

Changement Climatique, quel avenir pour le Douglas en Bourgogne ?

Partenariat Européen pour l'Innovation

Synthèse
des actions
2020-2022

Bruno Borde © CNPF

Résumé Opérationnel

Ce projet couramment appelé « PEI douglas » est un projet regroupant de nombreux partenaires de la forêt privée en Bourgogne-Franche-Comté, s'étalant sur deux ans et doté d'une équipe pluridisciplinaire, faisant intervenir une grande variété d'acteurs du monde forestier, chercheurs, gestionnaires, propriétaires, conseillers sylvicoles et experts forestiers.

Résultats obtenus :

Constitution d'un [réseau opérationnel de peuplements modèles](#) en Bourgogne selon une grande diversité de modes de gestion, de stations forestières et de conditions climatiques.

Installation de [plantations expérimentales](#) permettant le test de [modalités de mélange à la plantation](#) et le test d'essences d'accompagnement ou de substitution au Douglas.

Avancée de la recherche sur :

- | les comparaisons de [provenances de Douglas](#) ;
- | les [caractéristiques des sols sous Douglas](#), et son impact sur les conditions pédologiques ;
- | [l'écophysiologie fine](#) du Douglas.

Avancées pour les sylviculteurs et propriétaires forestiers Bourguignons :

- proposition d'[itinéraires sylvicoles alternatifs](#) pour le douglas en contexte de changement climatique ;
- définition de [zones de vigilance renforcée](#) pour la sylviculture du douglas ;
- alerter sur la [situation sanitaire](#) critique dans laquelle se trouve un grand nombre de peuplements de douglas en BFC.

Nous souhaitons remercier tout particulièrement l'ensemble des [propriétaires forestiers](#) qui nous ont permis de travailler sur leur propriété et qui nous ont fait confiance pour la réalisation d'essais sur leurs parcelles. Sans ces personnes volontaires, le CNPF ne pourrait pas poursuivre ses missions d'expérimentation et de recherche sur le changement climatique en forêt.

Executive Summary

This project, usually called « PEI Douglas » is a multi partenarial project, combining actors from all over the private forests sector in Bourgogne-Franche-Comté. Running from 2020 to 2022, this project has put together a multi-disciplinary team, from forest scientists to land owners or forest experts.

Goals achieved :

Creation of an operational [network of model forest stands](#), taking in consideration a large diversity of forest management practices and various climate conditions of the Burgundy region.

Installation of [experimental plantations](#), allowing the CNPF to test and compare different conditions of plantation for [mixed species stands based on Douglas-fir](#) accompanied by various tree species.

Advanced research on :

- | Comparison of climate change resistance of different [Douglas-fir origins](#),
- | [Characteristics of soils](#) under dense Douglas-fir stands,
- | [Ecophysiology](#) of Douglas-fir and its micro reactions to hydric stress.

Sylvicultural advances for the foresters in Burgundy :

- | Proposition of [alternative forest management systems](#) for Douglas-fir in climate change context,
- | Definition of [high climate risk areas](#) for Douglas-fir,
- | Alert on the bad [sanitary situation](#) of most of douglas-fir stands in Burgundy.

We wish to thank all the [forest owners](#) who allowed us to work on their property, and entrusted us with the realisation of experimentations on their Douglas-fir stands. Without those dedicated and trusting people, the CNPF would not be able to pursue its missions of forest experiments and researches on the impact of climate change in French forests.

Table des matières

2020-2022	1
Résumé Opérationnel	2
Executive Summary	3
Introduction	6
1. TÂCHE 1 : Constitution d'un réseau régional de références et d'essais sur le douglas	8
1.1. Contexte du projet	8
1.2. Choix des itinéraires sylvicoles à consolider et à développer	12
1.3. Choix des sites et protocoles d'installation et de mesures	15
1.4. Élément de diagnostics du réseau en lien avec le changement climatique	26
1.5. Caractéristiques du réseau par itinéraires	42
1.6. Synthèse du réseau	75
1.7. Transfert des connaissances	80
1.8. Conclusion	82
2. TÂCHE 2 : Evaluation et analyse des risques	84
2.1. Evaluer la vulnérabilité hydrique et thermique au changement climatique	84
2.2. Evaluer l'effet de la fertilité des sols et de la sylviculture sur la capacité du douglas à faire face au changement climatique	94
2.3. Impact de la sylviculture sur le bilan carbone et la biodiversité générale	98
3. TÂCHE 3 : Adapter et renouveler les peuplements pour favoriser leur résilience	106
3.1. Analyse des échecs et réussites des plantations réalisées ces dernières années	106
3.2. Analyse des échecs et réussites de régénérations naturelles	119
3.3. Mise en place de plantations de douglas en mélange avec d'autres espèces, test de comportement de certaines variétés en mélange, recherche d'espèces de substitution au douglas	126
3.4. Expérimentation de nouvelles variétés de douglas	156
3.5. Mesures écophysiological fines	229

Conclusion générale	245
Bibliographie partie 1 et 3.1 3.2 3.3	246
Bibliographie partie 2.2	250
Bibliographie partie 2.3.1	251
Bibliographie partie 3.4	252
Index des principaux sigles et abréviations	253

Introduction

Le projet « CHANGEMENT CLIMATIQUE, QUEL AVENIR POUR LE DOUGLAS EN BOURGOGNE ? » (2020-2022) est financé par le FEADER dans le cadre du Partenariat Européen pour l'Innovation. Il a pour objectif le développement des connaissances sur la sylviculture du Douglas en réponse aux enjeux de la filière en Bourgogne-Franche-Comté. C'est un projet collaboratif entre le CNPF Bourgogne-Franche-Comté (CNPF BFC), l'INRAE, l'IDF, l'AFI et la Société Forestière de la Caisse des Dépôts et Consignations.

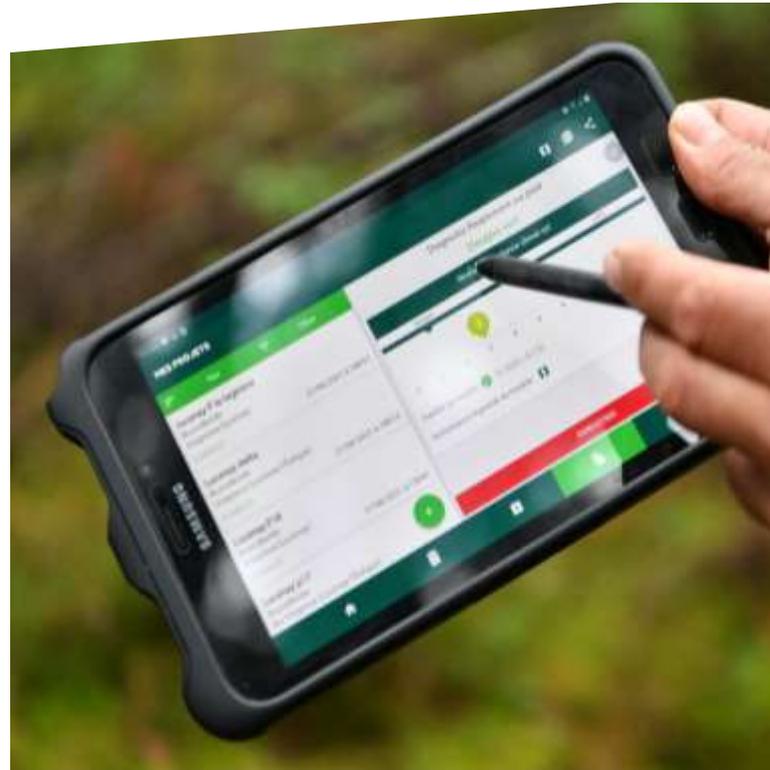
Ce projet conduit par le CNPF BFC a rassemblé des partenaires scientifiques (INRAE), les services de recherche et développement du CNPF (IDF), l'association futaie irrégulière (AFI), des Experts forestiers et gestionnaires forestiers ainsi que des propriétaires de douglas réunis au sein du groupe douglas du CETEF de Bourgogne.

Chacun a apporté son expertise afin de contribuer à la réussite du projet :

- | l'INRAE Nancy – BEF à l'effet de la fertilité des sols sur la capacité du douglas à faire face au changement climatique (tâche 2) ;
- | l'AFI sur les traitements irréguliers (tâches 1, 2) et a mis à disposition du projet son réseau de placettes ;
- | la Société Forestière de la Caisse de Dépôts et Consignations a mis à disposition des parcelles et peuplements pour la constitution du réseau (tâche 1), d'essais de plantation (tâche 3) et a contribué à l'installation des expérimentations de techniques de plantations en mélange ;
- | Le CNPF BFC, les Experts forestiers et gestionnaires forestiers ainsi que le groupe douglas du CETEF Bourgogne ont mis à disposition un réseau de placettes, peuplements expérimentaux... (tâche 1). Ils ont contribué à mettre en œuvre avec et chez les propriétaires intéressés des placettes de références et des expérimentations de techniques de plantations en mélange et d'essences nouvelles... (tâches 2 et 3) ;
- | l'IDF a apporté son expertise et son appui à la structuration du réseau de référence (tâche 1), l'utilisation des outils Bioclimsol, Archi, à la réalisation et l'analyse des bilans carbone et biodiversité (tâche 2) et aux analyses et expérimentations d'adaptation et de renouvellement des peuplements (tâche 3).

Tâche 1

Constitution d'un réseau régional de références et d'essais sur le douglas



1. TÂCHE 1 : Constitution d'un réseau régional de références et d'essais sur le douglas

Auteurs

Bruno BORDE, Lucas SCHNAPPER (CNPF Bourgogne-Franche-Comté)

1.1. Contexte du projet

En Bourgogne, le Douglas occupe 8 % de la surface forestière, il représente 36,4 % du volume récolté en bois d'œuvre résineux et 26 % du volume total récolté en bois d'œuvre. Cette essence qui produit 18,8 m³ par hectare et par an est très appréciée des sylviculteurs et c'est par ailleurs la première espèce utilisée en reboisement. Sa vitesse de croissance, la qualité de son bois et la forte demande commerciale incitent à étendre les plantations dans des zones qui peuvent paraître limites vis-à-vis des futurs paramètres climatiques.

