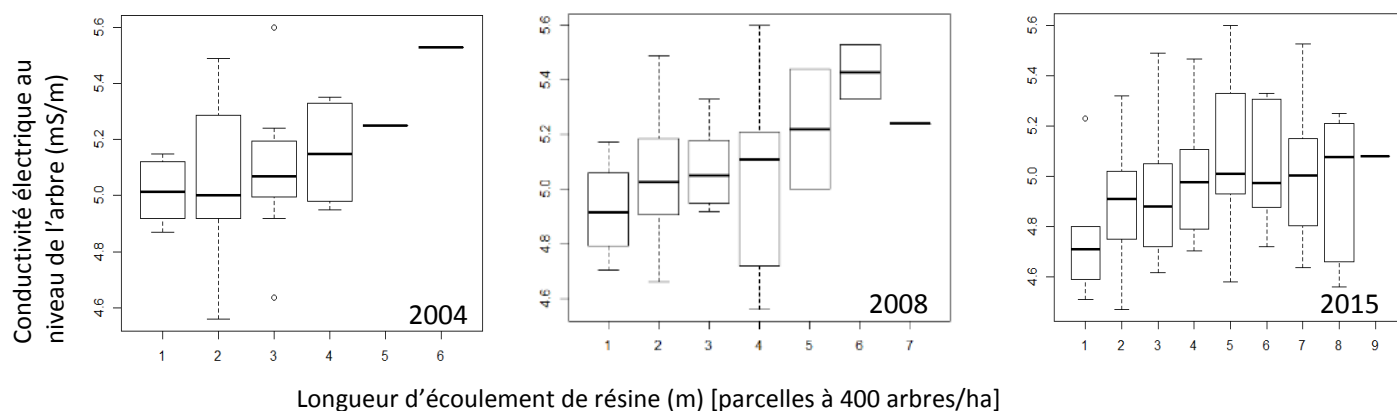


Figure 37 : Distribution des conductivités locales du sol sous des arbres atteints de différents niveaux de nécrose, (représentés par une longueur d'écoulement de résine), à différentes dates dans les parcelles à 400 arbres/ha.

4.2 Dispositif sylvicole de Comefroide-Picaussel (sapin)

4.2.1. Résultats dendrométriques

- Capital sur pied et accroissement

La croissance du peuplement est suivie grâce à des inventaires en plein périodiques (diamètre de précomptage 22,5 cm), le dernier réalisé en octobre 2017. La surface terrière, initialement réduite de moitié dans la placette éclaircie, a moins progressé dans cette modalité que dans le témoin, ce qui s'explique par la très forte imputation du capital producteur (figure 38).

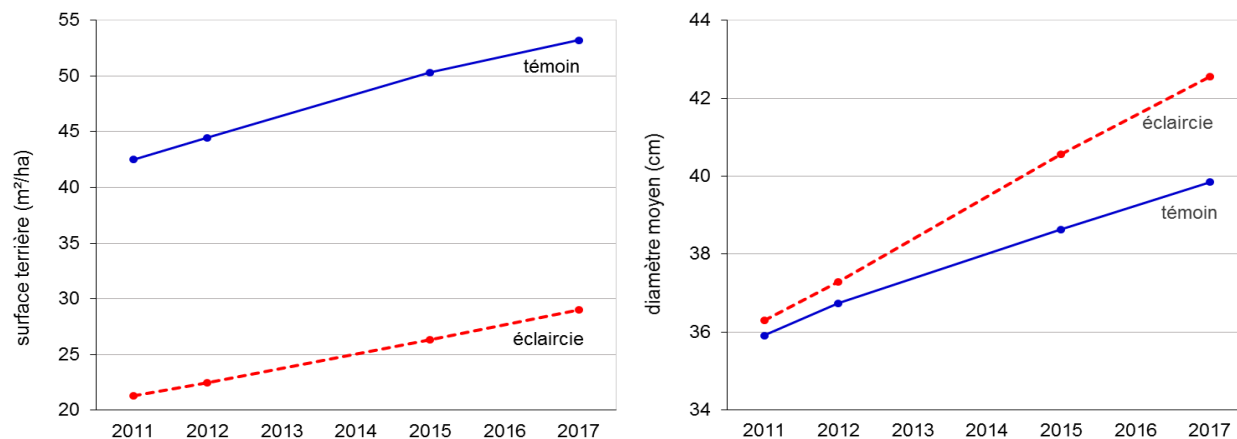


Figure 38 : évolutions de la surface terrière et du diamètre moyen quadratique

En revanche, cette croissance étant concentrée sur un nombre d'arbres deux fois moindre, ceux-ci montrent un accroissement radial nettement stimulé. L'accroissement courant ne s'est pratiquement pas réduit après 6 ans. De fait, le couvert ne s'est pas refermé et les arbres ne sont pas encore en concurrence.

4.2.2 État sanitaire

À l'évidence, le déficit foliaire s'est globalement accru, ce qui indique une dégradation de l'état sanitaire des sapins (figure 39).

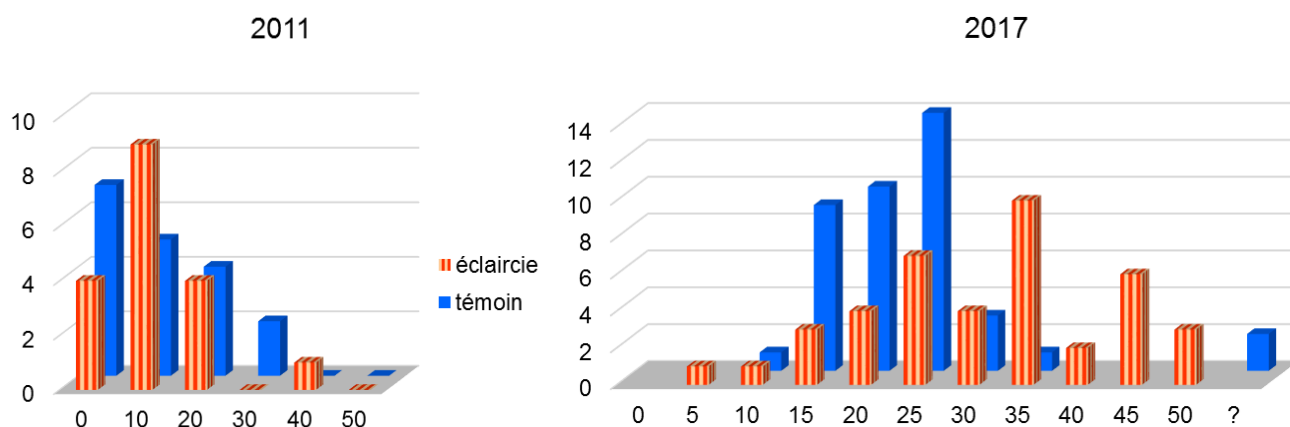


Figure 39 : ventilation des arbres objectifs en fonction du taux de déficit foliaire, par placette, en 2011 (classes de 10 %) et en 2017 (classes de 5 %)

La différence entre modalités semblait assez ténue en 2011, avec un déficit foliaire un peu plus important dans la placette éclaircie. En 2017, l'écart s'est accentué, la majorité des arbres de la placette éclaircie montrant un déficit foliaire supérieur à 25 %, tandis qu'ils restent peu nombreux dans ce cas dans la placette témoin.

Ce constat doit cependant être modulé. D'abord, l'évaluation du déficit foliaire est délicate, même si elle résulte pour chaque arbre de l'observation conjointe de deux opérateurs. Surtout, les conditions d'observation sont très différentes entre la placette

éclaircie, qui permet de voir correctement chaque houppier avec du recul, et la placette témoin, dans laquelle le couvert presque fermé rend l'observation très difficile. C'est ce qui explique que 2 arbres n'aient pu être notés en 2017.

Compte tenu de ces réserves, sur l'état initial et les conditions d'observation, il est difficile de conclure que l'éclaircie a été néfaste pour la santé des arbres suivis. En revanche, on peut affirmer qu'elle n'a pas été bénéfique.

4.2.3 Estimation de l'indice foliaire

La surface foliaire augmente à un rythme régulier dans la placette éclaircie. Elle augmente presque aussi vite dans la placette témoin, avec seulement une légère inflexion depuis 2015 (figure 40). Le couvert n'est donc pas saturé dans cette modalité, malgré la surface terrière élevée de 53 m²/ha.

On ne constate pas encore de convergence entre les deux modalités, contrairement à ce que l'on pouvait attendre.

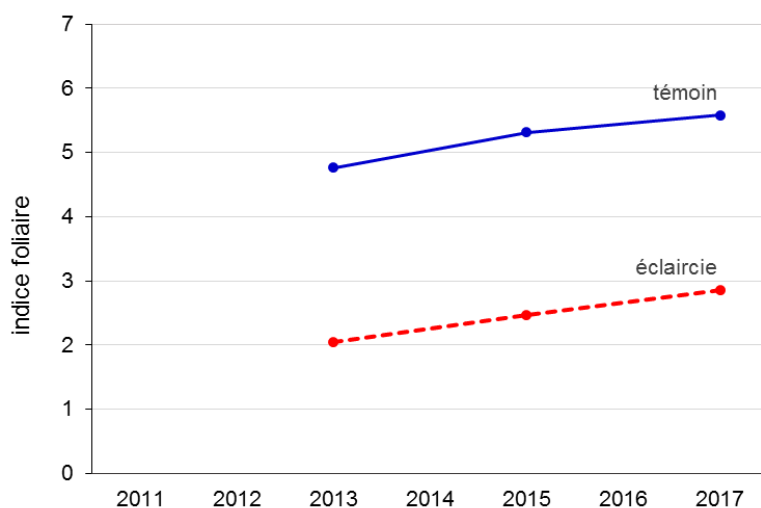


Figure 40 : évolution de l'indice foliaire du peuplement

4.2.4 Sous-bois

- phytovolume (figure 41)

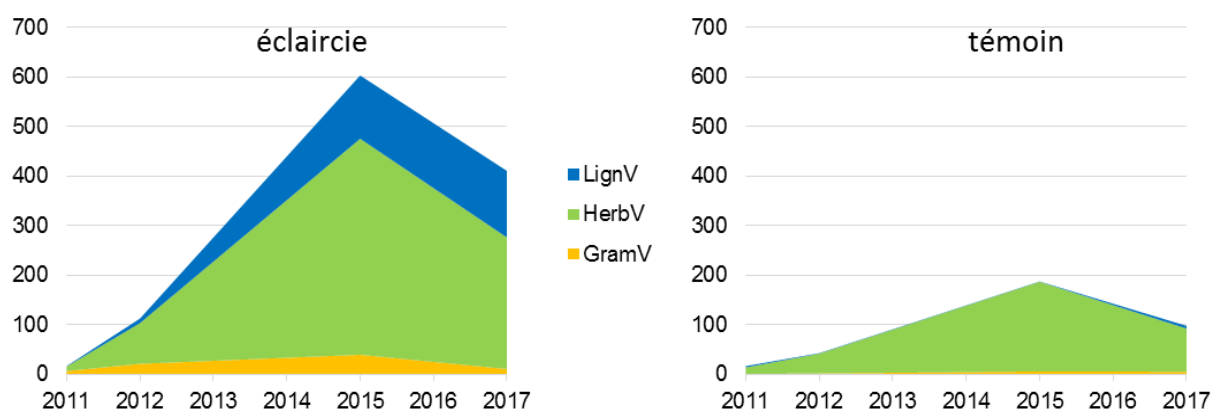


Figure 41: évolution du phytovolume moyen de la végétation du sous-bois (en dm³/m²) par modalité

L'évolution comparée du phytovolume dans les deux placettes montre en effet marqué du traitement (figure 41).

D'une part, on constate un développement beaucoup plus important des herbacées dans la placette éclaircie. Il s'agit en fait de semi-ligneux, ronce et framboisier, dont l'explosion est flagrante sur le terrain. D'autre part, on voit l'apparition et le développement de ligneux, principalement du genêt à balais.

On note aussi dans les deux graphiques une réduction du phytovolume des herbacées entre 2015 et 2017. Ceci s'explique par une saison de végétation humide en 2015 suivie de sécheresses estivales en 2016 et 2017. Enfin, indépendamment de cet irrégularité, il semble anormal que le phytovolume ne soit pas plus stable dans la placette témoin. Il faut sans doute l'interpréter comme un retour à l'équilibre après une perturbation antérieure qui n'a pas été documentée.

- indice foliaire

Des relations ont pu être établies entre phytovolume et biomasse foliaire (figure 42), puis entre biomasse foliaire et surface foliaire (tableau 8).

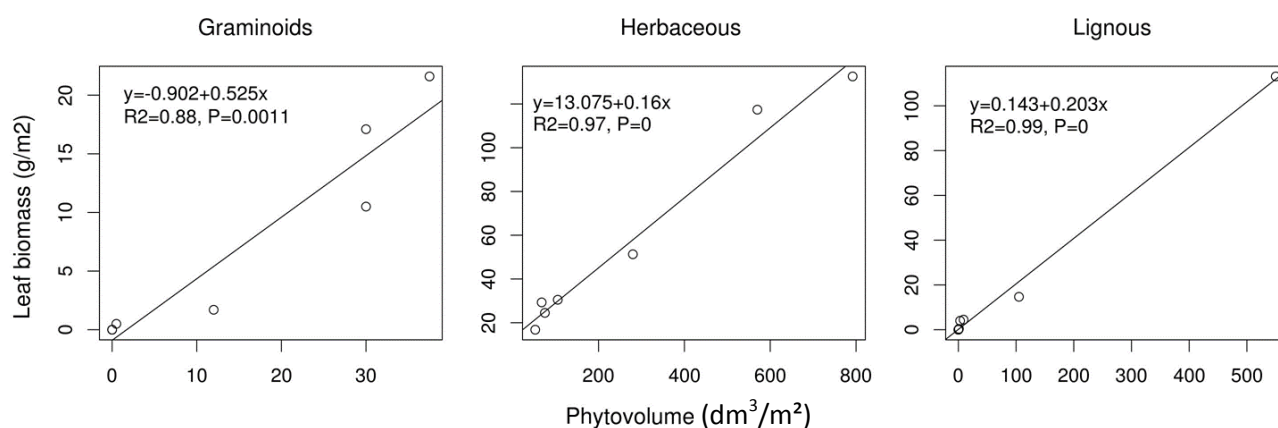


Figure 42 : correspondance entre phytovolume et biomasse, par catégorie de végétaux

Échantillon	Taxon	Catégorie	LMA (g/m²)	LMA moyen par catégorie (g/m²)
1	Graminées	Graminoïde	56.786	46.971
2	Graminées	Graminoïde	37.156	
3	Genêt	Ligneux	830.384	830.384
4	Ronce	Herbacée	111.570	109.152
5	Fraisier	Herbacée	106.735	

Tableau 8 : Valeur du LMA (Leaf Mass per Area masse de feuilles par m²) pour les différentes catégories de végétaux

Les phytovolumes évalués depuis le début dans les deux placettes expérimentales (figure 41) peuvent ainsi être convertis en surface foliaire (figure 43).

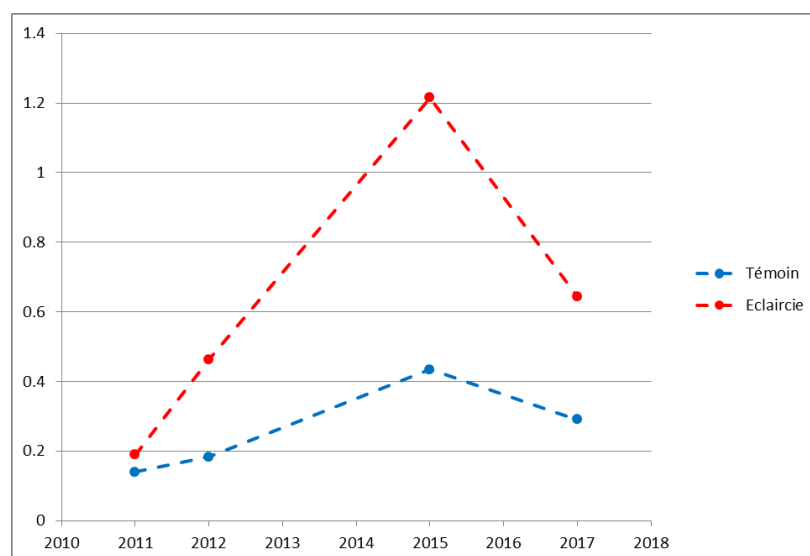


Figure 43 : Évolution de l'indice foliaire (LAI) du sous-bois.

4.2.5 Mesures et observations du substrat

Contexte topographique et géomorphologique

Les parcelles expérimentales sont situées en bordure d'une dépression, au pied d'un versant peu pentu sur calcaire dur. Cette dépression est comblée par une alluvion sans doute d'origine fluvio-glaciaire, meuble, limoneuse et peu caillouteuse.

Description du sol (figure 44)

Le sol est peu différencié, de profil A/S/C. Il s'agit d'un Brunisol dystrique alluvial. Il est très profond, limoneux, développé au sein d'un matériau terreux et meuble. Il ne présente pas de facteur limitant, ni sur le plan hydrique, ni sur le plan trophique. Ce dernier point n'a pas été vérifié par analyse chimique mais est attesté par la végétation spontanée composée d'espèces mésophiles.



Figure 44 : profils de sol. À gauche, placette éclaircie ; à droite placette témoin

Il existe des différences entre les deux profils décrits :

- La roche en place n'a pas été atteinte dans la placette éclaircie où l'on ne trouve qu'un matériau alluvial jusqu'à plus de 150 cm de profondeur. Au contraire, dans la placette témoin, l'horizon inférieur, au-dessous de 85 cm, fait partie de l'altérite de la roche en place (matériau II) et celle-ci, un calcaire schisteux sombre, apparaît à 140 cm de profondeur.
- À cette différence de matériau inférieur correspond une différence de caractéristiques physiques. L'alluvion est limoneuse, enrichie en sable dans la placette éclaircie, et ne comporte que 5 % de cailloux. L'altérite est limono-argileuse avec 20 % de pierres et blocs de calcaire.

Ces différences pédogénétique et physiques sont minimales en matière de potentialité forestière (cf. l'évaluation de la réserve utile) et ne se traduisent pas dans le comportement des sapins.

Calcul de la réserve utile

La réserve utile a été évaluée sur la base des fonctions de pédotransfert d'Al Majou, qui dépendent à la fois de la texture et de la profondeur, la capacité de rétention étant plus forte dans les 20 premiers centimètres (tableau 6). On considère par ailleurs que les éléments grossiers ne stockent pas d'eau.

Pour la modalité éclaircie, la réserve utile calculée d'après le profil décrit s'élève à 155 mm, ce qui est une sous-évaluation puisque la roche n'a pas été atteinte.

Dans la modalité témoin, la réserve utile calculée est de 160 mm. Comme le plancher rocheux a été atteint, cela correspond bien au sol complet.

4.3 Simulations

4.3.1 Dispositif sylvicole de Valliguières (cèdre)

Les deux modèles Biljou© et Sureau ont été utilisés pour calculer des indices de stress hydrique en conditions actuelle et future. Nous avons travaillé sur les modalités d'éclaircies les plus différentes (400 et 1200 tiges à l'hectare) afin de faciliter l'interprétation des résultats. Comme expliqué en section 3.3 (description des modèles) la version de Sureau utilisée ici constitue en quelque sorte une extension de Biljou© car tous les processus liés au bilan hydrique y sont représentés auxquels s'ajoutent ceux menant à la cavitation du système vasculaire.

Dans un premier temps, nous avons réalisés une comparaison des sorties de Sureau et de Biljou© pour nous assurer que leurs résultats étaient similaires pour des conditions initiales identiques (climat, sol et végétation). Ensuite nous avons produits la majorité des résultats de simulations avec Sureau qui, outre le bilan hydrique, fournit des prédictions de potentiels hydriques et de risque de cavitation.

- Données climatiques :

Différents types de climat ont été utilisés selon les exercices de simulations réalisés :

1. Des simulations de bilan hydrique historique grâce à des séries de climat long-terme récent (période 1995 à 2015) s'appuyant sur la ré-analyse des données SAFRAN (car aucune station autour du site ne fournissait des séries ininterrompues des variables nécessaires à nos calculs sur une longue période). Ces simulations ont permis de comparer les indices de stress simulés par Sureau et Biljou© et de réaliser des exercices de sensibilité au LAI et à la RUM. Les indices de stress générés ont été utilisés pour analyser le déterminisme des accroissements de cernes et de surface terrière avec une approche fonctionnelle du déficit hydrique.

2. Des simulations réalisées sur la période récente (2015-2017), pour évaluer les dynamiques de potentiel hydrique en confrontant les simulations aux mesures de terrain. Pour ces années, les données SAFRAN n'étant pas accessibles nous avons utilisé les données de la station météo de Chusclan, la plus proche présentant les séries climatiques les plus complètes.

3. Des simulations en condition de changement climatique ont été réalisées avec le modèle Sureau. Nous avons utilisé des séries climatiques modélisées de 1960 à 2100 par 5 modèles climatiques contrastés (combinant modèles globaux et régionaux) et deux scénarios vraisemblables de changement climatique (RCP4.5 : réchauffement modéré) et RCP 8.5 (fortes émissions de CO₂, réchauffement important). Les 5 modèles ont été sélectionnés pour leur bonne capacité à prédire le climat passé et leur variabilité (c.à.d. prise en compte d'un maximum des réalités climatiques possibles). Ces scénarios ont été générés sur le site de Valliguières grâce à une méthode par descente d'échelle utilisant les données SAFRAN. Ces scénarios sont en cours de publication (Fargeon et al en révision).

- Calibration des modèles Biljou© et Sureau:

Les tableaux des paramètres de sol et de végétation utilisés pour Biljou et Sureau figurent en annexe 6 (tableaux A4, A5).

- Sol :

Le volume d'eau utilisable, c'est-à-dire la réserve utile maximale (RUM) est un paramètre crucial. Il est calculé par couche comme : $RUM = \text{eau utile} \times \text{densité apparente} \times (100 - \% \text{ éléments grossiers}) / 100$. Les différents paramètres étant déduits du tableaux 6, 7 et A2 et A3 de l'annexe 6. La RUM totale est la somme des RUM des couches composant le sol. Les RUM obtenues sur la base des données brutes pour le site de Valliguières ne permettent pas d'obtenir des valeurs supérieures à 35 mm (ou 50mm si ajoute une couche descendant à 3m de profondeur avec 10% de sol (fin du § 4.1.7). Sous le climat méditerranéen que connaît Valliguières, de telles valeurs de RUM conduisent à des simulations irréalistes, menant à des taux de cavitation de 100% presque toutes les années (données non montrées). Afin d'ajuster la valeur de la RUM, nous avons évalué la profondeur maximale d'extraction de l'eau à partir des profils de tomographie des résistivités électriques (section ERT du § 4.1.7). Nous avons fait l'hypothèse d'une extraction racinaire moyenne jusqu'à 5 m. Par ailleurs, nous avons utilisé les fonctions de pédotransfert proposée par Jamagne et al 1977 (tableau A2 en annexe 6) qui donnent des estimations de RU plus élevées qu'avec celles de Al Majou (tableau 6, Al Majou et al 2007). Si l'on fait l'hypothèse que la couche 100-500 cm contient 10 % de terre fine (valeur moyenne mesurée pour les horizons les plus bas des fosses pédologiques (tableau 7), on calcule une réserve

utile maximale atteignant environ 120 mm. C'est cette valeur de RUM totale que nous avons retenue pour calibrer les modèles Biljou© et Sureau sur Valliguières.

Nous avons utilisé le modèle de Van-Genuchten avec les valeurs de paramètres de Bruand et al (2006) pour une texture de type limoneux-argileux pour établir la relation entre teneur en eau et potentiel hydrique du sol (tableau A4 en annexe 6).

- **Végétation :**

Les modèles Biljou et Sureau tiennent tous les deux compte de l'indice foliaire (LAI) et de la phénologie. Dans le cas d'un peuplement sempervirent nous avons fait l'hypothèse d'un LAI constant au cours d'une année, ce qui permet de nous affranchir de la phénologie qui sert généralement à dicter les variations saisonnières du LAI. Comme indiqué en section XX, le LAI a été estimé pour les différentes placettes selon différentes méthodes (cf § 4.1.5). Selon les méthodes, les valeurs obtenues présentent de fortes variations :

Entre 2.4 et 3 (pour les parcelles les plus et les moins éclaircies respectivement) pour le LAI calculé à partir des photos hémisphériques brutes (sans correction pour l'agrégation) ou par la relation allométrique publiée par Durkaya et al (2013).

Entre 3.5 et 5 (pour les parcelles les plus et les moins éclaircies respectivement) pour le LAI calculé à partir des photos hémisphériques corrigées pour l'agrégation ou par la relation allométrique reconstruite à partir du modèle architectural (cf § 4.1.5).

Nota : LAI et RUM sont généralement en équilibre pour un site donné (Hoff et Rambal 2003). Alors que la RUM dicte l'offre en eau, le LAI dicte la demande ainsi ces deux traits contribuent à déterminer le stress hydrique. De telles variations méthodologiques du LAI posent un réel problème pour réaliser des simulations de stress hydrique, puisque les modèles sont très sensibles à ce trait. En utilisant une valeur de RUM et les paramètres de sol (tableau A4 en annexe 6) estimée dans la section précédente, les simulations montrent qu'un peuplement de cèdre avec un LAI de 5 devrait subir un taux de cavitation (i.e. régulièrement léthaux : voir figure 46 sur la sensibilité au LAI montrant des taux de cavitation significatifs tous les ans et supérieurs à ceux mesurés après la sécheresse extrême de 2017), ce qui paraît irréaliste compte tenu de la bonne vigueur des individus. De plus les valeurs de LAI généralement reportées pour les climats méditerranéens sur les zones à forte charge en cailloux se trouvent autour de 3 (Ruffault et al 2013). Pour l'instant, nous avons donc fait le choix de travailler avec des LAI compris de 2.4 pour les peuplements fortement éclaircis (400 tiges/ha) et 3 pour les placettes témoin (1200 tiges /ha). Il est à noter que dans ces simulations comme dans les précédentes, le LAI est constant (pas de représentation de la fermeture progressive du peuplement avec l'âge).

- **Résultats des simulations :**

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 Biljou et Sureau sur le site de Valliguières sont cohérentes (figure 45).

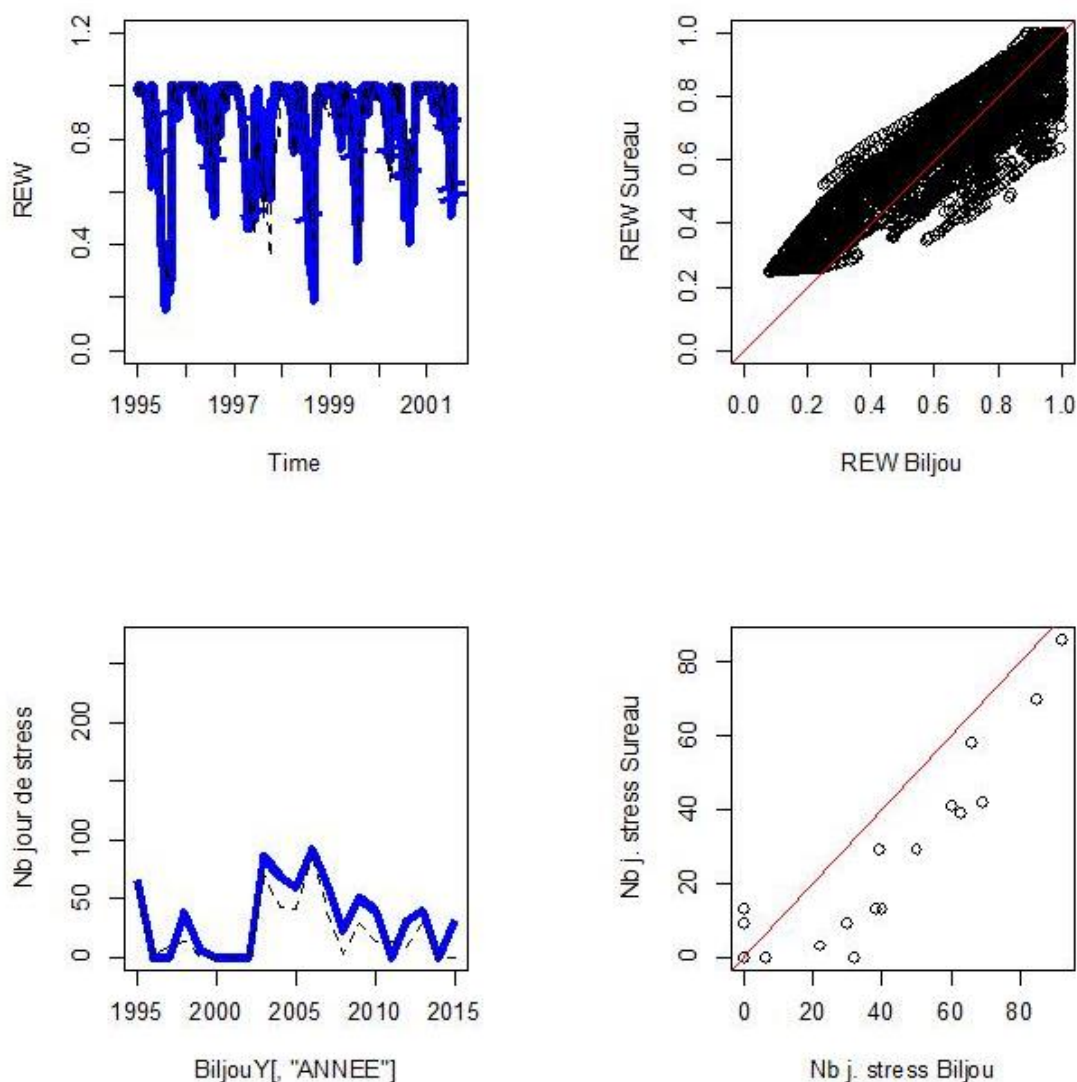


Figure 45. Résultat des simulations effectuées à l'aide des modèles Biljou (lignes bleues) et Sureau (lignes tiretées) à Valliguières.