Comme la plupart des espèces forestières, le douglas a souffert des conditions extrêmes de chaleur et de sécheresse de ces dernières années. L'année 2003, qui a associé vagues de chaleur et sécheresse a marqué durablement les forestiers. Mais les années 2005, 2014, 2015, 2017, 2018, 2019 et 2020 avec pour certaines les plus chaudes jamais enregistrées en Europe, ont également fortement impacté les forêts. Les canicules et les pics de chaleur de ces années combinés à un déficit hydrique, ont engendré l'apparition de différents symptômes de dépérissements dans les douglasaies. Dans un tel contexte, la question de la gestion et du renouvellement des peuplements de douglas est un enjeu majeur pour maintenir la ressource bourguignonne.

Les principaux producteurs de douglas ont constitué un groupe de réflexion et d'échanges sur la sylviculture du douglas qui est intégré au CETEF Bourgogne (Centre d'Etudes Techniques et d'Expérimentation Forestières). Ce groupe animé par le CNPF Bourgogne-Franche-Comté se pose de nombreuses questions sur le devenir de cette essence. Pour apporter des éléments de réponse, des acteurs de la forêt privée et des chercheurs ont proposé d'étudier les points suivants :

- | Quels risques pèsent sur les peuplements de douglas, comment les évaluer, dans quelles stations pourra-t-on le maintenir ?
- | Y-a-t-il des itinéraires sylvicoles plus résilients que d'autres et respectueux des milieux et des sols ?
- | Quelles sylvicultures mener pour produire des bois de qualité tout en ayant des peuplements résilients ?
- | Comment intégrer les évolutions climatiques dans le renouvellement des peuplements existants ?

A l'issue du projet, nous disposons d'une quantité d'informations importantes, balayant une grande partie des domaines attachés à la sylviculture du douglas. Ces informations permettront d'accompagner et d'optimiser la production et donc de dynamiser l'économie locale tout en tenant le plus grand compte de la gestion des écosystèmes et en assurant leur durabilité.



Figure 1 : Formation sur la reconnaissance des dépérissements du douglas – Marizy (71) (Photo B. Borde)

Objectifs :

En fonction du constat précédent les objectifs de la constitution d'un réseau de référence ont été les suivants :

- | construire un réseau d'échantillon (placette) d'au moins 60 peuplements de douglas de plus de 35 ans représentatifs de la diversité des climats et des sols régionaux ;
- | recueillir les données stationnelles, dendrométriques, écologiques et sanitaires de chaque placette et améliorer les connaissances sur la résilience des peuplements et la résistance des arbres face aux épisodes climatiques extrêmes ;
- | évaluer les techniques sylvicoles conseillées, et en tester de nouvelles ;
- | suivre l'évolution de la croissance et de la production des peuplements dans le temps ;
- | préciser les contraintes liées au climat au moyen des outils BioClimSol et ARCHI ;
- | préciser l'autécologie du douglas en Bourgogne ;
- | élaborer des éléments de vulgarisation résultant de ces conclusions (vulgarisation, formation) ;
- | disposer de sites de démonstration, de développement, de formation et de vulgarisation et de sensibilisation auprès des propriétaires et gestionnaires forestiers (réunion vulgarisation, tournée forestières d'autres régions, formation des professionnels, martelloscope, scolaire, journaliste ;
- | préciser les besoins du douglas quant au climat et aux sols ;
- | pouvoir tester ou comparer différentes techniques ou essences ;
- | participer au développement des connaissances et constituer un réseau de peuplements sur lesquels des études à venir pourront être menées avec un historique et une base de données déjà constituée.

Ce réseau a été constitué sur les régions naturelles bourguignonnes où sont présents des peuplements de Douglas, sur stations optimales ou non. Il est constitué majoritairement de nouvelles placettes de référence et d'une sélection de placettes d'essais existants, suivies par différents organismes de la forêt privée (CNPFP BFC, AFI, SFCDC) acceptant de mettre leurs données en commun. Des références de gestion intéressantes disposant de données ponctuelles (martelloscopes, peuplements en forêts publiques, experts indépendants...) ont pu enrichir ce réseau et diversifier les comparaisons. L'AFI a complété le réseau sur le traitement irrégulier en installant trois nouveaux dispositifs de références et deux martelloscopes (placette permettant de réaliser des exercices pratiques de martelage et d'analyser en temps réel l'impact des coupes et des travaux sur le devenir du peuplement). Chaque placette a fait l'objet d'une série de mesures (hauteur totale, circonférence, qualité...) et de diagnostics (Bioclimsol, ARCHI, IBP, Carbone du sol), complétés lorsque cela a été possible par différentes données historiques (année de plantation, de coupes, intensité d'éclaircies, volumes prélevés et d'une synthèse des observations. Ces mesures ont été effectuées par le CNPFP BFC, avec la participation de certains propriétaires.

La constitution de ce réseau régional douglas est une base indispensable pour de futures études à mener sur la thématique du Douglas.

Le réseau présenté sur la carte ci-après est constitué de 95 placettes de référence.

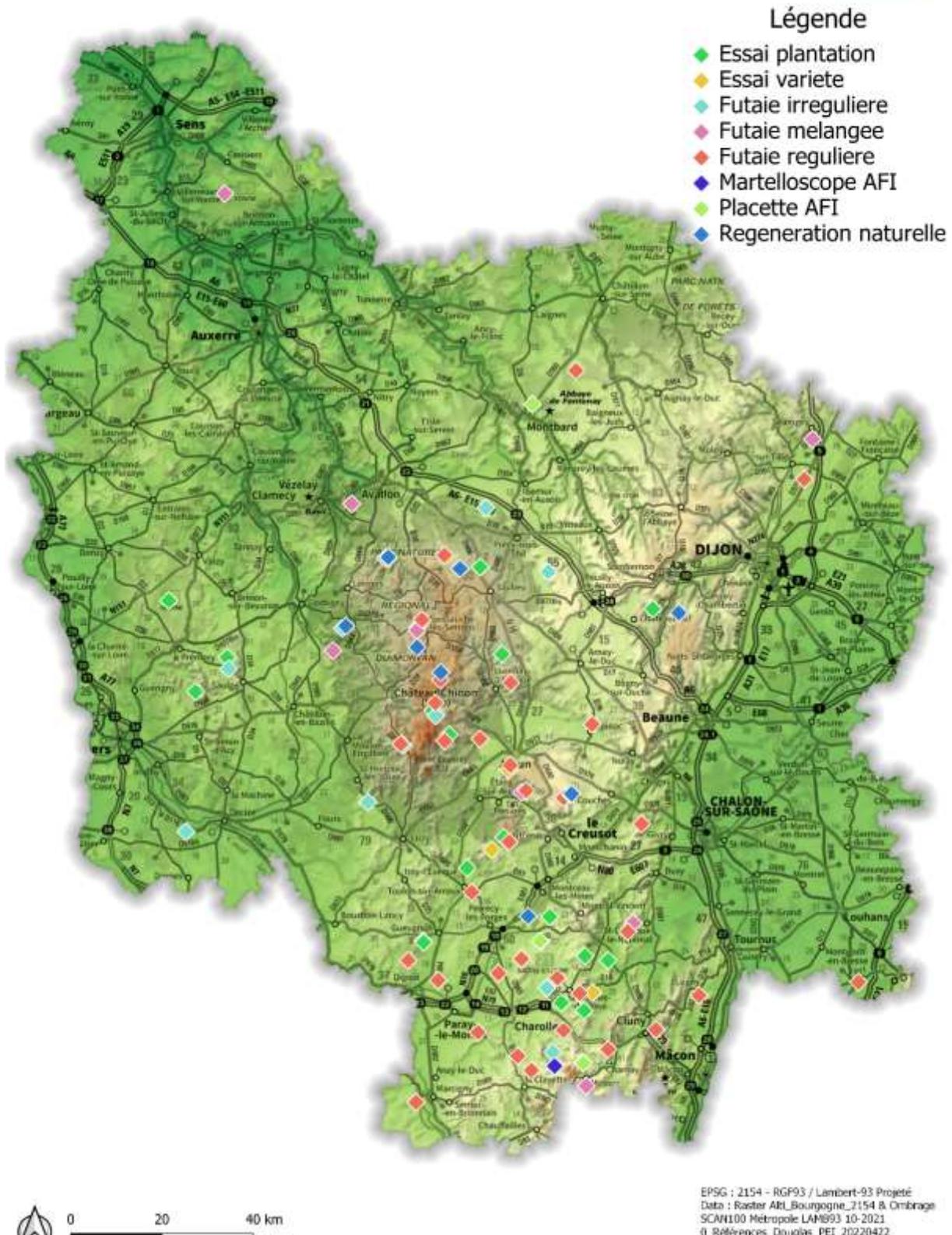


Figure 2 : Carte de localisation des placettes du réseau Douglas en Bourgogne

Un réseau de références et d'expérimentations au service des propriétaires
forestiers et des gestionnaires de forêts

Pour répondre aux objectifs, le travail a été structuré en cinq volets qui sont détaillés dans la suite du document :

- 1- Choix des itinéraires sylvicoles à consolider et à développer
- 2- Méthodes et protocoles d'installation et de mesures
- 3- Éléments de diagnostics en lien avec le changement climatique
- 4- Traitement des données et valorisation des résultats
- 5- Transfert des connaissances

1.2. Choix des itinéraires sylvicoles à consolider et à développer

Le réseau CNPF mis en place à l'aide des gestionnaires et des propriétaires forestiers, est constitué de 22 peuplements signalés et 36 références (cf. tableau ci-après).