Simulations Sureau avec la station MF de Chusclan pour l'année de mesure 2017 et comparaison des sorties pour deux traitements d'éclaircie.

Ici nous présentons des simulations (2 traitements d'éclaircie à 400 tiges/ha et 1200 tiges /ha) réalisées avec Sureau pour la période 2017-2018 correspondant aux périodes de campagne de terrain du projet lors desquelles nous avons fait les mesures de potentiels et de cavitation. Les données climatiques de l'année 2018 sont à ce jour incomplètes, donc les calculs n'ont pu être faits pour l'été 2018. Le modèle a été renseigné avec les paramètres physiologiques et de LAI qui ont été mesurés sur le terrain pour chacune de ces parcelles (tableau A5 annexe 6). Le sol (tableau A4 annexe 6) et le climat sont identiques pour les deux traitements.

Sureau prédit un écart de potentiel hydrique entre les traitements d'éclaircies, qui se traduit par une différence de cavitation entre les traitements à la fin de l'été 2017 (figure 46). Il reproduit la dynamique de potentiel hydrique et l'écart entre traitement du taux de cavitation mesurés sur le terrain. En ce qui concerne le potentiel hydrique, Sureau tend à surestimer légèrement l'effet du traitement. Les mesures montrent des différences de l'ordre de 0.7 MPa alors que nous simulons des différences de 1 MPa environ. Cet écart peut s'expliquer par (1) de la variabilité spatiale des paramètres de sol qui ne sont pas pris en compte (2) une mauvaise représentation des différences de LAI ou d'agrégation du couvert, (3) l'acclimatation d'autres traits entre les traitements (comme la conductance minimale) qui n'ont pas été pris en compte.

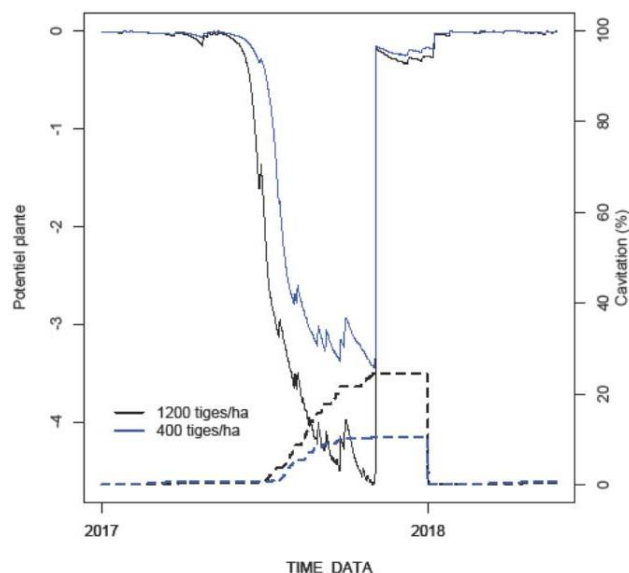


Figure 46. Potentiels hydriques (lignes pleines) et pourcentage de cavitation (lignes tiretées) simulés avec le modèle Sureau pour les traitements témoin (1200 tiges/ha) et le plus éclairci (400 tiges/ha). Les valeurs de paramètres sont renseignées plus haut dans cette section.

Par ailleurs, des analyses de sensibilité ont pu montrer 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 (et non pas de traits hydrauliques qui sont restées relativement invariants) (figure 47). Ces résultats montrent une fois de plus l'importance du LAI et plaident pour une amélioration de la quantification de ce trait. Du point de vue de la modélisation, ces résultats sont globalement encourageants pour la modélisation de l'effet du déficit hydrique.

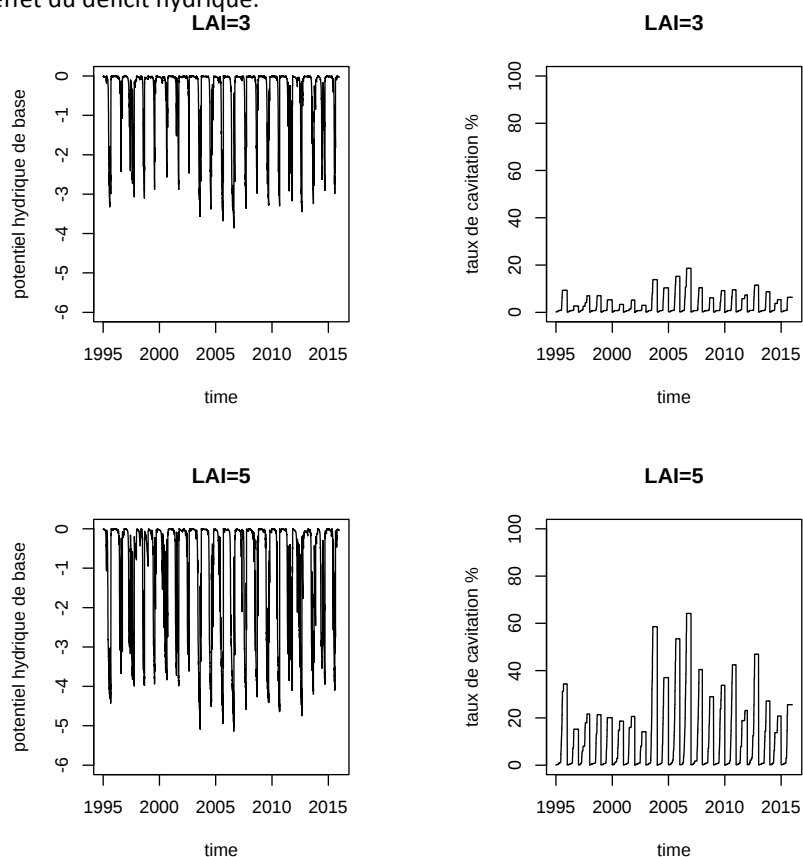


Figure 47. Sensibilité de Sureau au LAI. Le LAI de 3 correspond aux valeurs maximales calculées à partir des photos hémisphériques sans correction de l'agrégation ou à partir de la relation allométrique de Durkaya et al 2013. Le LAI de 5 correspond à la valeur maximale calculée à partir des photos hémisphériques corrigées de l'agrégation.

Les simulations sous changement climatique montrent une augmentation du taux de cavitation sous les différents scénarios avec la majorité des modèles climatiques ainsi que pour la trajectoire moyenne (figure 48). Toutefois l'augmentation du taux de cavitation est fortement atténuée dans le peuplement éclairci.

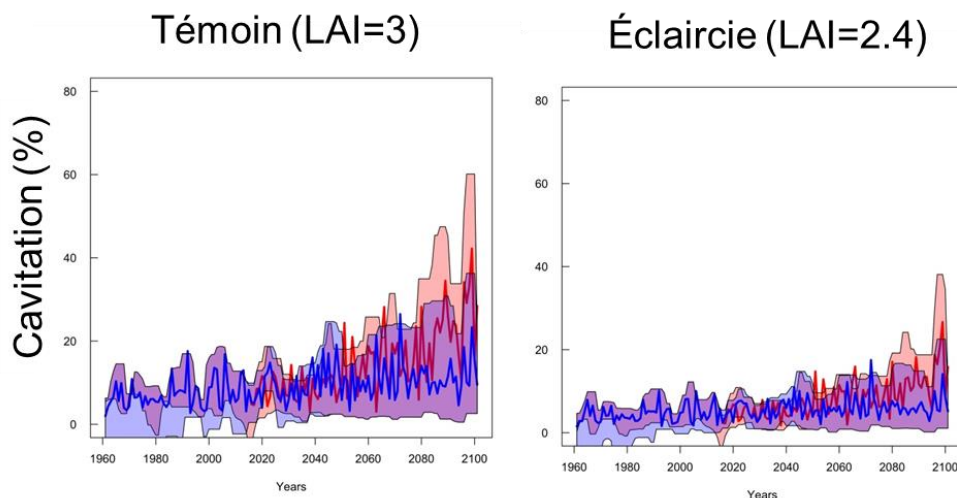


Figure 48. Taux de cavitation (PLC) prédit par le modèle Sureau sous les scénarios de changement climatique RCP8.5 (rouge) et RCP4.5 (bleu). Les traits gras montrent la trajectoire moyenne et les zones plus pâles l'écart-type de l'ensemble des modèles climatiques sélectionnés.

4.3.2 Dispositif sylvicole de Comefroide-Picaussel (sapin)

Les simulations de stress hydrique pour ce site ont été réalisées avec Biljou© et Sureau. Le LAI et les paramètres de sol (tableaux A6 et A7 en annexe 6) ont été renseignés pour les deux traitements d'éclaircie grâce aux mesures de terrain. Par contre les valeurs de traits hydrauliques et stomatiques ont été renseignées à partir de données de littérature. Les simulations historiques ont été faites à partir des données SAFRAN sur la maille incluant le site. Les simulations sous scénario de changement climatique ont été réalisées à partir des scénarios selon le même protocole que pour Valliguières. Il est à noter que dans ces simulations comme dans les précédentes, le LAI est constant (pas de représentation de la fermeture progressive du peuplement avec l'âge).

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 Biljou et Sureau sur le site de Picaussel sont cohérentes (figures 49 et 50).

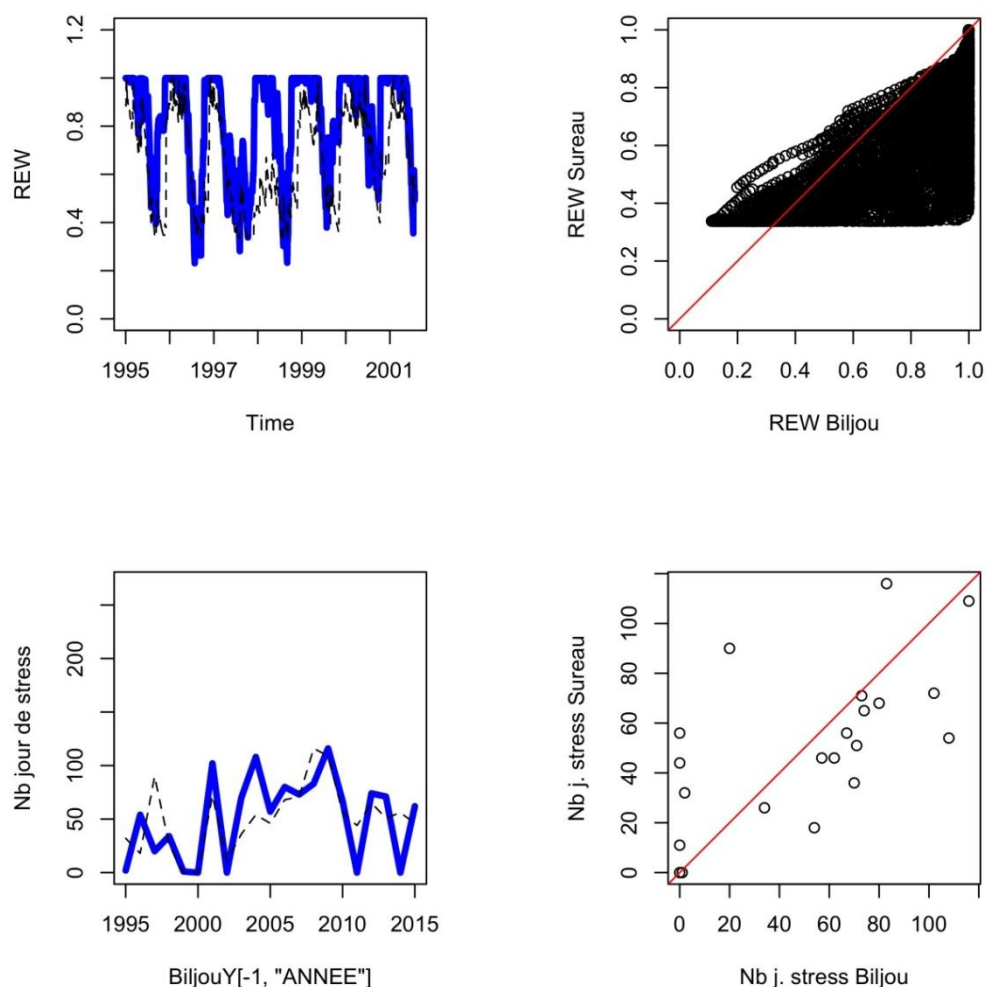


Figure 49. Résultat des simulations effectuées à l'aide des modèles Biljou (lignes bleues) et Sureau (lignes tiretées) à Picaussel.

Les simulations montrent un fort effet positif de l'éclaircie sur la teneur en eau relative du sol (figure 49 pour Biljou), 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 dominant devant l'effet négatif du sous-bois. Le taux de cavitation reste modeste à l'exception de l'année 2003 dans le témoin (figure 51). Ces résultats vont dans le sens des données acquises sur Valliguières qui indiquent également un effet bénéfique de l'éclaircie sur le risque de stress hydrique en dépit d'une forte croissance du sous-bois consécutive aux éclaircies.

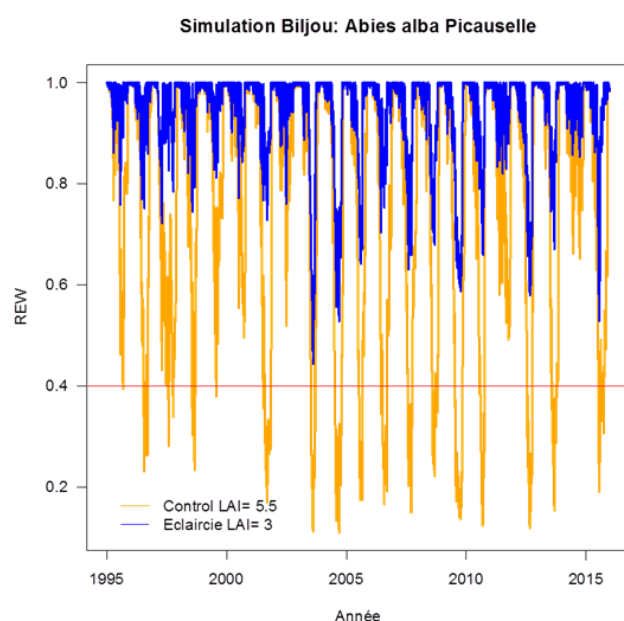


Figure 50. Teneur en eau relative (REW) simulée avec le modèle Biljou pour le site de Picaussel pour deux traitements d'éclaircie.

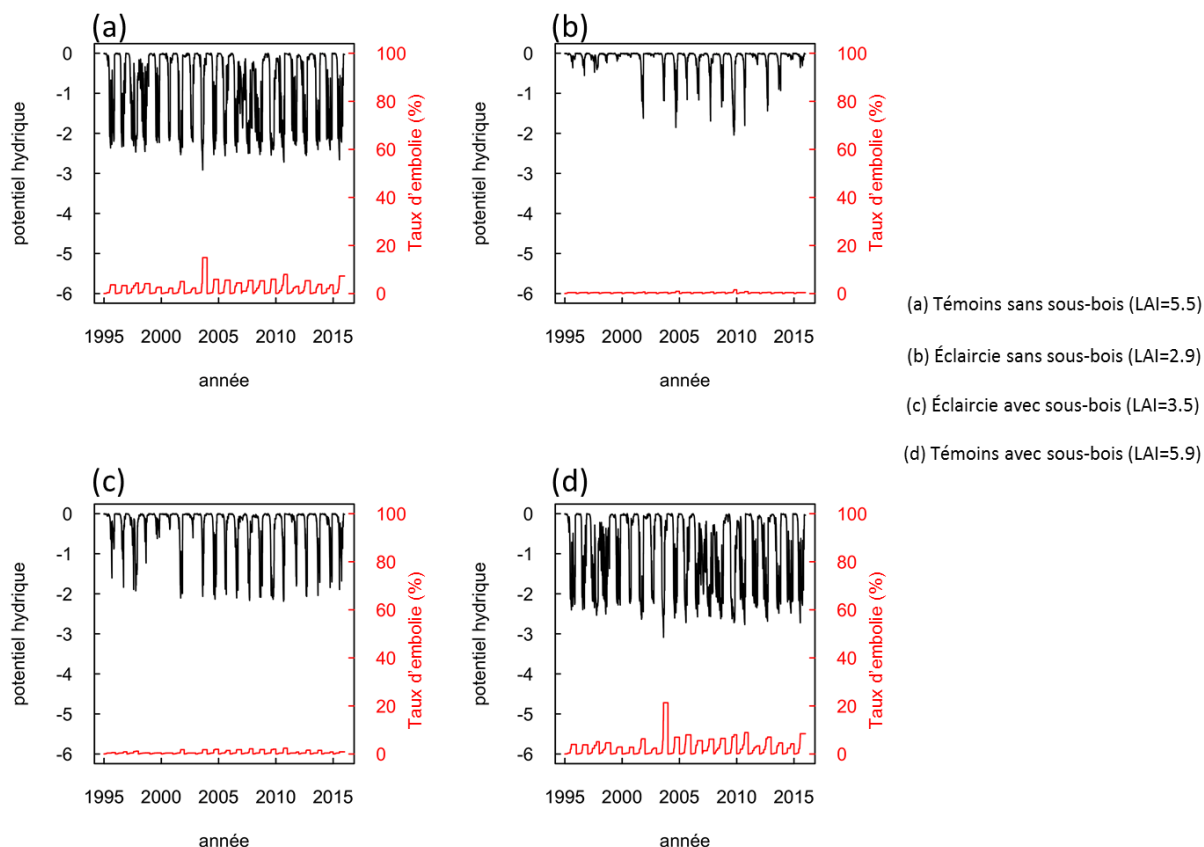


Figure 51. Potentiels hydriques de base et taux de cavitation simulés avec le modèle Sureau pour les peuplements de sapin du site de Picaussel pour deux traitements de densité. Le LAI est maintenu constant dans le temps.

Les simulations sous changement climatique suggèrent que le climat futur, en l'absence d'éclaircie pourrait entraîner des taux de cavitation important sous le scénario le plus sévère (figure 52). En revanche, éclaircir réduirait considérablement le risque de cavitation.

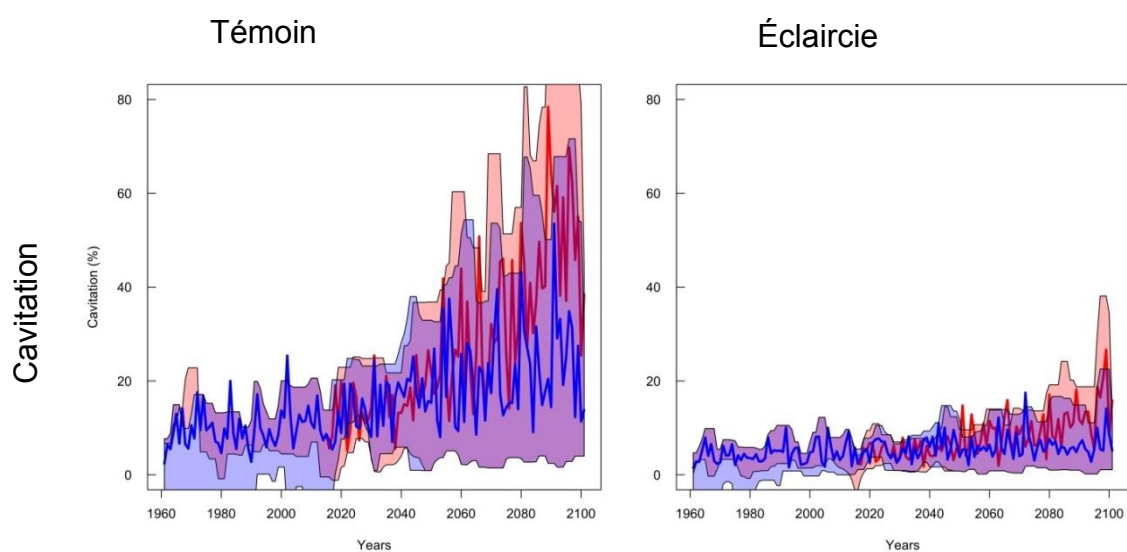


Figure 52. Taux de cavitation (PLC) prédit par le modèle Sureau sous les scénarios de changement climatique RCP8.5 (rouge) et RCP4.5 (bleu). Les traits gras montrent la trajectoire moyenne et les zones plus pâles l'écart-type de l'ensemble des modèles climatiques sélectionnés.

5. Référentiel

Une première version du document a été fournie fin décembre 2018 aux responsables du RMT.

Depuis, la réflexion sur l'outil de transfert prévu dans le projet a progressivement évolué vers la rédaction d'un référentiel recentré sur le fonctionnement des arbres forestiers face au changement climatique¹.

Au vu des outils déjà existants sur la mesure du LAI (Bréda et al. 2002), le bilan hydrique (Bertin et al 2016), et l'expérimentation forestière (Rosa et al 2011), il est apparu le besoin d'un document complémentaire, à destination des personnes chargées du développement et remplissant les objectifs suivants :

- expliciter et montrer l'intérêt des indicateurs écophysiologiques usuellement mesurés et analysés par les chercheurs du domaine (potentiels hydriques, transpiration, conductance stomatique, cavitation, efficience pour l'eau,...)
- replacer ces indicateurs dans le corpus de connaissances sur le fonctionnement du système sol-arbre-atmosphère
- présenter l'intérêt et les limites des modèles de fonctionnement ainsi que les principaux modèles de fonctionnement disponibles en France.

Ce document est en cours de rédaction (sommaire en annexe 7b).

Un comité de contributeurs-relecteurs du référentiel a été constitué (annexe 7c).

6. Conclusion-valorisation

Le projet Redsurf comportait 3 objectifs :

1. La recherche et la mesure de caractères de tolérance ou d'adaptation ou à la sécheresse, en conditions de densités différentes
2. L'utilisation de modèles de bilan hydrique et de fonctionnement pour simuler le comportement des arbres à différentes densités et sous différentes intensités de sécheresse
3. La fourniture d'un référentiel sur le fonctionnement des arbres forestiers face au changement climatique : connaissances, indicateurs, modèles.

Recherche et mesure de caractères de tolérance ou d'adaptation :

État sanitaire :

Comefroide-Picaussel :

Sur le plan strictement sanitaire l'éclaircie n'a pas été bénéfique pour le peuplement

Valliguières :

Les mesures de 2004 (figure 8), figurant dans le rapport technique du projet "Installation et conduite des peuplements de cèdre pour faire face au changement climatique" soutenu par le RMT Aforce de 2010 à 2012, montraient une relation entre le taux d'arbres affectés par les écoulements de résine en 2004 et les traitements expérimentaux (éclaircie et élagage). Les arbres à faible densité et à houppier développés étaient plus touchés que les arbres des placettes témoins, l'élagage artificiel de branches vertes permettant d'inverser cette tendance, cet effet de contre-balancier étant d'autant plus marqué que les arbres étaient à faible densité et que l'élagage concernait donc des branches bien vivantes intervenant dans le bilan hydrique. Ces

¹ Le projet initial prévoyait d'y associer en outre une réflexion sur l'intérêt et l'utilisation des dispositifs sylvicoles pour répondre aux questions sur l'adaptation des forêts au changement climatique. Il a été décidé d'un commun accord de valoriser cette partie sur les dispositifs dans un article en français publié dans une revue forestière généraliste.

observations et hypothèses, ajoutés à l'absence d'agent pathogène identifié, nous avaient fait envisager d'utiliser les nécroses cambiales, liées aux écoulements de résine, comme un marqueur du stress hydrique subi par les arbres.

Le projet REDSURF nous a permis de dater précisément les nécroses cambiales et de les mettre en relation avec le climat et des indices de stress hydrique. Les données font nettement apparaître un effet annuel **mais une relation négative entre la fréquence des symptômes et le stress hydrique**.

La cartographie horizontale de la conductivité électrique (EM31) a montré un lien entre importance des nécroses et résistivité. Moins c'est résistif plus il y a de nécroses mais les nécroses finissent aussi par s'aggraver dans les zones résistives (zones de fortes contraintes à l'enracinement ou au stockage d'eau).

Dans les placettes de faible densité (400/ha) il existe un lien positif entre intensité de la nécrose et conductivité.

L'hypothèse *Sphaeropsis sapinea* (= *Diplodia sapinea*):

Sphaeropsis sapinea est un champignon parasite auquel certaines espèces de pin sont sensibles en particuliers le pin noir d'Autriche². Le développement de ce champignon est favorisé par des températures hivernales élevées et une pluviométrie importante en été (Fabre et al 2011). L'apparition des nécroses préférentiellement à la base des houppiers pourrait s'expliquer par la transmission du champignon des branches (ou cônes) vers le tronc ou à une entrée sous corticale facilitée par le début de fissuration de l'écorce du tronc constatée à ce niveau. Le développement secondaire et important des nécroses au pied des arbres pourrait s'expliquer par une zone d'entrée plus facile pour le champignon, le collet étant connu comme le lieu d'importants échanges gazeux. Ce champignon a déjà été noté sur *Cedrus libani* (Oskay et al 2018).

Cette hypothèse mérite d'être étudiée de près.

Toutefois on note que les différences individuelles de nécroses ne sont pas corrélées au nombre de cônes comptés sur les arbres (données de 2002 à 2005). De même le modèle climatique de Fabre et al (2011) ne traduit pas la variabilité observée (données non montrées mais disponibles sur demande).

Pour autant la relation entre stress hydrique et nécroses cambiales ne doit pas être totalement écartée, les symptômes liés à *Sphaeropsis sapinea* se manifestant après un stress déclencheur, hydrique ou non, l'humidité ambiante favorisant ensuite le développement du champignon, ce qui pourrait expliquer les relations observées, temporelle avec les années plus humides et spatiale avec la conductivité (communication B. Boutte DSF).

Analyse des cernes annuels :

Le principal résultat est l'effet positif de la diminution de densité sur la croissance en cas de sécheresse ce qui confirme les résultats obtenus antérieurement à Sault. Cela n'est réellement significatif que sur les 5 années qui suivent l'éclaircie et pour les traitements les plus forts, la mobilisation des réserves pouvant constituer aussi un facteur explicatif. L'effet de l'élagage sur la relation croissance-climat apparaît par contre rarement significative.

Description du milieu :

La description la plus précise possible des conditions de milieu et leurs variations spatiale et temporelle sont apparues comme un préalable indispensable pour comprendre le comportement observé des arbres et pour fournir des variables d'entrée objectives aux modèles utilisés.

Le climat a ainsi pu être caractérisé avec une résolution temporelle et une précision satisfaisantes.

À Valliguières avec le soin particulier dédié aux opérations de caractérisation du substrat (cartographie du signal de résistivité sur la totalité du dispositif, réalisation de transects ERT répétés dans le temps, creusement de fosses pédologiques) il a pu être montré que (i) la réserve utile quantifiable par prospection pédologique (sur 40 à 100 cm maximum de profil observable) est très faible et incompatible avec la survie des arbres, et (ii) l'épaisseur de sol/sous-sol la plus exploitée pour l'eau par les arbres est très variable suivant les placettes et le contexte dans la placette, et d'un ordre de grandeur, en moyenne, de 3 à 5 m de profondeur, compatible avec les estimations par simulation. Cela ne veut pas dire qu'il n'y pas de prélèvement plus en profondeur, mais que le signal résistivité associé à la diminution plus faible de teneur en eau peut être noyée dans le bruit de mesure (et de redistribution de l'eau en profondeur).

² Le peuplement de pin noir d'Autriche jouxtant le dispositif expérimental a dû être rasé fin 2017 à la suite d'une attaque massive de *Sphaeropsis sapinea*.

La profondeur de prélèvement varie selon les placettes sans lien très marqué avec la densité ou la hauteur dominante. Il n'y a pas de lien entre intensité du prélèvement ou profondeur du prélèvement et potentiel de base (au niveau arbre ou placette). Cependant, les potentiels de base en période de déficit hydrique sévère sont liés à la distribution de résistivité sous les arbres et montrent que l'accès à un réservoir profond (entre 2 et 6m) tamponne le stress ressenti par l'arbre. Dans cette interaction entre zone de surface (0-2 m) et profonde (2-6 m) pour l'eau, la densité d'arbres joue sur la valeur minimale du potentiel de base que peuvent atteindre les arbres, un plus faible accès à l'eau profonde (signée par une plus faible résistivité en profondeur) rapprochant les arbres de la parcelle de cette valeur minimale. On peut aussi noter que la diminution de potentiel de base sur le transect de la placette 2 (figure 34) correspondant à une zone moins résistive est liée à une difficulté de prospection racinaire en profondeur et de plus forte progression des nécroses cambiales.