La constitution de ce réseau s'est attachée à couvrir toutes les sylvicultures pratiquées en Bourgogne ou souhaitées par les propriétaires :

- | futaie régulière à rotation moyenne (40 à 50 ans) suivi d'une replantation en douglas ;
- | futaie régulière avec allongement de production avec éclaircies de récolte, régénération lente ;
- | mélange feuillus-résineux ;
- | traitement d'irrégularisation ;
- | mélange à la plantation ;
- | régénération naturelle.

L'AFI a complété le réseau sur le traitement irrégulier en installant trois nouveaux dispositifs de références et deux martelloscopes (placette permettant de réaliser des exercices pratiques de martelage et d'analyser en temps réel l'impact des coupes et des travaux sur le devenir du peuplement).

Thématique	N°	Communes	Dept	Sylvoécocorégion
Futaie régulière				
	1	MORNAY	71	B 92 Bourbonnais et Charolais
	2	SAINT PRIX	71	G 23 Morvan et Autunois
	3	MONTAGNY SUR GROSNE	71	G 41 Bordure Nord-Est du Massif central
	4	ANOST	71	G 23 Morvan et Autunois
	5	LA CELLE EN MORVAN	71	G 23 Morvan et Autunois
	6	ROUSSILLON EN MORVAN	71	G 23 Morvan et Autunois
	7	EPINAC	71	C 20 Plateaux calcaires du Nord-Est
	8	ARTAIX	71	B 92 Bourbonnais et Charolais
	9	AUTUN	71	G 23 Morvan et Autunois
	10	ST AUBIN EN CHAROLLAIS	71	B 92 Bourbonnais et Charolais
	11	ST BONNET DE JOUX	71	B 92 Bourbonnais et Charolais
	12	DYO	71	B 92 Bourbonnais et Charolais
	13	BURZY	71	B 92 Bourbonnais et Charolais
	14	NOCHIZE	71	B 92 Bourbonnais et Charolais
	15	LUGNY	71	C 20 Plateaux calcaires du Nord-Est
	16	ST EUGENE	71	B 92 Bourbonnais et Charolais
	17	BEAUBERY	71	G 41 Bordure Nord-Est du Massif central
	18	TOULON SUR ARROUX	71	B 92 Bourbonnais et Charolais
	19	RIGNY SUR ARROUX	71	B 92 Bourbonnais et Charolais
	20	BERZE LE CHATEL	71	B 92 Bourbonnais et Charolais
	21	ST MARD DE VAUX	71	B 92 Bourbonnais et Charolais
	22	ANTULLY	71	G 23 Morvan et Autunois
	23	ST BONNET VIELLE VIGNE	71	B 92 Bourbonnais et Charolais
	24	CONDAL	71	C 51 Saône Bresse et Dombes
	25	DIGOIN	71	B 92 Bourbonnais et Charolais
	26	LUCENAY L'EVEQUE	71	G 23 Morvan et Autunois
	27	CURBIGNY	71	B 92 Bourbonnais et Charolais
	28	BROYE	71	G 23 Morvan et Autunois
	29	MONTBARD	21	C 20 Plateaux Calcaires du Nord-Est
	30	PUITS	21	C 20 Plateaux Calcaires du Nord-Est
	31	TIL CHATEL	21	C 20 Plateaux Calcaires du Nord-Est
	32	SAINT LEGER VAUBAN	89	G 23 Morvan et Autunois

	33	MONTSAUCHE LES SETTONS	58	G 23 Morvan et Autunois
	34	VILLAPOURCON	58	G 23 Morvan et Autunois
	35	MONTSAUCHE LES SETTONS	58	G 23 Morvan et Autunois
Futaie irrégulière				
	36	SAINT FIRMIN	71	G 23 Morvan et Autunois
	37	MARTIGNY-LE-COMTE	71	B 92 Bourbonnais et Charolais
	38	MORNAY	71	B 92 Bourbonnais et Charolais
	39	GIBLES	71	G 41 Bordure Nord-Est du Massif central
	40	DOMPIERRE LES ORMES	71	G 41 Bordure Nord-Est du Massif central
	41	OZOLLES	71	G 41 Bordure Nord-Est du Massif central
	42	ROUSSILLON EN MORVAN	71	G 23 Morvan et Autunois
	43	THOSTE	21	C 20 Plateaux Calcaires du Nord-Est
	44	MISSERY	21	C 20 Plateaux Calcaires du Nord-Est
	45	ST FRANCHY	58	G 23 Morvan et Autunois
	46	AVRIL SUR LOIRE	58	B 92 Bourbonnais et Charolais
	47	VILLAPOURCON	58	G 23 Morvan et Autunois
	48	MONTREUILLON	58	G 23 Morvan et Autunois
	49	SEMELAY	58	G 23 Morvan et Autunois
	50	MONTBARD	21	C 20 Plateaux Calcaires du Nord-Est
	51	DOMPIERRE LES ORMES	71	G 41 Bordure Nord-Est du Massif central
	52	MARTIGNY LE COMTE	71	B 92 Bourbonnais et Charolais
	53	GIBLES	71	G 41 Bordure Nord-Est du Massif central
	54	SAINT FIRMIN	71	G 23 Morvan et Autunois
Futaie mélangée				
	55	BROYE	71	G 23 Morvan et Autunois
	56	MATOUR	71	G 41 Bordure Nord-Est du Massif central
	57	ST MAURICE DES CHAMPS	71	B 92 Bourbonnais et Charolais
	58	SELONGEY	21	C 20 Plateaux Calcaires du Nord-Est
	59	MARIGNY L'EGLISE	58	G 23 Morvan et Autunois
	60	MARIGNY L'EGLISE	58	G 23 Morvan et Autunois
	61	MONTREUILLON	58	G 23 Morvan et Autunois
	62	MONTSAUCHE LES SETTONS	58	G 23 Morvan et Autunois
	63	BUSSY EN OTHE	89	B 52 Pays d'Othe et Gâtinais oriental
	64	ISLAND	89	C 20 Plateaux Calcaires du Nord-Est
Régénération naturelle				
	65	SAINT FIRMIN	71	G 23 Morvan et Autunois
	66	CIRY LE NOBLE	71	B 92 Bourbonnais et Charolais
	67	ANOST	71	G 23 Morvan et Autunois
	68	ST DIDIER	21	G 23 Morvan et Autunois
	69	SAINT VICTOR SUR OUCHE	21	C 20 Plateaux Calcaires du Nord-Est
	70	MARIGNY L'EGLISE	58	G 23 Morvan et Autunois
	71	PLANCHEZ EN MORVAN	58	G 23 Morvan et Autunois
	72	VAUCLAIX	58	G 23 Morvan et Autunois
Essai plantation				
	73	SUIN	71	B 92 Bourbonnais et Charolais
	74	St BONNET DE JOUX	71	B 92 Bourbonnais et Charolais
	75	TOULON SUR ARROUX	71	B 92 Bourbonnais et Charolais
	76	LA TAGNIERE	71	G 23 Morvan et Autunois
	77	RIGNY SUR ARROUX	71	B 92 Bourbonnais et Charolais
	78	RIGNY SUR ARROUX	71	B 92 Bourbonnais et Charolais
	79	LA GRANDE VERRIERE	71	G 23 Morvan et Autunois
	80	CHEVAGNY SUR GUYE	71	B 92 Bourbonnais et Charolais
	81	ST VALLIER	71	B 92 Bourbonnais et Charolais
	82	MOLPHEY	21	G 23 Morvan et Autunois
	83	VILLIERS EN MORVAN	21	G 23 Morvan et Autunois
	84	LA BUSSIÈRE SUR OUCHE	21	C 20 Plateaux Calcaires du Nord-Est
	85	LA BUSSIÈRE SUR OUCHE	21	C 20 Plateaux Calcaires du Nord-Est
	86	NOLAY	21	B 53 Pays-Fort, Nivernais et plaines prémorvandelles
	87	NOLAY	21	B 53 Pays-Fort, Nivernais et plaines prémorvandelles

88	SAINT BONNOT	58	B 53 Pays-Fort, Nivernais et plaines prémorvandelles
89	MONTSAUCHE	58	G 23 Morvan et Autunois
90	ST FRANCHY	58	G 23 Morvan et Autunois
91	ARLEUF	58	G 23 Morvan et Autunois
92	SAILLY	71	B 92 Bourbonnais et Charolais
93	AUTUN	71	G 23 Morvan et Autunois
94	DETTEY	71	G 23 Morvan et Autunois
95	PRESSY SS DONDIN	71	B 92 Bourbonnais et Charolais

1.3. Choix des sites et protocoles d'installation et de mesures

1.3.1. Paramètres de sélection des peuplements

Différents critères de sélection des sites ont été établis, notamment l'homogénéité du peuplement ainsi qu'un accès facile à la parcelle. La motivation du propriétaire est également un élément important car une placette est installée pour de nombreuses années.

Une convention non contraignante est rédigée pour bien fixer les objectifs de la placette et les engagements respectifs du propriétaire et du CNPF. La majorité des propriétaires associés à ce travail provient du CETEF de Bourgogne groupe Douglas et de la Société Forestière de la Caisse des Dépôt et Consignations, partenaires du PEI.

Pour le choix des peuplements, une attention particulière a été portée aux enjeux douglas des différents gradients écologiques de la Bourgogne (voir carte ci-après). Le réseau de dispositifs a été installé de manière à explorer au maximum la diversité des contextes écologiques (climat, conditions stationnelles) des aires de production actuelles, tout en anticipant leur évolution.

1.3.1.1. Gradient stationnel

Les placettes installées sont situées dans un panel d'altitude assez étendu afin d'explorer au mieux le gradient altitudinal de la Bourgogne.