Développement du sous-bois

À Picaussel le sous-bois s'est également plus développé dans le peuplement éclairci. À Valliguières nos mesures montrent que les parcelles ayant subies les plus fortes éclaircies en 1992 ont développé une couverture de sous-bois importante. Cette augmentation de végétation en sous étage a été mise en évidence à travers : (1) les estimations de surface terrière et de taux de recouvrement du sous-bois, et (2) les estimations d'indice foliaire par photos hémisphériques, qui intègrent toute la végétation au-dessus de 1.3 m.

Il en résulte que les indices foliaires totaux (forêt + sous-bois) étaient identiques entre les traitements contrôle et éclaircie en 2017, ce qui suggère que le développement du chêne vert (et dans une moindre mesure du buis) dans les traitements éclaircis, ont permis une compensation totale de l'indice foliaire. Une telle compensation est un phénomène attendu lorsque le temps écoulé depuis l'éclaircie permet au sous-bois de se développer, comme ici sur 20 ans. Une fois cette compensation effective, on peut s'attendre à ce que les effets bénéfiques d'une éclaircie sur le stress hydrique (et la croissance) soit minime.

Une approche plus fonctionnelle à travers le comportement physiologique

La densité du peuplement a encore une influence sur certains caractères écophysiologiques alors que qu'elle est absente sur l'état sanitaire et l'interaction entre croissance et climat (ou composante annuelle de la croissance due au climat).

Nos mesures de potentiel hydrique à Valliguières montrent que les arbres des parcelles éclaircies subissent moins de stress hydrique en 2017. Les traits hydrauliques mesurés sont également cohérents avec un accroissement du stress hydrique dans les parcelles à forte densité. Deux hypothèses non mutuellement exclusives peuvent expliquer ce paradoxe :

- Une baisse de la compétition pour l'eau accompagnée d'un accroissement du système racinaire des cèdres n'ayant pas été coupé pourrait expliquer ce phénomène. Il est aussi possible que les espèces du sous-bois qui se sont développées prélèvent l'eau dans des zones totalement ou partiellement différentes des cèdres ou qu'elles prélèvent moins d'eau que les cèdres auparavant présents (elles sont sujettes à une ETP moindre). Cette hypothèse pourrait être testée de façon théorique avec un modèle permettant de représenter plusieurs couches de canopée et d'exploration racinaire. Cela pourrait être réalisé en améliorant Sureau ou en utilisant NoTG, ou de façon empirique en quantifiant les flux par individu dans les parcelles éclaircies et contrôles avec des capteurs de flux de sève.

- Un effet de l'arrangement spatial des arbres pour limiter la consommation en eau des individus. Une même surface foliaire répartie sur beaucoup (traitement témoin), ou peu (traitement éclaircie) d'arbres, n'a pas la même capacité à intercepter la lumière et donc à transpirer. Lorsque le feuillage est concentré sur un plus petit nombre de houppier, les arbres interceptent moins de lumière et pourraient ainsi consommer moins d'eau. Cette hypothèse pourrait être testée de façon empirique avec des mesures d'interception de la lumière en 3D (LidarT), et de flux de sève dans les différents traitements ; ou par modélisation à l'aide d'un modèle décrivant les houppiers de chaque arbre d'une parcelle. C'est cette deuxième approche que nous avons envisagée, avec le modèle NOTG, mais qui a dû être repoussée.

Le modèle Biljou et la version de Sureau utilisée ici ne permettent pas de répondre à des questions qui impliquent des différences inter-individuelles de structure de couvert ou d'exploration racinaire car ces modèles fonctionnent à l'échelle du peuplement. Toutefois, nos simulations Sureau permettent de reproduire l'ordre de grandeur des différences moyennes de stress hydrique entre traitements, en forçant une diminution de la surface foliaire tout en maintenant une réserve utile

constante (i.e. à exploitation du sol constante). Ce résultat est cohérent avec la première hypothèse d'une baisse de la consommation en eau et une augmentation de l'exploration racinaire.

Toutefois les analyses de sensibilité ont montré que deux facteurs sont extrêmement importants pour les simulations : **le LAI et la réserve utile**. Or ils peuvent s'avérer difficile à estimer. Connaître le degré d'agrégation du feuillage est nécessaire pour calculer le LAI à partir de méthodes basées sur l'interception de la lumière par le feuillage (photos hémisphériques, LAI2000). Nos estimations de LAI pourraient donc être améliorées par des mesures du degré d'agrégation, basées sur des estimations de la fréquence et de la taille des trouées, ou encore par recours au Lidar terrestre, qui permet une description très fine des éléments foliaires en trois dimensions. Il faut toutefois noter que les estimations de LAI par photos hémisphériques, ou par LAI 2000, même en l'absence de prise en compte de l'agrégation, permettent de faire des comparaisons qualitatives entre traitements.

Pour la réserve utile, nous avons vu que les fosses pédologiques, à Valliguières, ne renseignent que partiellement le réservoir d'eau dans lequel les arbres peuvent puiser. Nos mesures des résistivités électriques nous ont apporté des estimations de la profondeur de prélèvement d'eau par les racines et donc apportent une information complémentaire précieuse. Pour aller plus loin, il faudrait pouvoir établir des relations entre résistivité et teneur en eau, ce qui nécessiterait d'installer des capteurs d'humidité assez profond dans les strates dominées par la roche. Des expériences de ce type sont envisagées sur le site de Font-Blanche, dans les Bouches-du-Rhône, une infrastructure particulièrement bien adaptée à ce genre d'expérimentation.

Les incertitudes sur la mesure de l'indice foliaire que nous avons soulevé (voir section LAI) nous conduisent à être prudents sur nos résultats. En dépit de ces incertitudes les modèles utilisés en conditions historiques ont montré des résultats cohérents avec les données de potentiel hydrique et de cavitation sur Valliguières et nous les avons donc utilisés pour simuler l'effet du changement climatique sur les stress hydriques futurs en considérant deux valeurs de LAI distinctes. Dans ce contexte, les simulations sous changements climatiques indiquent très clairement le bénéfice des éclaircies sur le risque de cavitation qui est une variable clé du dépérissement si l'on conserve des densités de peuplement importantes.

À Picaussel sur sapin, malgré une réserve utile importante, l'influence du LAI, plus variable qu'à Valliguières sur cèdre, est très forte sur le risque de mortalité par cavitation.

Valorisation :

Le projet REDSURF a permis l'échange de connaissances, d'outils et de méthodes entre personnes de disciplines différentes et la construction d'une culture commune au sein des participants pour faire progresser la connaissance. Ces échanges constructifs autour d'un objectif commun ont permis d'apprécier la complémentarité potentielle entre disciplines mais aussi les difficultés et les limites propres à chacune d'entre elles et les possibilités de les surmonter. La mise au point du référentiel à destination des personnes chargées du développement et des gestionnaires permet de partager les résultats de ces efforts avec le plus grand nombre.

Outre le référentiel il est prévu un article proposant une réflexion sur l'intérêt et l'utilisation des dispositifs expérimentaux de sylviculture face au changement climatique, assorti d'un état des lieux des dispositifs sylvicoles expérimentaux en réseaux plus ou moins structurés au niveau national

En outre, nous envisageons de publier nos résultats sous forme d'articles scientifiques dans des journaux à comité de lecture :

- La résistivité électrique comme proxy de la ressource hydrique, qui combinerait les résultats obtenus dans ce projet avec ceux obtenus sur les sites de Font-Blanche (pin d'Alep/chêne vert) et de Puechabon (chêne vert).
- Effets des éclaircies sur le stress hydrique du cèdre de l'Atlas une approche empirique et par modélisation
- Rôle de l'hétérogénéité spatiale sur les effets des éclaircies (sur la base des simulations avec le modèle NOTG, qui restent à finaliser)

7. Références bibliographiques

- Al Majou H., Bruand A., Duval O., Cousin I. 2007. Comparaison de fonctions de pédotransfert nationales et européennes pour prédire les propriétés de rétention en eau des sols. *Étude et Gestion des Sols*, Association française pour l'étude des sols 14, 103–116. <http://hal.archives-ouvertes.fr/insu-00145626/>.
- Bertin S., Balandier Ph., Becquey J., Bonal D., Bréda N., Perrier C., Riou-Nivert Ph., Sevrin É. 2016. Le bilan hydrique des peuplements forestiers. Coord. : Bertin S. et Perrier C. Ed RMT AFORCE. 191 p.
- Brodribb T.J., Cochard H. 2009. Hydraulic failure defines the recovery and point of death in water-stressed conifers. *Plant Physiology* 149 : 575–584.
- Bréda N., Soudani K., Bergonzini J.-C. 2002. Mesure de l'indice foliaire en forêt. GIP ECOFOR éd. 157p. ISBN 2-914770-02-2.
- Bréda N., Granier, A. 2011. Outils pour raisonner les calculs de flux d'eau et de bilan hydrique à l'échelle du peuplement. *Forêt Entreprise* 196 : 22-24.
- Bréda N., Sergent A.-S. 2015. Dysfonctionnements du douglas (*Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco) : nécroses cambiales et rougissements printaniers. Rapport final, convention DGAL-INRA E06/2012, 89 p.
- Bruand A., Pérez Fernández P., Duval O., Quétin P., Nicoulaud B., Gaillard H., Raison L., Pessaud J.-F., Prud'Homme L. 2007. Estimation des propriétés de rétention en eau des sols : utilisation de classes de pédotransfert après stratifications texturale et texturo-structurale. *Étude et Gestion des Sols* 9: 105-126.
- Campbell G.S. 1974. A simple method for determining unsaturated conductivity from moisture retention data. *Soil Science* 117, 311–314. doi:10.1097/00010694-197406000-00001.
- Carsel R.F., Parrish R.S. 1988. Developing joint probability distributions of soil water retention characteristics. *Water Resources Research* 24, 755–769. doi:10.1029/WR024i005p00755.
- Courbet F., Sabatier S., Guédon Y. 2007. Predicting the vertical location of branches along Atlas cedar stem (*Cedrus atlantica* Manetti) in relation to annual shoot length. *Annals of Forest Science* 64 707-718.
- Courbet F., Hervé J.-C., Klein E. K., Colin N F. 2012. Diameter and death of whorl and inter-whorl branches in Atlas cedar (*Cedrus atlantica* Manetti) : a model accounting for acrotony. *Annals of Forest Science*. 69 125-138.
- Durkaya B., Durkaya A., Makineci E., Ülküdü M. 2013. Estimation of above-ground biomass and sequestered carbon of Taurus Cedar (*Cedrus libani* L.) in Antalya, Turkey. *iForest* 6: 278-284. doi: 10.3832/for0899-006.
- Fabre B., Piou D., Desprez-Loustau M.-L., Marçais B. 2011. Can the emergence of pine *Diplodia* shoot blight in France be explained by changes in pathogen pressure linked to climate change? *Global Change Biology* 17, 2318-2327. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2011.02428.x>
- Fargeon H., Pimont F., Martin-StPaul N., De Caceres M., Ruffault J., Barbero R., Dupuy J.-L. Projections of fire danger under climate change over France: where do the greatest uncertainties lie? Submitted to *Climatic Change*. Revision in progress.
- van Genuchten M.T. 1980. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Science Society of America Journal* 44, 892. doi:10.2136/sssaj1980.03615995004400050002x.
- 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. <https://appgeodb.nancy.inra.fr/biljou/>