Contexte stationnel des placettes du Réseau Douglas

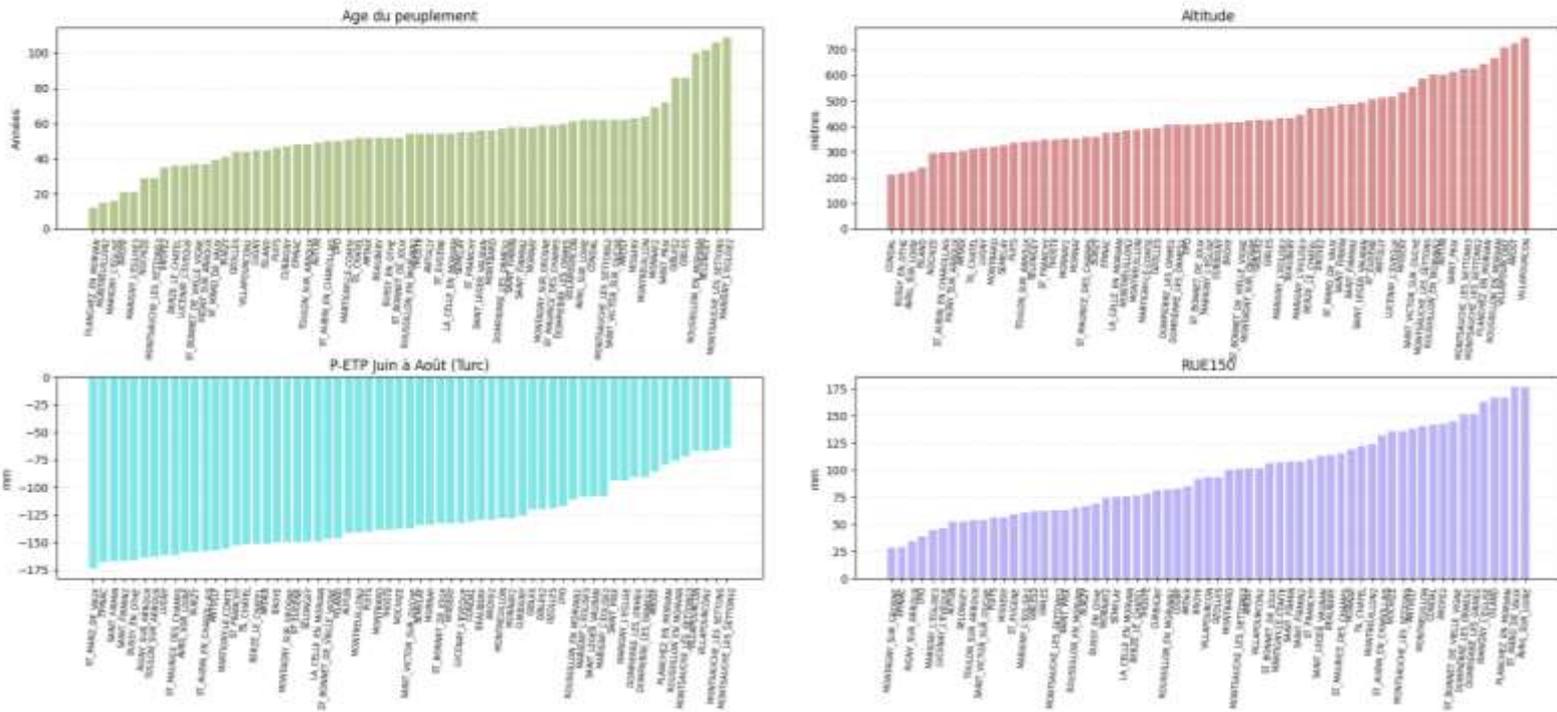


Figure 3 : Gradient stationnel des placettes du réseau PEI Douglas

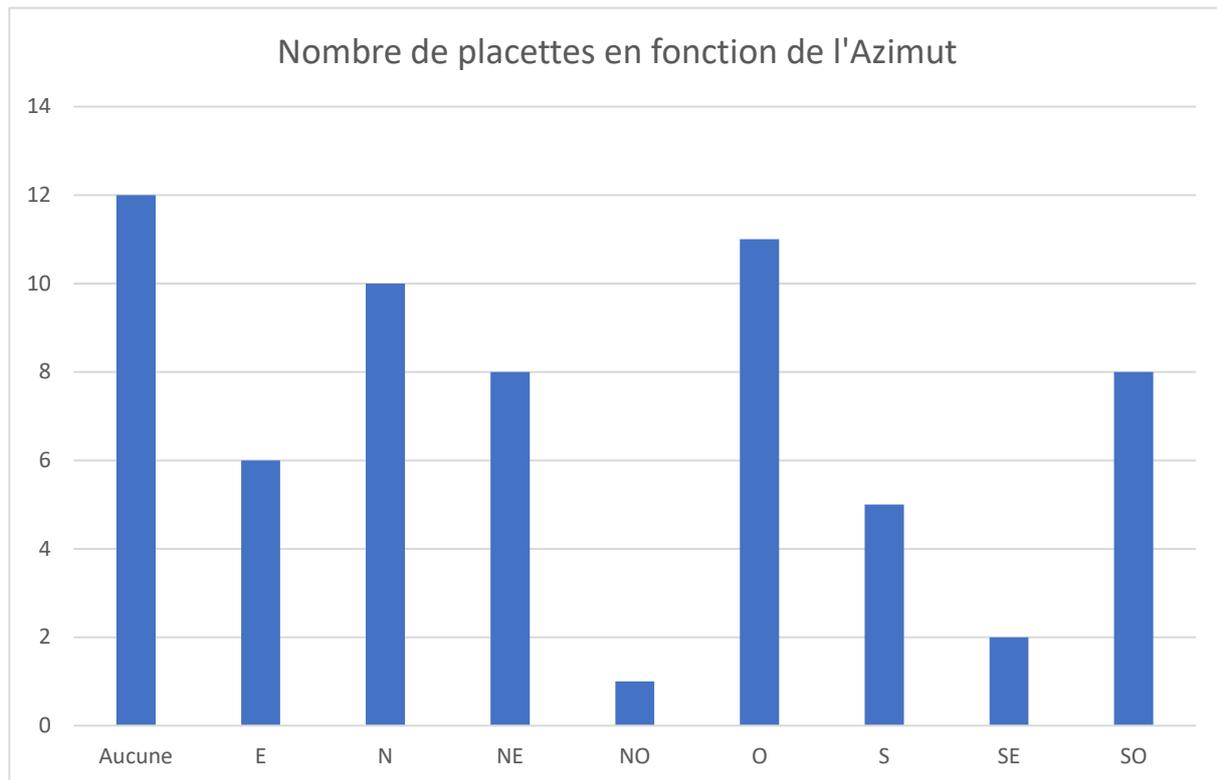


Figure 4 : Répartition des placettes du réseau en fonction de leur orientation

Les sites ont été choisis de manière à couvrir un panel de situations variées dans lesquelles le douglas est présent et dont les enjeux face aux changements climatiques sont importants. Trois types de situation ont ainsi été définis en sachant que la RU150 peut modifier, en positif ou négatif, l'adaptation du douglas à ces situations :

| Situation défavorable au douglas

Station de plaine souvent inférieure à 400 m d'altitude pour des RU150 inférieures à 150 avec un IBS+2 de 5. Le douglas n'est pas adapté et des essences de substitution doivent être envisagées. Les investissements sur le douglas sont fortement découragés.

| Situation non optimale pour le douglas

Station souvent comprise entre 400 et 600 m d'altitude pour des RU150 comprises entre 90 et 150 et un IBS+2 de 4. Le douglas n'est pas parfaitement adapté, il peut éventuellement être envisagé sous condition de l'introduire en mélange avec d'autres essences supposées plus résistantes au stress hydrique. Un investissement modéré est recommandé.

| Situation optimale pour le douglas

Station d'altitude supérieure à 600 m avec un IBS+2°C de 2 et 3. Le réservoir utile en eau est supérieur à 90mm. Les différentes sylvicultures du douglas peuvent être envisagées, et des investissements peuvent être faits sur le douglas sereinement.

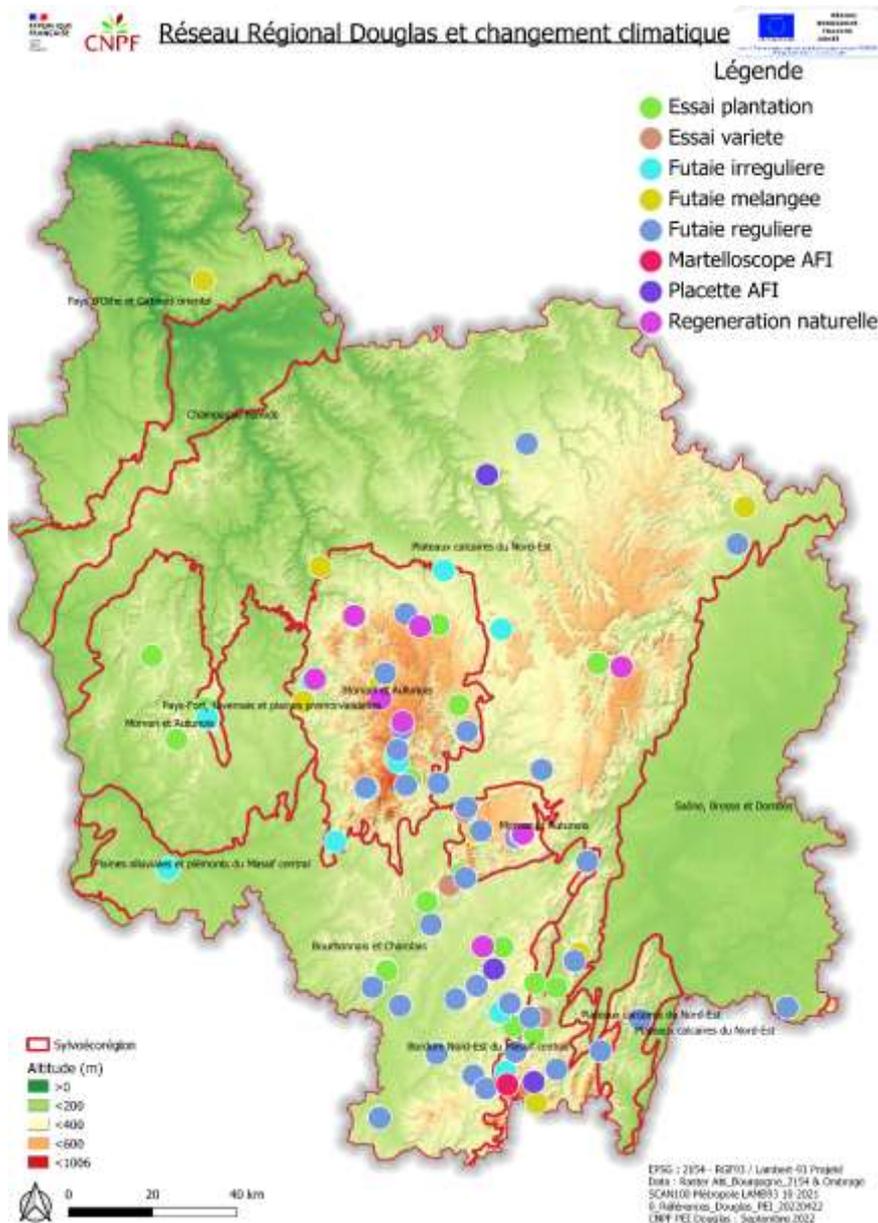


Figure 5 : gradient altitudinal du réseau Douglas en Bourgogne

1.3.2. Diversité des protocoles utilisés sur le réseau

Le réseau a été constitué à partir de 95 peuplements (cf. carte ci-dessus).