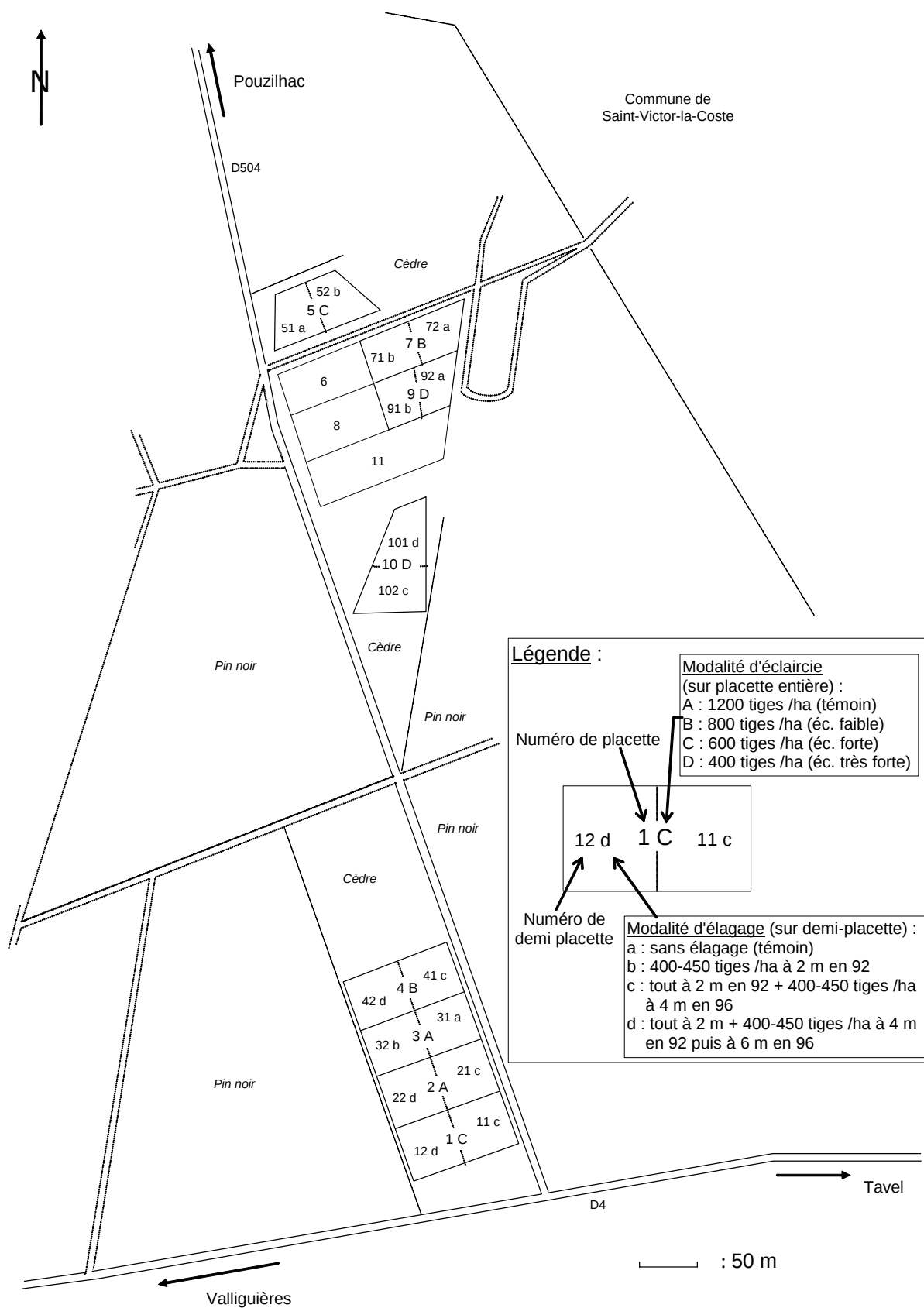
- Guillemot J., Delpierre N., Vallet P., François C., Martin-St Paul N. K., Soudani K., Nicolas M., Badeau V., Dufrêne E. 2014. Assessing the effects of management on forest growth across France: insights from a new functional–structural model. *Annals of Botany* 114: 779–793.
- Guillemot J., Klein E. K., Davi H., Courbet F. 2015. The effect of thinning intensity and tree size on the growth response to annual climate in *Cedrus atlantica*: a linear mixed modeling approach. *Annals of Forest Science* 72: 651–663.
- Hoff C., Rambal S. 2003. An examination of the interaction between climate, soil and leaf area index in a *Quercus ilex* ecosystem. *Annals of Forest Science* 60, 153–161. doi:10.1051/forest.
- Leblanc S. G., Chen J. M., Fernandes R., Deering D. W., Conley A. 2005. Methodology comparison for canopy structure parameters extraction from digital hemispherical photography in boreal forests. *Agric. For. Meteorol.* 129:187–207.
- Legay M. 2015. Adaptation : vers un enrichissement du dialogue recherche-gestion. Carrefour de l'innovation agronomique Environnement. Session 3 : Gestion forestière et sylviculture adaptative. Adaptation des forêts méditerranéennes aux changements climatiques. Avignon.
<https://www6.inra.fr/ciag/CIAG-Environnement/Forets-mediterraneennes> (video)
- Marie G. 2014. Modélisation du bilan carboné et hydrique d'une forêt méditerranéenne à structure complexe : de l'année au siècle. Thèse, Université Aix-Marseille, 220 p.
- Martin-St Paul N.K., Delzon S., Cochard H. 2017. Plant resistance to drought depends on timely stomatal closure. *Ecology Letters* 20: 1437–1447.
- Oskay F., Lehtijärvi A., Dogmuş-Lehtijärvi H.T., Woodward S. 2018. First report of *Diplodia sapinea* on *Cedrus libani* in Turkey. *New Diseases Reports* (2018) 38, 13. <http://dx.doi.org/10.5197/j.2044-0588.2018.038.013>
- Rodríguez-Calcerrada J., Pérez-Ramos I. M., Ourcival J.-M., Limousin J.-M., Joffre R., Rambal S. 2011. Is selective thinning an adequate practice for adapting *Quercus ilex* coppices to climate change? *Annals of Forest Science* 68:575–585.
- Rosa J., Riou-Nivert Ph., Paillassa É. 2011. Guide de l'expérimentation forestière. Principes de base. Prise en compte du changement climatique. Coord. CNPF-IDF. 224 p.
- Ruffault J., Martin-StPaul 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.
- Sardin T. 2015. Adaptation à l'échelle de la Parcelle, du Peuplement (Arbre, Population). Exposé de praticiens, contextualisation des problématiques. Session 2. Journées Brainstorming INRA-ONF.
<https://intranet.inra.fr/efpa/Animations/Journees-Brainstorming-INRA-ONF>.
Vidéo : <https://www.youtube.com/watch?v=zImP8wAdMU>
- Saxton K.E., Rawls W.J. 2006. Soil Water Characteristic Estimates by Texture and Organic Matter for Hydrologic Solutions. *Soil Science Society of America Journal* 70, 1569. doi:10.2136/sssaj2005.0117.
- Simioni G., Gillmann M., Huc R. 2013. Asymmetric competition can increase leaf inclination effect on light interception in mixed canopies. *Annals of Forest Science* 70:123–131.
- Simioni G., Marie G., Huc R. 2016. Influence of vegetation spatial structure on growth and water fluxes of a mixed forest: Results from the NOTG 3D model. *Ecological Modelling* 328:119–135.
- Sohn J.A., Saha S., Bauhus J. 2016. Potential of forest thinning to mitigate drought stress: A meta-analysis. *Forest Ecology and management* 380 : 216–273.

Vidal J.-P., Martin E., Franchistéguy L., Baillon M., Soubeyroux J.-M. 2010. A 50-year high-resolution atmospheric reanalysis over France with the Safran system. *International Journal of Climatology* 30, 1627–1644. doi:10.1002/joc.2003.

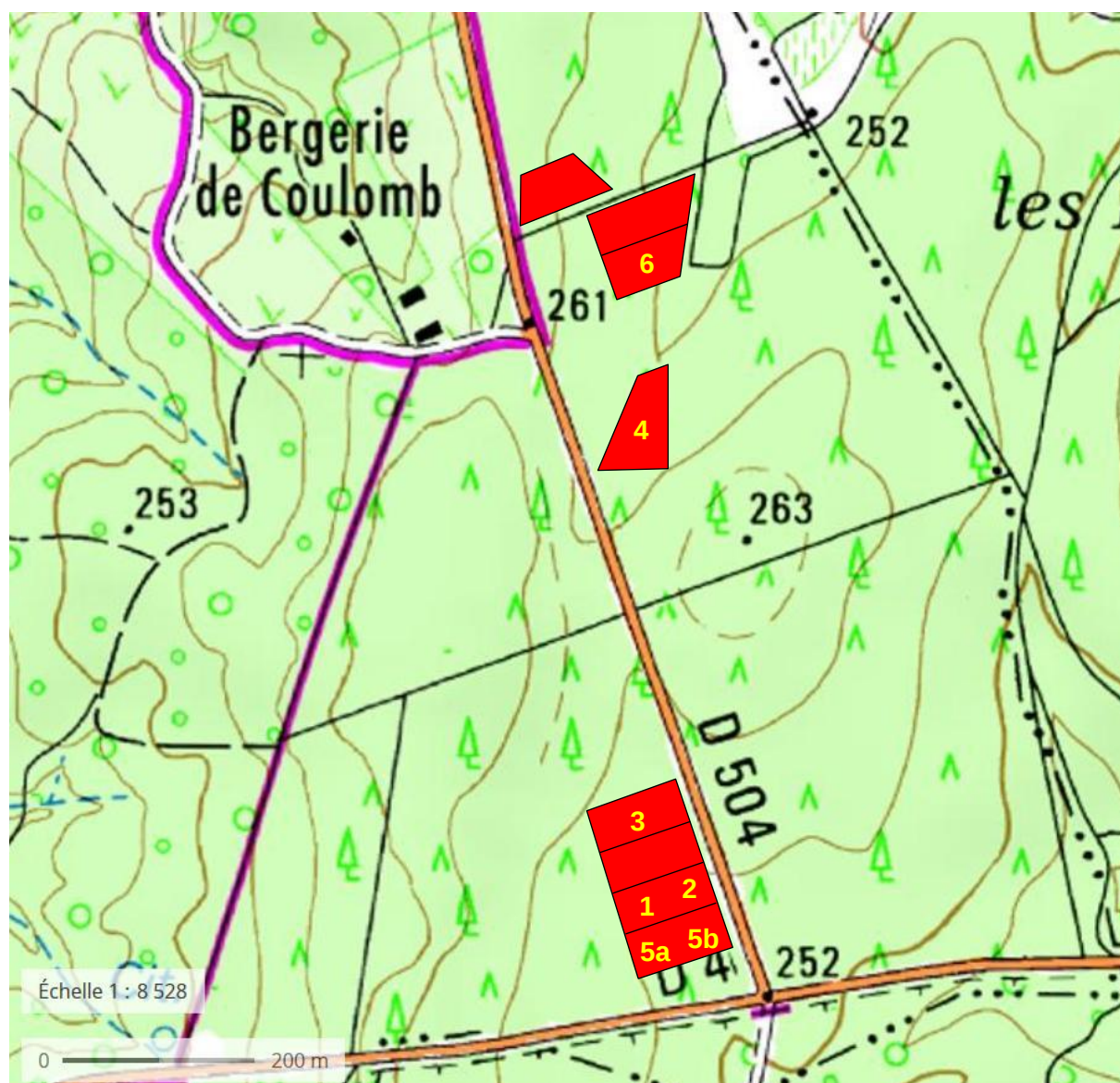
Annexe 1. Liste des personnes impliquées dans le projet (hors personnel administratif) et répartition par tâche :

Nom	Prénom	Fonction	Rôle dans le projet
Badel	Éric	CR INRA	Mesures cavitation (tâche 2a)
Brunetto	William	AT INRA	Mesures terrain (tâches 1a et 2a)
Carrière	Simon	IR CDD INRA	Mesures et analyse résistivité (tâche 2a)
Chapelet	Arnaud	TR INRA	Mesures résistivité (tâche 2a)
Ciappara	Jean-Marie	AT INRA	Tri échantillons et mesure biomasse (tâche 1a)
Cochard	Hervé	DR INRA	Mesures cavitation (tâche 2a)
Courbet	François	IR INRA	Responsable (tâches 1a et 4)
Courdier	Florence	AI INRA	Mesures terrain (tâches 1a et 2a)
Dottarelli	Isabelle	ONF - Assistante de R&D	Récolte des données sur le site de Comefroide-Picaussel (tâches 1b et 2b)
Doussan	Claude	CR INRA	Mesures et analyse résistivité (tâche 2a)
Dumas	Pierre-Jean	TR CDD INRA embauché sur le projet	Mesures terrain et labo (tâche 1a) 18/10/2017-17/01/2018 05/03/2018-04/05/2018 04/06/2018-22/06/2018
Fargeon	Hélène	CDD thèse INRA	Données climatiques futures (tâche 3a)
Gilg	Olivier	TR INRA	Mesures terrain (tâche 1a)
Gounelle	Damien	TR INRA	Mesures terrain (tâche 2a)
Jouineau	Arnaud	AT INRA	Mesures terrain (tâches 1a et 2a)
Jouineau	Icham	AT CDD INRA embauché sur crédits présidence en remplacement de Olivier Ambrosio	Mesures terrain et labo (tâche 1a) 12/03/2018-11/06/2018 pour partie sur le projet
Ladier	Jean	ONF - Responsable du pôle RDI d'Avignon	Organisation de la récolte des données sur le site de Comefroide-Picaussel (tâches 1b, 2b et 4)
Limousin	Jean-Marc	CR CEFE-CNRS	Tâche 4
Mariotte	Nicolas	TR INRA	Mesures terrain (tâches 1a et 2a)
Marloie	Olivier	IE INRA	Données climatiques (tâche 3a)
Martin-St Paul	Nicolas	CR INRA	Écophysiologie/Production des séries climatiques et bilan hydrique (tâche 3a)
Riou-Nivert	Philippe	Ingénieur CNPF-IDF	Tâche 4
Simioni	Guillaume	CR INRA	Écophysiologie, simulations (tâches 2a et 3b),
Tessier	Charles	ONF - Assistant de R&D	Récolte des données sur le site de Comefroide-Picaussel (tâches 1b et 2b)

Annexe 2 : plan du dispositif de comparaison de modalités d'éclaircie et d'élagage du Cèdre de l'Atlas. Forêt communale de Valliguières (30)



Annexe 3. Plan de répartition et numérotation des fosses pédologiques. Dispositif expérimental de Valliguières (cèdre)



Annexe 4. Résultats dendrométriques du dispositif de Valliguières

numéro placette	traitement éclaircie	traitement élagage	dominants		peuplement avant éclaircie						morts		éclaircie					peuplement après éclaircie						arbres de place				
			d0	h0	dg	hg	n/ha	st/ha	v/ha	s%	dg	n/ha	dg	hg	n/ha	st/ha	v/ha	dg	hg	n/ha	st/ha	v/ha	s%	dg	hg	n/ha	st/ha	v/ha
31	témoin	témoin	30.4	16.24	23.2	14.54	1169	49.20	327.84	19.4	.	0	.	.	0	0	0	23.2	14.54	1169	49.20	327.84	19.4	25.6	15.19	403	20.72	141.67
32	témoin	faible	28.8	15.33	22.4	14.19	1191	47.16	304.19	20.3	25.4	10	.	.	0	0	0	22.4	14.19	1191	47.16	304.19	20.3	24.6	14.65	400	19.14	125.52
21	témoin	moyen	29.3	15.12	22.1	13.88	1177	45.26	284.94	20.7	12.0	9	20.1	13.4	423	13.52	82.99	23.2	14.10	754	31.83	201.95	26	24.8	14.43	405	19.59	126.27
22	témoin	fort	28.6	14.53	22.2	13.00	1077	41.57	243.27	22.5	14.6	9	21.0	12.66	350	12.12	69.38	22.7	13.15	727	29.45	173.90	27.4	23.9	13.47	386	17.33	103.90
72	faible	témoin	32.8	17.08	26.8	16.11	783	44.06	320.99	22.5	.	0	25.2	15.79	207	10.23	74.02	27.3	16.22	577	33.72	246.97	26.3	28.0	16.35	435	26.87	196.93
71	faible	faible	31.7	16.87	26.6	15.90	823	45.75	328.21	22.2	.	0	24.2	15.34	246	11.33	79.58	27.5	16.10	577	34.31	248.63	26.5	27.6	16.11	438	26.19	189.59
41	faible	moyen	32.3	15.12	25.7	14.30	767	39.70	251.18	25.7	23.5	10	24.8	14.16	184	8.90	56.02	25.9	14.35	583	30.80	195.16	29.4	27.3	14.54	409	23.84	152.11
42	faible	fort	32.4	15.68	25.9	14.66	743	39.05	254.82	25.1	.	0	25.3	14.55	159	7.93	51.63	26.0	14.69	585	31.12	203.20	28.3	26.7	14.81	416	23.19	152.34
51	moyen	témoin	34.7	16.21	28.6	14.97	592	38.20	251.06	27.2	.	0	27.4	14.67	161	9.47	61.85	29.1	15.08	430	28.62	189.21	32.0	29.8	15.24	420	29.38	195.11
52	moyen	faible	32.3	15.64	26.6	13.98	623	34.69	214.92	27.5	.	0	23.8	13.03	197	8.83	51.21	27.9	14.36	426	25.96	163.71	33.3	27.3	14.17	436	25.44	159.23
11	moyen	moyen	35.9	16.01	28.9	15.09	512	33.56	221.35	29.7	.	0	26.9	14.75	150	8.57	55.71	29.7	15.21	362	24.99	165.64	35.5	30.1	15.29	371	26.49	175.80
12	moyen	fort	33.8	15.29	29.3	14.57	472	31.80	200.75	32.3	27.3	18	28.1	14.34	107	6.59	41.29	29.6	14.64	365	25.21	159.46	36.8	29.9	14.67	347	24.32	154.17
92	fort	témoin	38.9	17.39	34.1	16.61	375	34.19	245.39	31.9	.	0	33.2	16.45	87	7.50	53.58	34.3	16.65	289	26.69	191.81	36.6	34.1	16.61	375	34.19	245.39
91	fort	faible	37.5	16.28	32.1	14.82	363	29.31	187.73	34.6	.	0	32.3	14.89	78	6.36	40.85	32.0	14.80	285	22.96	146.88	39.6	32.1	14.82	363	29.31	187.73
102	fort	moyen	38.1	17.88	33.1	16.85	433	37.31	275.07	28.9	.	0	33.1	16.86	116	9.98	73.89	33.1	16.85	317	27.32	201.18	34.0	33.1	16.85	433	37.31	275.07
101	fort	fort	39.2	18.03	34.1	17.15	396	36.08	269.92	30.0	.	0	33.8	17.09	72	6.48	48.06	34.1	17.16	324	29.6	221.86	33.2	34.1	17.15	396	36.08	269.92

Tableau A1 : résultat des mesures réalisées en 2017

Légende : d0 (cm), h0 (m): diamètre et hauteur moyens des arbres dominants (100 plus gros à l'hectare)

dg (cm), hg (m) : diamètre et hauteur de l'arbre de surface terrière moyenne

n/ha, st/ha (m²/ha), v/ha (m³/ha) : nombre, surface terrière et volume bois fort commercial sur écorce à l'hectare

s% : espacement moyen entre arbres exprimé en pourcentage de la hauteur dominante (coefficient de Hart-Becking)

Les figures A1 à A4 récapitulent l'évolution du peuplement depuis les premières mesures réalisées en 1991.

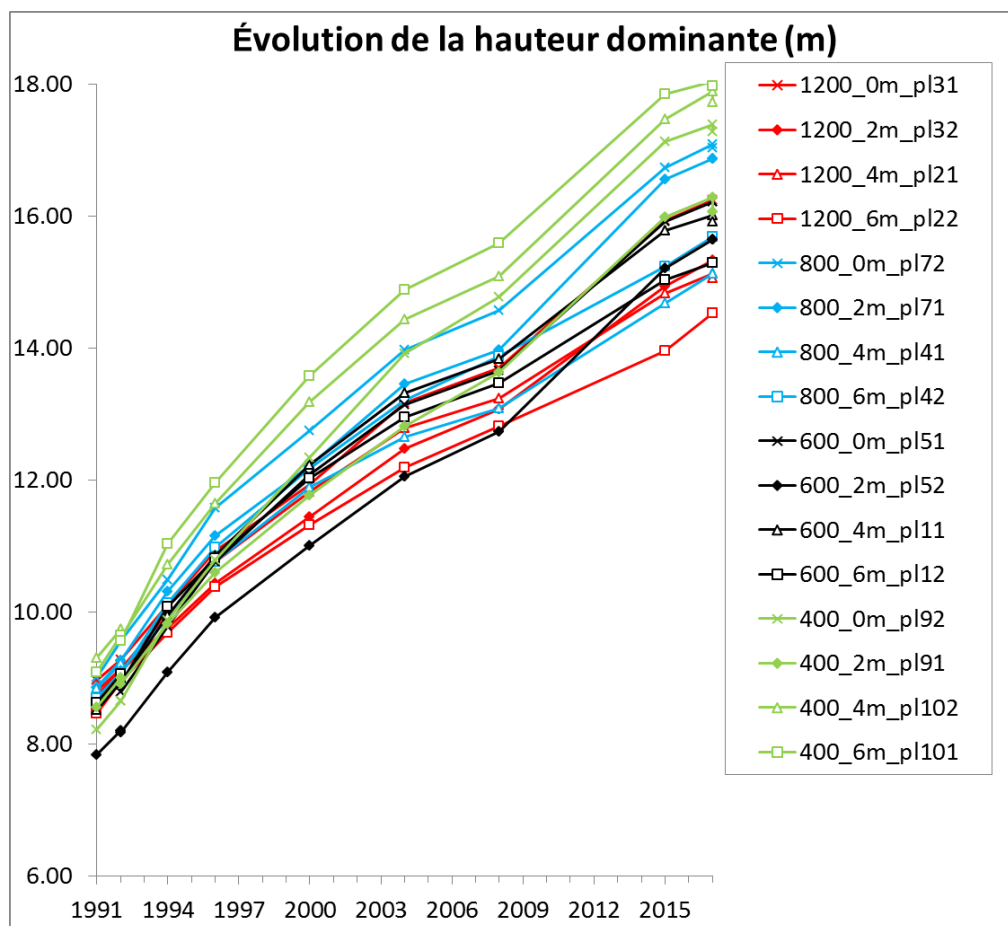


Figure A1. Évolution de la hauteur dominante dans les différentes demi-placettes du dispositif de Valliguières

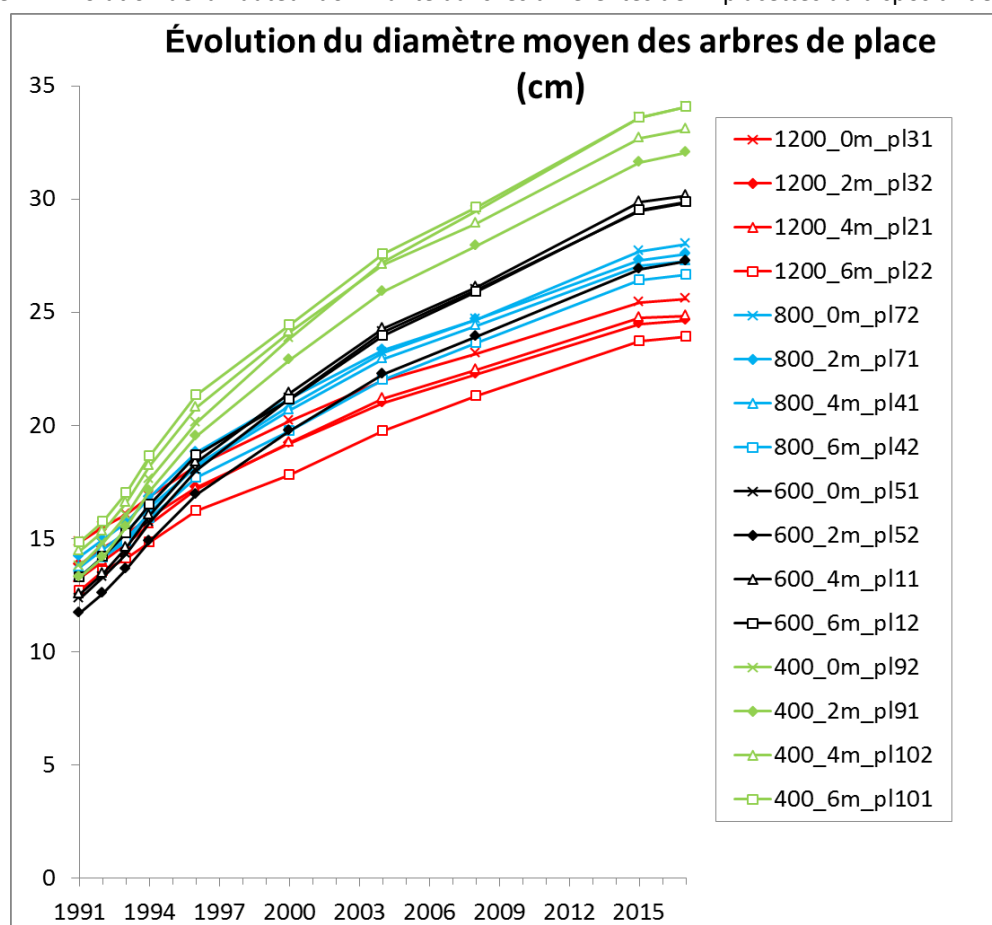


Figure A2. Évolution du diamètre moyen des arbres de place dans les différentes demi-placettes du dispositif de Valliguières

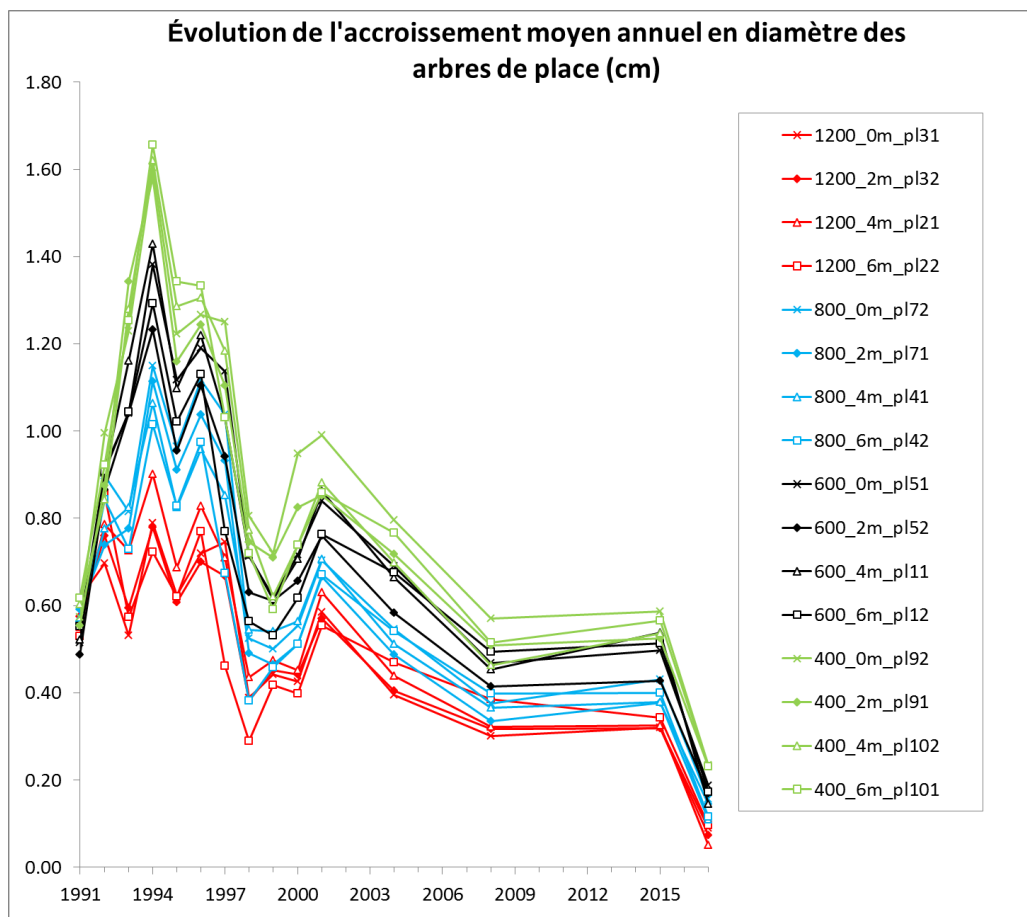


Figure A3. Évolution de l'accroissement moyen annuel des arbres de place dans les différentes demi-placettes du dispositif de Valliguières

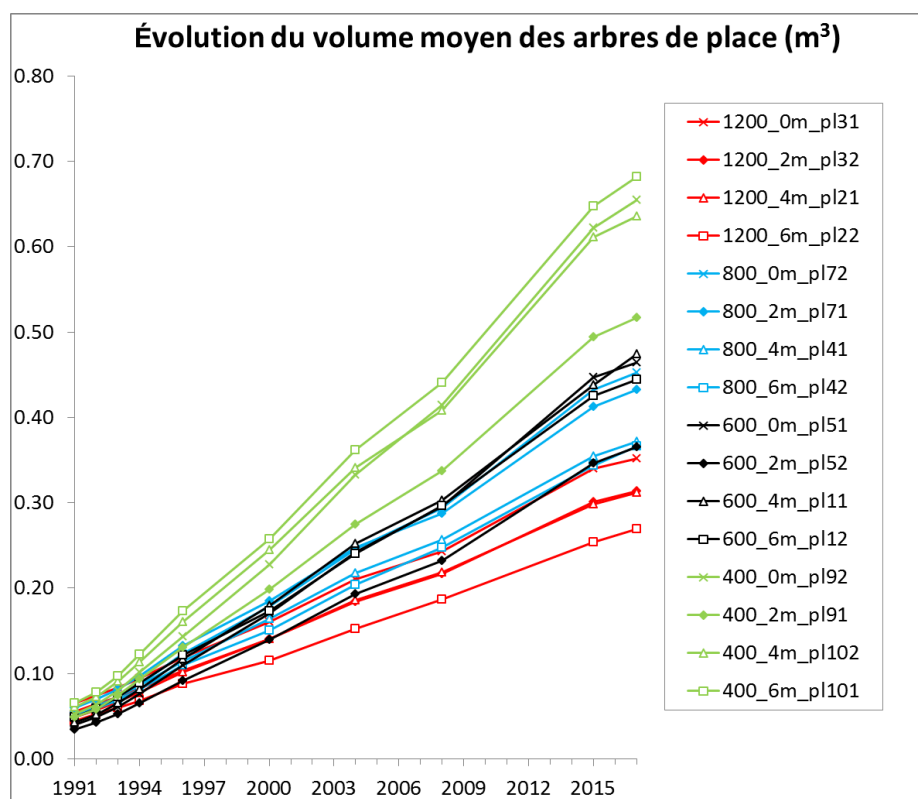
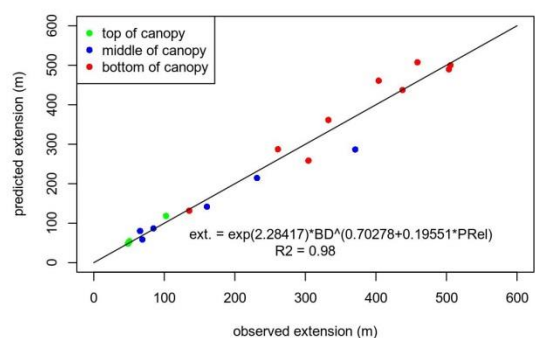
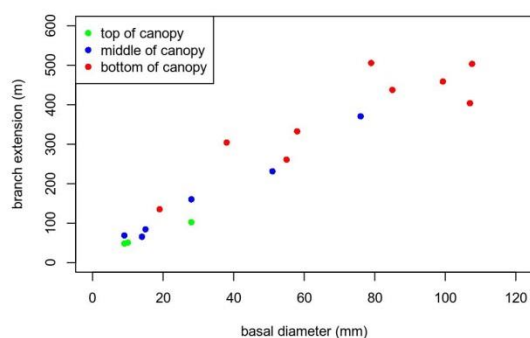
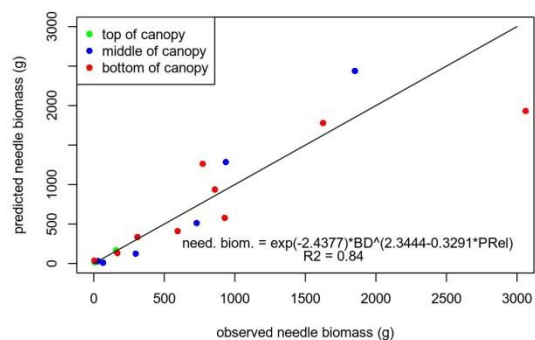
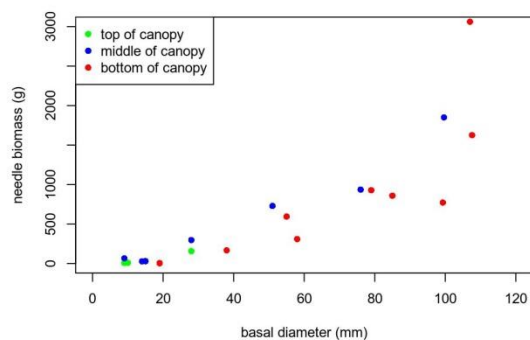


Figure A4. Évolution du volume moyen des arbres de place dans les différentes demi-placettes du dispositif de Valliguières

Annexe 5. Relations allométriques entre diamètre, extension et biomasse d'aiguilles (mesures réalisées sur cèdre dans le dispositif de Valliguères). BD= diamètre de branche en mm et PRel=position relative dans le houppier (distance à l'apex/longueur de houppier vivant)



Annexe 6. Paramètres utilisés par les simulations réalisées avec Biljou et Sureau

3. Evaluer l'eau utile de chaque couche en millimètre (mm), comprise entre les humidités en % à la capacité au champ et au point de flétrissement permanent. A défaut de courbes de rétention pour le sol étudié, l'eau utile peut être estimée à l'aide de tables (exemple ci-dessous).