Une seule placette sur un site permet de suivre la croissance d'un peuplement en un climat et un sol donné (=référence), plusieurs placettes permettent de comparer différentes techniques ou espèces (= expérimentation).Le réseau s'appuie sur un protocole d'installation qui sert, parallèlement au recensement et au suivi de références, à recueillir des données susceptibles d'expliquer, ou au moins d'observer et d'analyser, l'obtention et le développement de la régénération naturelle.

Le choix a été fait de relever des paramètres variés permettant de décrire chaque peuplement.

Nous nous baserons sur les principes développés dans le cadre du « Guide de l'expérimentation forestière – Principes de base, prise en compte du changement climatique », édité par l'IDF avec l'aide du RMT AFORCE. Sa rédaction a été achevée en décembre 2011, au cours de la première étape du projet Nomades, ce qui a permis une bonne synergie de réflexion. Nous renverrons donc à ce guide chaque fois que nécessaire, pour complément d'information.

Le suivi consiste la plupart du temps en une série de mesures (hauteur totale, circonférence, qualité...) à périodicité régulière de tous les arbres de la placette (voire d'un échantillon seulement). Ces mesures sont effectuées par le CNPF BFC, avec la participation de certains propriétaires.

Matériel utilisé :

- | pHmètre ;
- | chevillère ;
- | dendromètre vertex laser Haglöf ;
- | boussole ;
- | clinomètre ;
- | pioche,
- | tarière,
- | acide chlorhydrique.



Toujours dans l'objectif d'échanges et de discussions avec les propriétaires et gestionnaires, nous avons fait le choix d'utiliser le tarif à décroissance variable pour le cubage des bois sur pied Chaudé. C'est en effet sur la base du volume « marchand » que nous avons voulu comparer les peuplements entre eux.

Les tarifs Chaudé utilisés sont :

- | pour le Douglas : 16 / 17 (arbres cylindro-coniques de belles hauteurs) ;
- | pour le Chêne : 12 (arbres tronconiques) ;
- | pour les feuillus divers : 14 (arbres tronconiques de belle conformation).

Ce réseau repose sur trois niveaux de placettes différentes :

1.3.2.1. Niveau 1 – « Spot »

Une description et des mesures permettent d'apprécier la composition en essences, le capital, la qualité, la structure, l'étagement et la régénération. Il s'agit d'un niveau souple qui permet de garder une image chiffrée d'une zone jugée intéressante.

La placette est circulaire ou rectangulaire de surface fixe. L'objectif est d'avoir une surface suffisante pour conserver 30 arbres en fin de rotation sylvicole, après coupes. La placette type est de 25 mètres de rayon soit environ 20 ares. Dans les peuplements les plus âgés (et les plus clairs) le rayon peut passer à 31m, soit 30 ares.

Le centre de la placette est repéré par une perche sur laquelle est fixé le transpondeur du télémètre. On mesure la circonférence à 1,30 m de chaque arbre. Pour plus de précision, la mesure est au demi-centimètre couvert, prise au ruban. Les mesures de hauteur sont faites sur les arbres dominants ce qui nous permet de déterminer la classe de fertilité du peuplement.

Enfin, chaque arbre est numéroté et ceinturé à la peinture bleue longue durée.

1.3.2.2. Niveau 2 – « peuplement de référence »

Il s'agit de peuplements qui présentent une hétérogénéité dans les diamètres, un mélange d'essences et, si possible, la présence de régénération, de gaules et de perches. On y effectue un suivi dendrométrique par inventaire périodique, rythmé par le passage en coupe, et surtout un enregistrement des données économiques (production par catégorie de produit, recettes, dépenses, temps de travail). Ce niveau a pour but d'illustrer la méthode de gestion ou de conversion en futaie irrégulière (état du peuplement, passé sylvicole, interventions programmées ou possibles).

La différence principale avec le spot est la surface de placette. On définit une zone homogène de un hectare et un inventaire en plein de la zone est réalisé.

1.3.2.3. Niveau 3 - référence AFI

Référence inventaire cartographique : les placettes permettent un suivi individuel des principales caractéristiques des arbres (diamètre, hauteur totale, qualité, houppier) et un suivi de la régénération. Ce niveau a pour but de suivre la croissance en diamètre et la compétition entre les arbres.

Ce type de placette inclut les martelloscopes, qui sont des outils pédagogiques qui permettent de simuler un martelage dans le peuplement. L'installation des martelloscopes a été faite sur des placettes de un hectare, où chaque arbre est positionné géographiquement. Les caractéristiques dendrométriques de chaque arbre sont relevées. Les placettes cartographiées servent de dispositifs de démonstration et de support pour la pratique du martelage.

Le protocole AFI, tel que défini dans le *Protocole d'installation d'un réseau de placettes expérimentales dans des peuplements irréguliers* par Max BRUCIAMACCHIE et Julien TOMASINI, 2015 est utilisé.

Il s'agit un inventaire par échantillonnage à 1,5 % sur une parcelle de 10 hectares. Sont relevées les caractéristiques dendrométriques (diamètre, hauteur, largeur du houppier) ainsi que des données d'abondance de la régénération naturelle par classe de hauteur. Nous relevons également la présence de dendro-micro-habitats sur les arbres inventoriés. Le protocole AFI est un protocole complet développé par l'association futaie irrégulière. Il est disponible en Annexe du présent rapport.

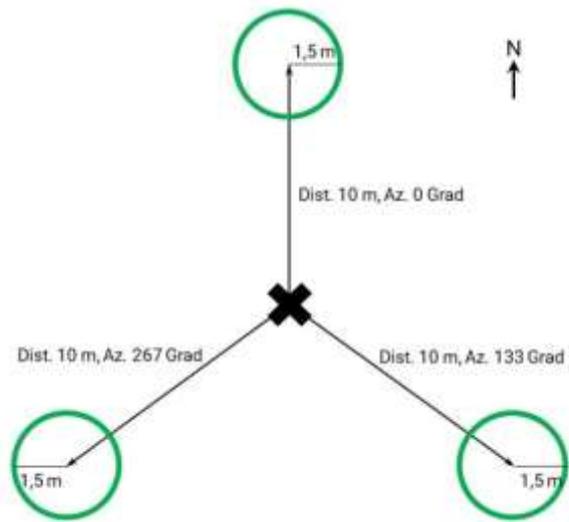
Extrait du protocole AFI - Protocole de relevés de la Régénération Naturelle :

Définition :

Tout ce qui n'est pas issu de souche et qui a un diamètre inférieur à 7,5 cm. Elle est annoncée par classe de hauteur puis de diamètre. Les semis inférieurs à 50 cm ne sont pas dénombrés, un pourcentage de recouvrement leur est attribué. Les traces d'abroustissement sont indiquées par essence.

Mesure :

La régénération est relevée sur 3 sous-placettes de 1,5 m de rayon, disposées à 10 m du centre de la placette. La première est installée au nord, la deuxième à 133 grades, la troisième à 267 grades. Indiquée par essence et par classe de hauteur puis de diamètre, le nombre d'individus rencontrés sur la sous-placette.



Classe 1 : semis compris entre 50 cm et 1,5 m de hauteur

Classe 2 : semis supérieur à 1,5 m de hauteur et inférieur à 2,5 cm de diam

Classe 3 : semis compris entre 2,5 cm et 7,5 cm de diam

On notera de plus pour chaque essence le pourcentage de recouvrement des semis inférieurs à 50 cm de hauteur (hauteur du genou).

NB : sera également relevé sur les sous-placettes de régénération le taillis non précomptable, c'est-à-dire le taillis compris entre 50 cm de haut et 2,5 cm de diamètre. Comme pour les semis, on distinguera 3 classes. Seront intégrés dans cette catégorie soit les brins qui rejettent de souche, soit les ligneux ne faisant pas partie des essences d'arbre au sens sylvicole (ex : noisetier, houx, ...).



Figure 6 : Mesure d'une placette de douglas – St Bonnet de Joux (71) (Photo B. Borde)

1.3.2.1. Données relevées et comptes rendus d'installation

La description de la placette est réalisée lors de son installation et des mesures. Tous les éléments sont consignés dans le dossier d'installation et de suivi transmis aux responsables départementaux du CNPF BFC. Ce document devra être transmis aux expérimentateurs successifs car ce dossier constitue la mémoire de la placette.

Les données de chacune des placettes seront répertoriées dans la base de données ILEX des expérimentations du CNPF et font l'objet d'un compte-rendu complet (exemple page suivante) détaillant les points suivants :

- | situation de l'essai et renseignement généraux ;
- | classe de fertilité et objectifs du suivi;
- | données climatique et stationnelles;
- | données pédologiques;
- | diagnostic climatique BIOCLIMSOL;
- | bilan de la gestion passée;
- | caractéristiques dendrométriques du peuplement;
- | état sanitaire;
- | indice de biodiversité potentielle;
- | stock de carbone au sol;
- | gestion future envisagée.