Classe de texture (selon le triangle de Jamagne)	Humidité % à la capacité au champ (pF=2.5)	Humidité % au point de flétrissement permanent (pF=4.2)	Eau utile (g d'eau pour 100 g de sol)	Densité apparente (sans dimension)	Réservoir utilisable (mm d'eau par cm de sol)
S	8	3	5	1.35	0.7
SL	12	5	7	1.40	1.0
SA	19	10	9	1.50	1.35
LIS	15	7	8	1.50	1.20
LS	19	9	10	1.45	1.45
LmS	20	9	11	1.45	1.60
LSA	22	11	11	1.50	1.65
LAS	24	12	12	1.45	1.75
LI	17	8	9	1.45	1.30
Lm	23	10	13	1.35	1.75
LA	27	13	14	1.40	1.95
AS	33	22	11	1.55	1.70
A	37	25	12	1.45	1.75
AL	32	19	13	1.40	1.80
A lourde	29	18	11	1.50	1.65

Tableau des réservoirs en eau selon les textures, Service de cartographie des sols de l'Aisne, Jamagne et al., 1977 ; in Baize et Jabiol, 1995).

Tableau A2. Fonctions de pédotransfert de Jamagne selon différentes classes de texture

Classe de texture	Valeur estimée de $D_{a,h}$	Paramètres du modèle de van Genuchten				R^2
		θ_s	θ_r	n	α	
Argile lourde (ALO)	1,4	0,454	<0,001	1,088	0,0055	0,982
	1,3	0,422	<0,001	1,088	0,0055	0,983
Argile (A, AL)	1,8	0,381	<0,001	1,080	0,0115	0,997
	1,5	0,338	<0,001	1,080	0,0111	0,997
Argile sableuse (AS)	1,7	0,337	<0,001	1,088	0,0135	0,992
	1,8	0,317	<0,001	1,088	0,0130	0,993
Limon (LM, LA)	1,5	0,351	0,087	1,319	0,0052	0,997
	1,4	0,328	0,081	1,319	0,0052	0,997
Limon sableux (LMS, LAS)	1,8	0,342	0,081	1,281	0,0071	0,999
	1,5	0,321	0,058	1,280	0,0072	0,999
Limon très sableux (LS, LSA)	1,7	0,327	<0,001	1,131	0,0183	0,994
	1,8	0,308	<0,001	1,130	0,0188	0,994
Sable argilo-limoneux (SL, SA)	1,7	0,323	0,018	1,178	0,0442	0,999
	1,8	0,304	0,019	1,182	0,0418	0,999
Sable (S)	1,8	0,291	0,032	1,293	0,1311	0,998
	1,5	0,272	0,033	1,300	0,1250	0,998

$D_{a,h}$: densité apparente de l'horizon.

Tableau A3. Valeurs des paramètres du modèle de van Genuchten (1980) selon différentes classes de textures (Bruand et al 2006).

Modèle	Couche de sol	Description/Sigle	Valeur	Unité	Source/Référence
BILJOU	Couche sol 1	Profondeur (cm)	100	cm	Mesuré
		RU (mm)	30	mm	Mesuré
		proportion de racine	0.70	-	Estimé
		HPf4.2 (Teneur en eau au pt. Flet.)	0.13	-	Bruand et al 2006 pour sol LA
		Densité apparente (Da)	1.4	-	Bruand et al 2006 pour sol LA
	Couche sol 2	Profondeur	450	cm	Mesure/Estimé (voir texte)
		RU	90	mm	Mesure/Estimé (voir texte)
		% racine	0.30	-	Estimé
		HPf4.2 (Teneur en eau au pt. flet.)	0.13	-	Bruand et al 2006 pour sol LA
		Densité apparente (Da)	1.4	-	Bruand et al 2006 pour sol LA
SUREAU	Couche 1	Profondeur (cm)	100	cm	Mesuré
		proportion éléments grossiers	85	%	Mesuré
	Couche 2	Profondeur (cm)	450	cm	Mesure/Estimé (voir texte)
		Contenu éléments grossiers	90	%	Mesure/Estimé (voir texte)
	Commun aux deux couches	θ_s (teneur en eau à saturation)	0.35	-	Bruand et al 2006 pour sol LA
		θ_r (teneur en eau résiduelle)	0.08	-	Bruand et al 2006 pour sol LA
		Alfa (paramètre de forme)	0.005	*10E4 Mpa	Bruand et al 2006 pour sol LA
		N (paramètre de forme)	1.32	-	Bruand et al 2006 pour sol LA
		Ksat (conductivité hydraulique à saturation)	11.7	mmol/m2/s/Mpa	Jugnot et al 2012 pour sol LA

Tableau A4: paramètres de sol des modèles Biljou et Sureau utilisés pour le site de Valliguières

Modèle concerné	Paramètres	Exercice de comparaison de modèle	Étude de l'effet des traitements d'éclaircie avec Sureau	
			1200 tiges à l'hectare	400 tiges à l'hectare
Commun à Biljou et Sureau	LAI (m2/m2)	2.4	3	2.4
	Phénologie	sempervirent	sempervirent	sempervirent
Spécifique à Sureau	P ₅₀ (MPa)	-5	-5.5	-5
	alfa = slope /25 (avec slope en %/MPa)	1.4	1.4	1.4
	π_0 (MPa)	-1.5	-2.3	-1.9
	ε (%/MPa)	10	10	5.6
	$\pi_{tip} = (\pi_0 * \varepsilon) / (\pi_0 + \varepsilon)$ (MPa)	-1.7	-3	-2.9
	g _{min} (mmol/m2/s)	0	3	3

Tableau A5: valeurs des paramètres plantes utilisés dans Biljou et Sureau pour le site de Valliguières. Les valeurs sont issues des mesures sauf pour gmin : Lise-Marie Billon, communication personnelle.

Modèle	Couche de sol	Description/Sigle	Valeur	Unité	Source/Référence
BILJOU	Couche sol 1	Profondeur (cm)	20	cm	Mesuré
		RU (mm)	20	mm	Mesuré
		proportion de racine	0.50	-	Estimé
		HPf4.2 (Teneur en eau au pt. Flet.)	0.13	-	Bruand et al 2006 pour sol LS
		Densité apparente (Da)	1.4	-	Bruand et al 2006 pour sol LS
	Couche sol 2	Profondeur	160	cm	Mesure
		RU	140	mm	Mesure/Estimé (voir texte)
		% racine	0.50	-	Estimé
		HPf4.2 (Teneur en eau au pt. flet.)	0.13	-	Bruand et al 2006 pour sol LS
		Densité apparente (Da)	1.4	-	Bruand et al 2006 pour sol LS
SUREAU	Couche 1	Profondeur (cm)	20	cm	Mesuré
		proportion éléments grossiers	5	%	Mesuré
	Couche 2	Profondeur (cm)	160	cm	Mesuré
		Contenu éléments grossiers	65	%	Mesuré
	Commun aux deux couches	θ_s (teneur en eau à saturation)	0.33	-	Bruand et al 2006 pour sol Ls
		θ_r (teneur en eau résiduelle)	0.06	-	Bruand et al 2006 pour sol Ls
		Alfa (paramètre de forme)	0.007	*10E4 Mpa	Bruand et al 2006 pour sol Ls
		N (paramètre de forme)	1.26	-	Bruand et al 2006 pour sol Ls
		Ksat (conductivité hydraulique à saturation)	15.7	mmol/m2/s/Mpa	Jougnot et al 2012 pour sol Ls

Tableau A6: paramètres de sol des modèles Biljou et Sureau utilisés pour le site de Comefroide-Picaussel

Modèle concerné	Paramètres	Étude de l'effet des traitements d'éclaircie avec Sureau		Source
		Contrôle	Éclaircie	
Commun à Biljou et Sureau	LAI (m2/m2)	5.5	3	mesuré
	Phénologie	sempervirent	sempervirent	-
Spécifique à Sureau	P ₅₀ (MPa)	-3.8		Martin-StPaul et al 2017 (database)
	alfa = slope /25 (avec slope en %/MPa)	2.4		Martin-StPaul et al 2017 (database)
	π_0 (MPa)	-1.5		Martin-StPaul et al 2017 (database)
	ε (%/MPa)	6		Martin-StPaul et al 2017 (database)
	$\pi_{tlp} = (\pi_0 * \varepsilon) / (\pi_0 + \varepsilon)$ (MPa)	-2.		Martin-StPaul et al 2017 (database)
	g _{min} (mmol/m2/s)	4		Moyenne espèces tempérée (pas d'infos)

Tableau A7: valeurs des paramètres plantes utilisés dans Biljou et Sureau pour le site de Comefroide-Picaussel.

Annexe 7a. Réunions de coordination du projet.

- 4 août 2016 Préparation du projet avec Jean Ladier
- 4 mai 2017 sur terrain avec Éric Paillassa
- 7 juillet 2017 sur Picaussel
- 11 septembre 2018 réunion de bilan intermédiaire avec présentations en salle avec Céline Perrier
- 30 avril 2018 creusement des fosses
- 20 novembre 2018 en salle point sur l'ensemble des données disponibles notamment spatialisées avec Claude Doussan

Annexe 7b. Sommaire du référentiel

Le fonctionnement des arbres forestiers face au changement climatique : les connaissances, les indicateurs, les modèles

Introduction

1. Le fonctionnement du système sol-arbre-atmosphère
 - 1.1. L'eau dans le sol
 - 1.2. L'eau du sol aux racines
 - 1.3. L'eau dans l'arbre
2. Le fonctionnement en cas de sécheresse
 - 2.1. Sécheresse de faible intensité
 - 2.1.1. Effet sur la croissance
 - 2.1.2. Effet sur les échanges feuille-atmosphère
 - 2.2. Sécheresse de forte intensité
 - 2.2.1. La cavitation
 - 2.2.2. Le dessèchement du houppier
 - 2.2.3. Mortalité
3. Les indicateurs fonctionnels des effets de la sécheresse
 - 3.1. Les mesures directes
 - 3.1.1. Le potentiel hydrique, osmotique et de turgescence
 - 3.1.2. Les variations de diamètre en continu
 - 3.1.3. La transpiration, la photosynthèse, la conductance stomatique
 - 3.1.4. La cavitation
 - 3.1.4.1. Suivi temporel
 - 3.1.4.2. Résistance à la cavitation
 - 3.2. Les indicateurs indirects et intégrateurs
 - 3.2.1. L'efficacité d'utilisation de l'eau
 - 3.2.1.1. Définition
 - 3.2.1.2. Approche isotopique
 - 3.2.2. Approche dendrométrique : la croissance annuelle en diamètre
 - 3.2.3. Approche anatomique
 - 3.2.4. Approche allométrique
 - 3.2.5. Les indices foliaires
 - 3.2.6. Isotope de l'eau du xylème (sève brute)
4. Les modèles de fonctionnement
 - 4.1. Définition
 - 4.2. Utilisation des modèles de fonctionnement pour l'adaptation et la sylviculture

Conclusion

Annexes sous forme de fiches :

- Fiches indicateurs fonctionnels
- Fiches modèles de fonctionnement

Annexe 7c. Composition du comité de contributeurs-relecteurs du référentiel.

- Jean Ladier
- Nicolas Martin (contributeur)
- François Courbet (contributeur)
- Jean-Marc Limousin (contributeur)
- Jérôme Rosa
- Michèle Lagacherie
- Philippe Balandier
- Myriam Legay (relecture seule)
- Ingrid Seynave
- Christine Micheneau
- Éric Paillassa (relecture seule)
- Hervé Cochard (relecture seule)
- Céline Perrier
- Guillaume Simioni
- Hendrik Davi
- Philippe Rozenberg

Annexe 7d. Difficultés rencontrées au cours du projet

Malheureusement les personnes participant au projet n'ont pas été épargnées par les soucis de santé. Un agent technique INRA qui devait travailler sur le terrain et au laboratoire a été en arrêt de maladie longue durée sur pratiquement la durée totale du projet (du 12 mai 2017 jusqu'au 5 octobre 2018). Malgré son remplacement par un agent en CDD sur une durée courte et uniquement sur les mesures pratiquées au laboratoire (du 12 mars 2018 au 11 juin 2018) cette absence a nécessité un investissement important non prévu du responsable du projet sur le terrain. Les simulations avec le modèle NOTG devaient se faire dans le cadre d'un projet de master 2. Malgré une diffusion très large du sujet, aucun candidat ne s'est présenté. La seule personne restant pour faire ces travaux était Guillaume Simioni. NOTG est un modèle assez pointu et lourd en temps de calcul. Pour ce travail de simulations, il était estimé que Guillaume devait dégager entre 6 et 8 semaines à plein temps. Le travail a été initié, mais n'a pu être terminé en raison d'un accident de trajet début septembre 2018, qui a engendré un total de 14 semaines d'arrêt de travail (du 06/09/2018 au 19/10/2018 et du 19/12/2018 au 12/02/2019). La tâche 3b n'a pas pu être réalisée entièrement comme prévue. Cette absence prolongée a eu aussi des répercussions sur d'autres projets. À ce jour nous n'avons pas de résultats à présenter avec NOTG. Néanmoins, poursuivre ces travaux reste une priorité pour 2019.