Pour compléter les données « techniques » relevées sur la parcelle, une « enquête » est faite auprès du propriétaire ou du gestionnaire, afin de recueillir des données auxiliaires. On cherche à connaître :

- | l'âge du peuplement, ou sa date de plantation ;
- | l'origine du mélange, le cas échéant (enrichissements, plantations en mélange...);
- | son bilan économique : les coûts et revenus des dernières opérations sylvicoles ;
- | les dates des dernières opérations sylvicoles ;
- | les provenances qui ont été plantées et les certificats de provenances quand cette donnée est disponible ;
- | l'abondance du gibier sur le massif.

Toutes ces données sont synthétisées dans le compte rendu d'installation, qui permettra aux futurs relevés de se faire dans les meilleures conditions, et de valoriser les données de la placette.

Réseau de référence « Douglas et changement climatique » Peuplement de douglas avec traitement d'irrégularisation

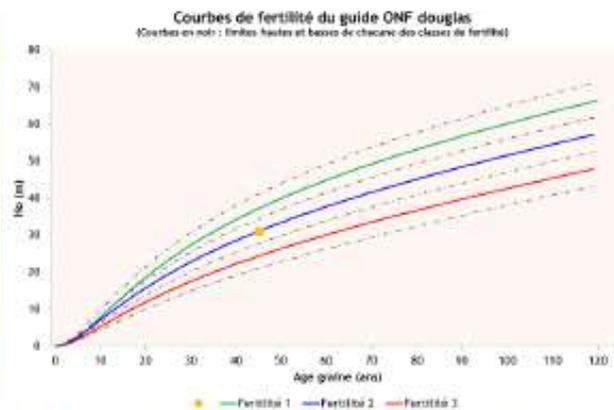
Renseignements généraux - Localisation

Commune de situation de la parcelle	Martigny le Comte (71)	N°parcelle Cad. : N° PSG :	B 106 partie 71-0079-3
Coord. Géog WGS 84 :	Lat. : 46,57952 Long. : 4,356942	Surface :	1,4 ha
Propriétaire :	////////////////	Gestionnaire :	Société forestière CDC

EXPERIMENTATION



Classe de fertilité et objectifs du suivi



Peuplement de douglas planté en 1971 sur billon, touché successivement par la tempête de 1999 et les sécheresses de 2003, 2005 et depuis 2015. Une abondante régénération s'est développée dans les trouées. L'objectif de gestion est d'assurer la continuité de l'« ambiance forestière » en récoltant progressivement le peuplement et en favorisant le développement d'un sous étage et de la régénération naturelle.

Gestion en traitement d'irrégularisation avec des coupe d'amélioration au profit des meilleurs individus désignés à l'aide d'une griffe. Récolte des gros bois ayant atteint leur diamètre d'exploitabilité en fonction de la qualité et éclaircie dans les bouquets denses.

Figure 7 : Exemple d'un compte-rendu d'installation

Données climatiques et stationnel

Valeurs moyennes sur la période 1981-2010

issues du modèle NorCIS©CNPF construit à partir des données Météo-France et AgroParisTech

- Moyenne des températures annuelles (TMAN) : 10,6 °C
- Moyenne des températures maximales juin-août (TX0608) : 24,3 °C
- Moyenne des températures minimales de janvier (TN01) : -0,5 °C
- Température minimale absolue (TNABS) : -20,1 °C
- Précipitations annuelles : 914 mm
- Précipitations avril-octobre : 544 mm
- ETP (Turc) annuelle : 712 mm
- P-ETP (Turc) juin-août : -152 mm
- P-ETP (Turc) mai-septembre : -149 mm
- Altitude : 383 m
- Exposition : 0 degrés
- Pente : 0 %
- Confinement : 0 %
- Position topographique : Plateau
- TPI : 0,18
- Alimentation en eau : pertes ≈ apports
- Affleurement rocheux : 0 %
- Terrasse : non

Données Pédologiques

Horizon	Épaisseur	Texture	% éléments grossiers	Effervescence	Hydromorphie
1	50 cm	Limon moyen (Lm)	0	non	0
2	30 cm	Limon argileux (LA)	0	non	2

- Compacité : Meuble, peu compact
- Cause arrêt tarière : Volontaire
- Forme d'humus : Hémimoder
- pH à 20 cm : 4,80 (valeur mesurée)
- Réservoir utile en eau : 146 mm

Diagnostic climatique BIOCLIMSOL

L'indice de vigilance IBS varie de 0 à 10, il traduit la probabilité d'observer un phénomène de dépérissement, plus il est élevé, plus la probabilité d'observer du dépérissement est élevée.

0 à 3 : Vigilance Modérée

4 à 6 : Vigilance Elevée

7 à 10 : Vigilance Maximale

	Evolution avec IBS		
	Actuel	+1°C	+2°C
Chêne sessile	0	1	2
Chêne pubescent	1	1	1
Châtaignier (montagne continentale)	1	2	3
Douglas vert	2	3	4
Hêtre commun	2	3	5
Chêne pédonculé	2	3	6
Cèdre de l'Atlas	3	3	3
Sapin pectiné	3	6	8
Châtaignier (plaine océanique)	5	6	8
Pin sylvestre	5	6	6

Douglas vert



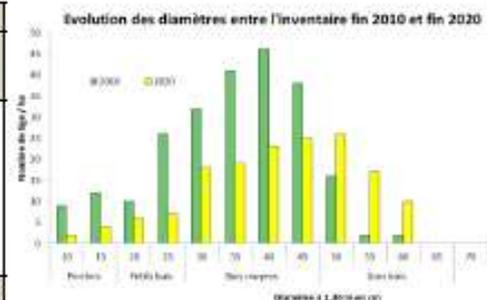
Fiabilité du modèle : 8 (AUC=0,73)

Bilan de la gestion passée

Année	Nature de l'intervention
1992	1ère éclaircie
1993	Elagage à 6 m de 180 arbres/ha
2005	2ème éclaircie
2010	Dégagement des semis et des gaules dans les trouées avec rabattement du bouleau
2011	Eclaircie jardinatoire prélevant 48 m3/ha
2018	Eclaircie jardinatoire prélevant 65 m3/ha

Caractéristiques dendrométriques du peuplement fin 2020

Matériel sur pied/ha	Douglas		
	Densité (/ha)	Volume BO (m ³ /ha)	G (m ² /ha)
(Diam. 10 à 15 cm) Perches	6	0,3	0,1
(Diam. 20 à 25 cm) Petit bois	13	4	0,5
(Diam. 30 à 45 cm) Bois moyens	85	110	10
(Diam. 50 à 65 cm) Gros bois	53	154	12
(Diam. 70 et +) Très gros bois	-	-	-
total	157	268	22,54
Hauteur dominante (m)	33		

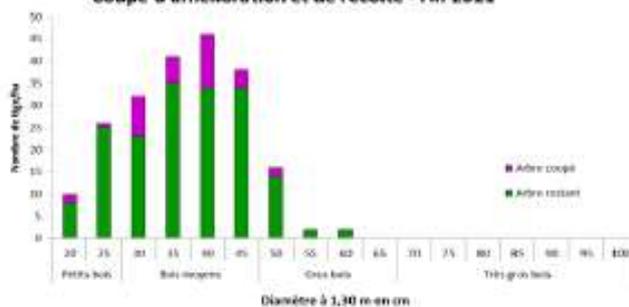


Peuplement

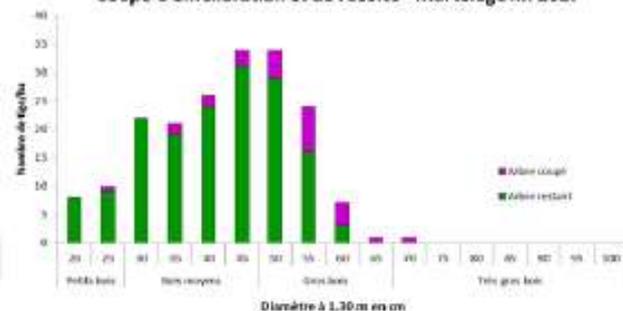
Le peuplement présente fin 2020, une surface terrière de 22,5 m² et un volume bois d'œuvre de 268 m³/ha de douglas. La densité est de 157 arbres/ha.

Caractéristiques des coupes de jardinage exploitées en 2011 et en 2018

Coupe d'amélioration et de récolte - Fin 2011



Coupe d'amélioration et de récolte - Martelage fin 2017



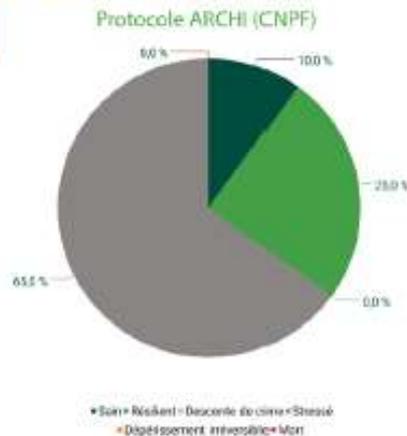
La gestion en irrégulier vise la production de gros et très gros bois de qualité qui assure, du fait de leur gain en volume, la majeure partie de la production et des revenus. Eclaircie à la qualité en récoltant prioritairement les arbres nécrosés et de médiocre qualité. L'objectif est de favoriser les beaux arbres de diamètres moindres et d'économiser le nombre de tiges afin de maintenir le capital producteur.

L'amélioration dans les perches et petits bois permet de travailler au profit des plus beaux arbres. Cette opération d'aération permet aux plus beaux arbres de développer leur houppier afin de produire du bois de haute qualité jusqu'à la récolte.

Martelage modéré dans les bois moyens seulement pour un arbre qui en favorise un autre de diamètre moindre mais de meilleure qualité afin de ne pas entamer le capital producteur.

La régénération naturelle est présente par trouée ou localement diffuse sur environ 30 % de la surface et constituera le renouvellement du peuplement.

Etat sanitaire



L'état sanitaire sur la placette est globalement moyen avec présence de nécrose cambiale. La nécrose cambiale reste un phénomène encore mal expliqué sur le douglas, mais on sait qu'elle est liée à une origine abiotique (fort déficit hydrique estival en 2003) et aggravée par des conditions stationnelles difficiles (classe de fertilité 2).

Concernant la défoliation des houppiers, la méthode d'analyse architecturale des arbres (ou méthode ARCHI) permet de diagnostiquer les anomalies du développement (écarts à la normale) ainsi que les processus de résilience (retours à la normale). Sur les arbres de la placette 10 % des arbres sont diagnostiqués « ARBRE SAIN », 25 % « ARBRE RESILIENT » et 65 % « ARBRE EN ETAT DE STRESS ».

Indice de biodiversité potentielle / Stock de Carbone au sol

L'indice de biodiversité potentielle est de 9, score classique pour une futaie de douglas (entre 5 et 12), en raison du mélange avec un sous étage feuillu.

La capacité d'accueil de la biodiversité peut être améliorée aisément en jouant sur les facteurs « bois mort au sol et « bois mort sur pied ». Un gestionnaire souhaitant améliorer la capacité d'accueil de ce peuplement cherchera à laisser autant que possible des bois morts de gros diamètres en forêt.

	Facteur	Score
A	Essences autochtones	5
B	Structure verticale végétation	1
C	Gros bois mort sur pied	0
D	Gros bois morts au sol	0
E	Très gros bois	1
F	Dendromicrohabitats sur arbres vivants	0
G	Milieux ouverts	0
H	Continuité temporelle	2
I	Milieux aquatiques	0
J	Milieux rocheux	0
	TOTAL	9

La biomasse de carbone au sol (bois mort en décomposition) est négligeable. Concernant la gestion, les itinéraires techniques intensifs incluant un travail du sol ou un prélèvement accru de biomasse (résanants et souches) entraînent une diminution sur le long terme des stocks de carbone et nutriments dans le sol et la biomasse sur pied. Pour le Douglas, les scénarios d'intensification (raccourcissement des révolutions et augmentation de la biomasse prélevée) ont un effet d'atténuation du changement climatique plus faible que la sylviculture standard d'une part et exigent une compensation en nutriments significative d'autre part.

Gestion future envisagée

Traitement en futaie irrégulière avec réalisation de coupe jardinatoire prélevant 20% du volume de la futaie et du taillis à rotation de 5 ans.

Dégagement de semis programmé en 2023 afin de favoriser localement le développement des semis de douglas, de chêne et de châtaignier.

La plus grande attention sera demandée au moment du débardage afin d'éviter les tassements du sol par le passage des engins de débardage. Les couloirs de cloisonnement devront être respectés.



2 septembre 2022
Bruno BORDE
bruno.borde@cnpf.fr
06.12.01.45.00

Réseau de référence

Centre National de
la Propriété
Forestière



1.4. Élément de diagnostics du réseau en lien avec le changement climatique

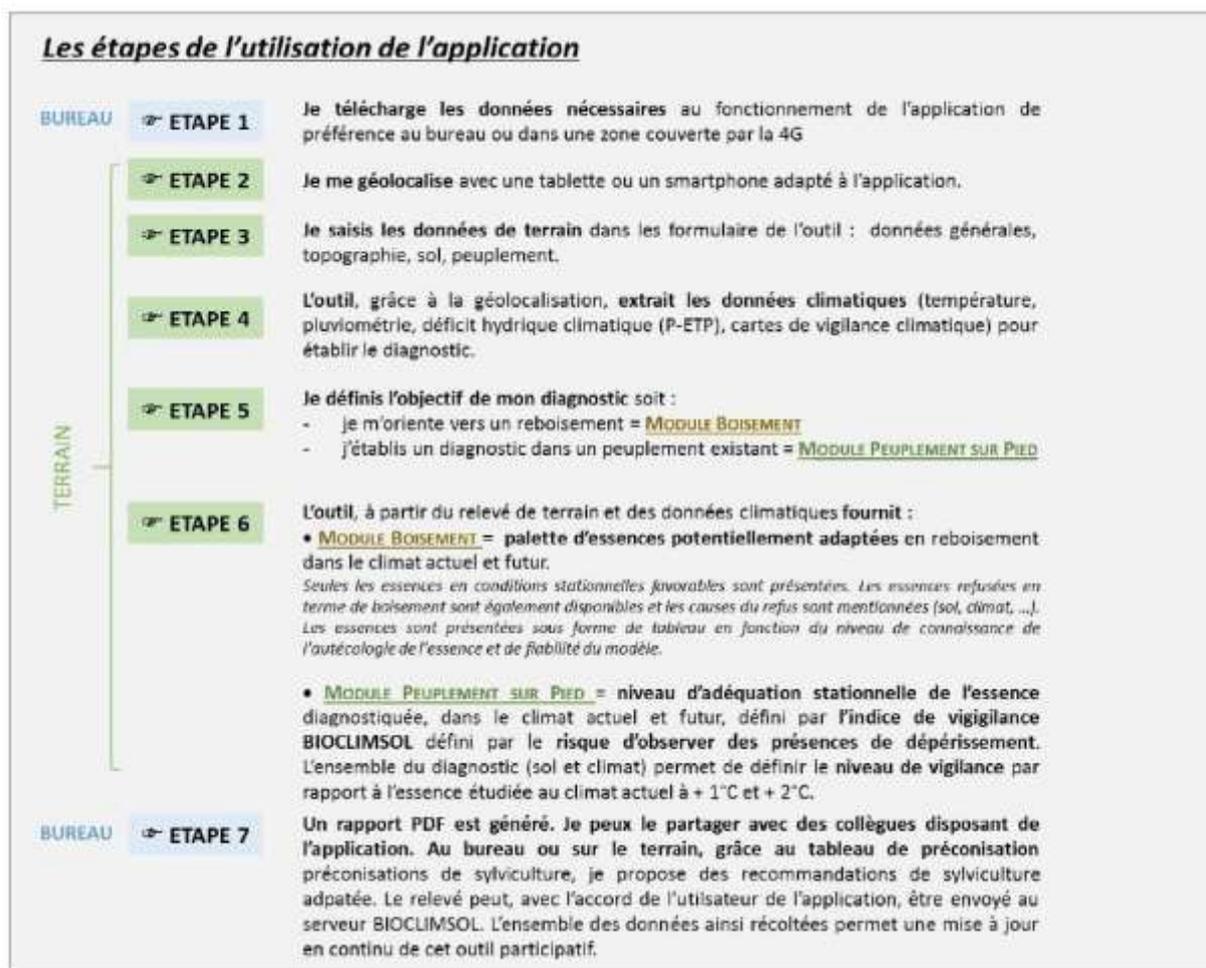
1.4.1. Diagnostic Pédoclimatique - BIOCLIMSOL

Description de l'outil

L'application Bioclimsol a pour objectif d'aider les gestionnaires dans la gestion du risque de dépérissement à la fois dans la conduite des peuplements sur pied et pour le choix des essences en reboisement dans un contexte de dérèglement climatique. BioClimSol est un outil de diagnostic combinant vigilance climatique et critères pédologiques. La récurrence des épisodes à fort déficit hydrique défini par un seuil de déficit hydrique spécifique au douglas a permis de délimiter des zones de vigilance climatique modérée, élevée et maximale.

L'application modélise le climat à venir avec une augmentation de la température moyenne de +1°C et +2°C par rapport aux normales climatiques 1981-2010. Un diagnostic BioClimSol a été fait sur toutes les placettes du réseau que ce soit sur les peuplements en place (partie 1.5) ou pour les plantations expérimentales (Partie 3).

1.4.1.1. Méthode



8 : Utilisation de l'application BioClimSol - Jean Lemaire - IDF Lyon

1.4.1.2. Variables relevées

Caractéristiques de la parcelle : Localisation, date, opérateur, nom de la forêt, commune.

Contexte Stationnel : Altitude, exposition, pente, confinement, position topographique, alimentation en eau, affleurement rocheux, terrasses.

Peuplement : Essence, type de peuplement, intervention récente, Diamètre moyen, Hauteur dominante, Surface terrière, âge.

Pédologie : cause arrêt tarière, pH à 20 cm, compacité, type d'humus.

De plus, pour chaque horizon prospecté : Epaisseur, texture (Jamagne), % éléments grossiers, effervescence, hydromorphie.

La saisie des données se fait directement sur la parcelle, à l'aide d'une tablette numérique qui permet l'utilisation de BioClimSol.

Champs de saisie :

CRÉER UN PROJET
CONTEXTE STATIONNEL

- Altitude (m)
- Exposition: degrés
- Pente: %
- Confinement: %
- Position topographique: Position topographique
- TPI
- Alimentation en eau: Alimentation en eau
- Affleurements rocheux (%):
- Terrasses:

CRÉER UN PROJET
CARACTÉRISTIQUES DU PEUPELEMENT

- Essence: Essence
- Type de peuplement: Type de peuplement
- Intervention récente (c 6 ans): Intervention récente
- Diamètre moyen (cm): valeur mesurée
- Hauteur dominante (m): valeur mesurée
- Surface terrière (m²/ha): valeur mesurée
- Âge (ans): valeur connue

CRÉER UN PROJET
PÉDOLOGIE

PROFIL PÉDOLOGIQUE

Horizon	Épaisseur	Texture	NEG	Efferv	Hydro
1					

- Compacité: Compacité
- Cause arrêt tarière: Cause arrêt tarière
- Forme d'humus: Humus
- pH à 20 cm: pH mesuré ?
- Réservoir utile en eau (mm):

FORECAST BY BIOCLIMSOL

HORIZON 1

- Épaisseur (cm):
- Texture: Texture
- % Éléments grossiers:
- Effervescence:
- Hydromorphie: Hydromorphie

Dans l'application BioclimSol, une partie permet de réaliser un diagnostic de l'état sanitaire du peuplement observé en utilisant le protocole ARCHI.

1.4.1.3. Synthèse

Les projections climatiques indiquent qu'en 2050–2080, l'été moyen sera équivalent à celui de l'été 2003. Au cours des 15 dernières années, nous avons été soumis à plusieurs reprises à des étés similaires à celui de 2003. Il faut se préparer dès aujourd'hui en changeant certaines pratiques sylvicoles. La pire solution serait de ne rien faire et de constater à nouveau des dégâts analogues à ceux des canicules passées.

L'outil BioClimSol combine des critères de climat actuel ou futur et des indices de sol mesurés sur le terrain. Il aide le technicien forestier dans la gestion du peuplement sur pied ou d'une parcelle à boiser et informe sur le risque de dépérissement. Cet outil de terrain est une aide au diagnostic. Il ne se substitue pas aux connaissances du technicien, qui permettent de prendre des orientations de gestion plus fines. L'outil impose une phase de terrain, par son principe de fonctionnement.

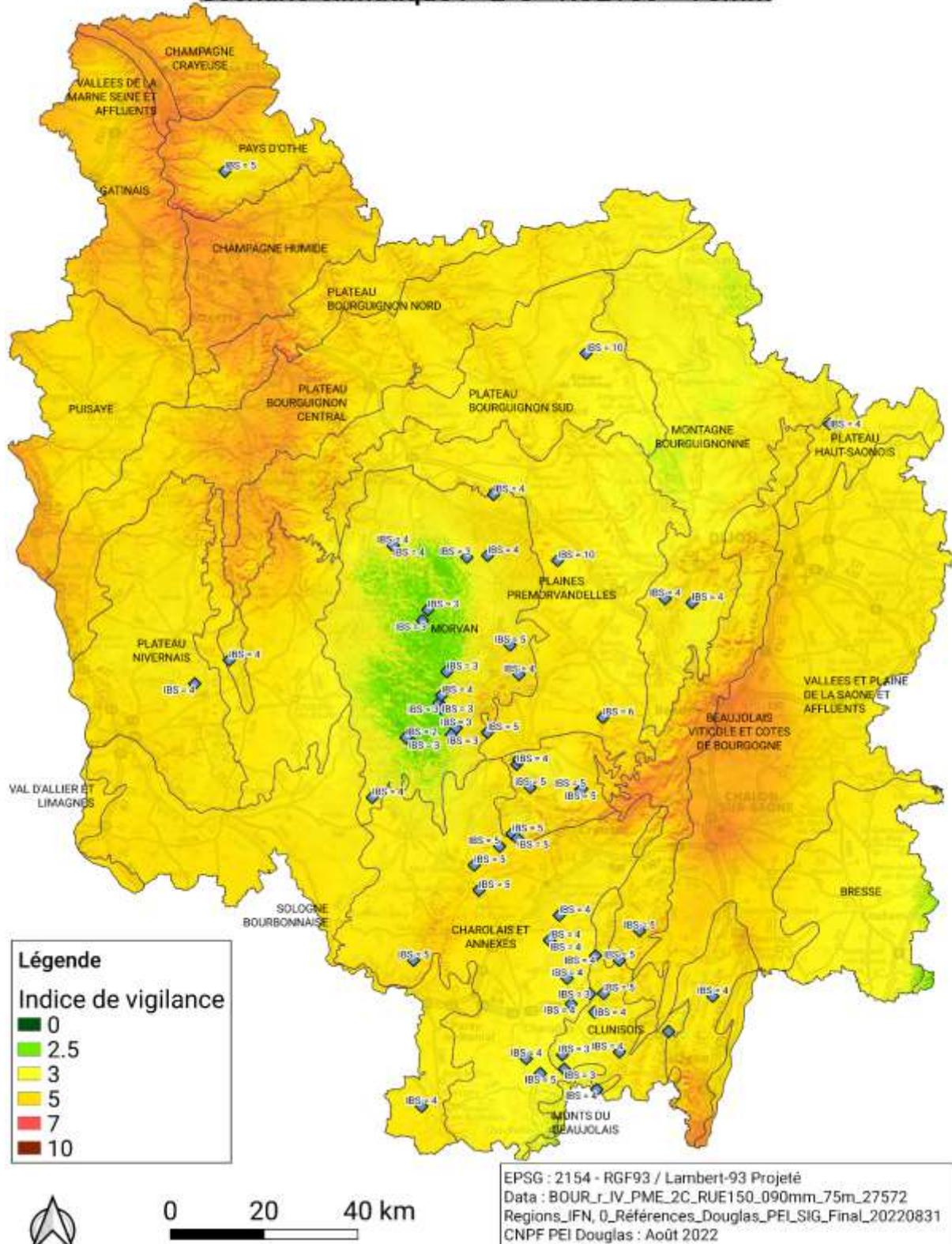
Les cartes présentées en pages suivantes présentent le réseau de placettes Douglas en Bourgogne, triées par réserve utile en eau, selon le scénario climatique +2°C.

63 placettes ont une réserve utile proche de 90mm, 18 placettes ont une réserve utile proche de 130mm et 10 placettes ont une réserve utile proche de 170mm.

La plupart des placettes dont la réserve utile est faible (inférieure à 90mm) se trouve sur des stations dont l'indice de vigilance pour le douglas à +2°C est de 4 ou au-delà. Ceci nous indique qu'à l'avenir, la plupart des peuplements que nous avons sélectionnés seront susceptibles de présenter un risque de dépérissement. Il sera particulièrement intéressant de suivre l'évolution de leur état sanitaire.

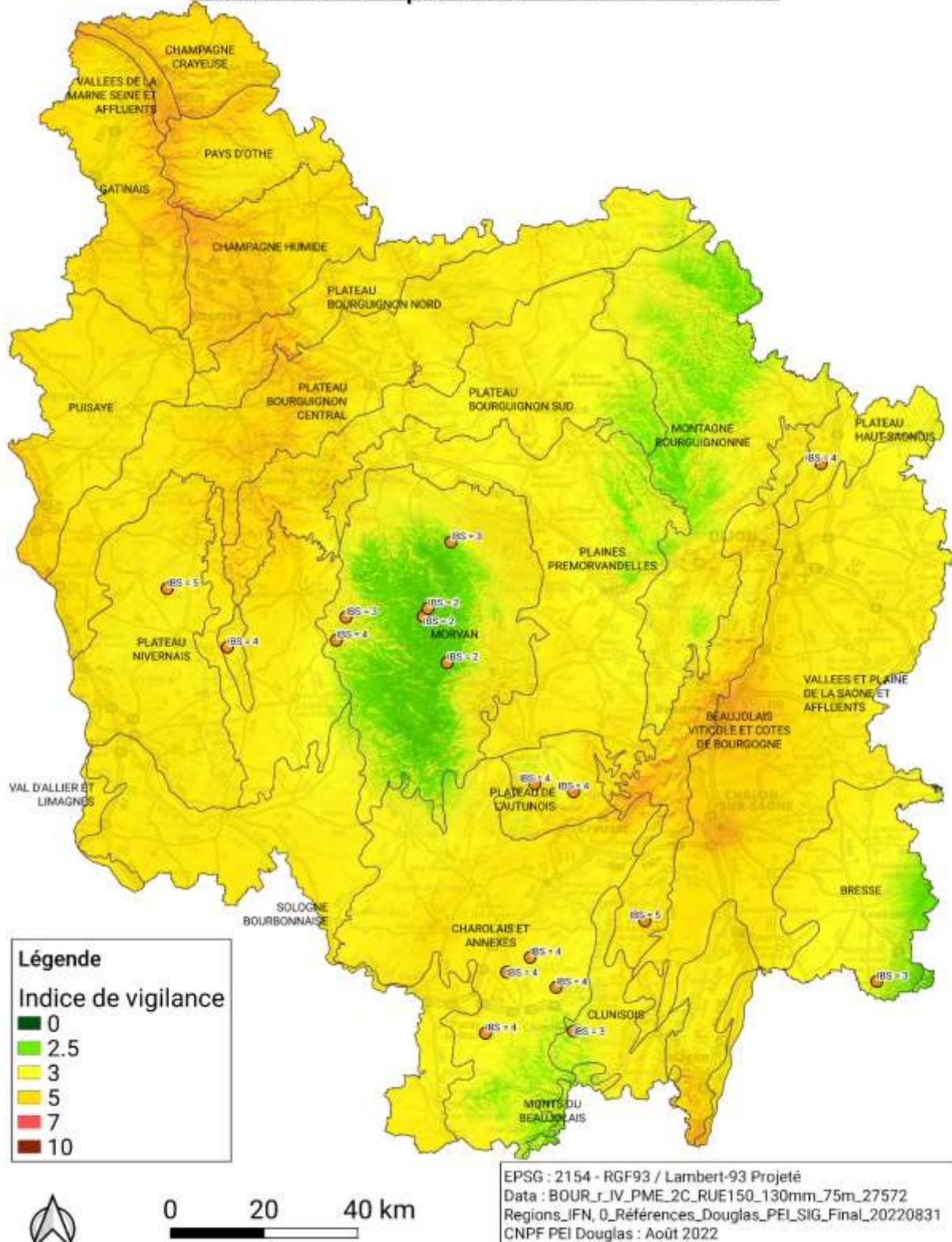
Par ailleurs, même les placettes dont les réserves utiles sont importantes (130 et 170mm) se trouvent à des indices de vigilance déjà élevés (3 ou 4). On peut constater que même les meilleures stations ne sont pas à l'abri d'un risque de dépérissement. Actuellement, seules les stations du Haut-Morvan peuvent encore prétendre être à l'abri d'un dépérissement conséquent.

Carte d'indice de vigilance BioClimSol pour le Douglas en Bourgogne
Placettes dont la RUE est inférieure à 110mm (63 placettes)
Scénario climatique : +2°C - RUE150 = 90mm



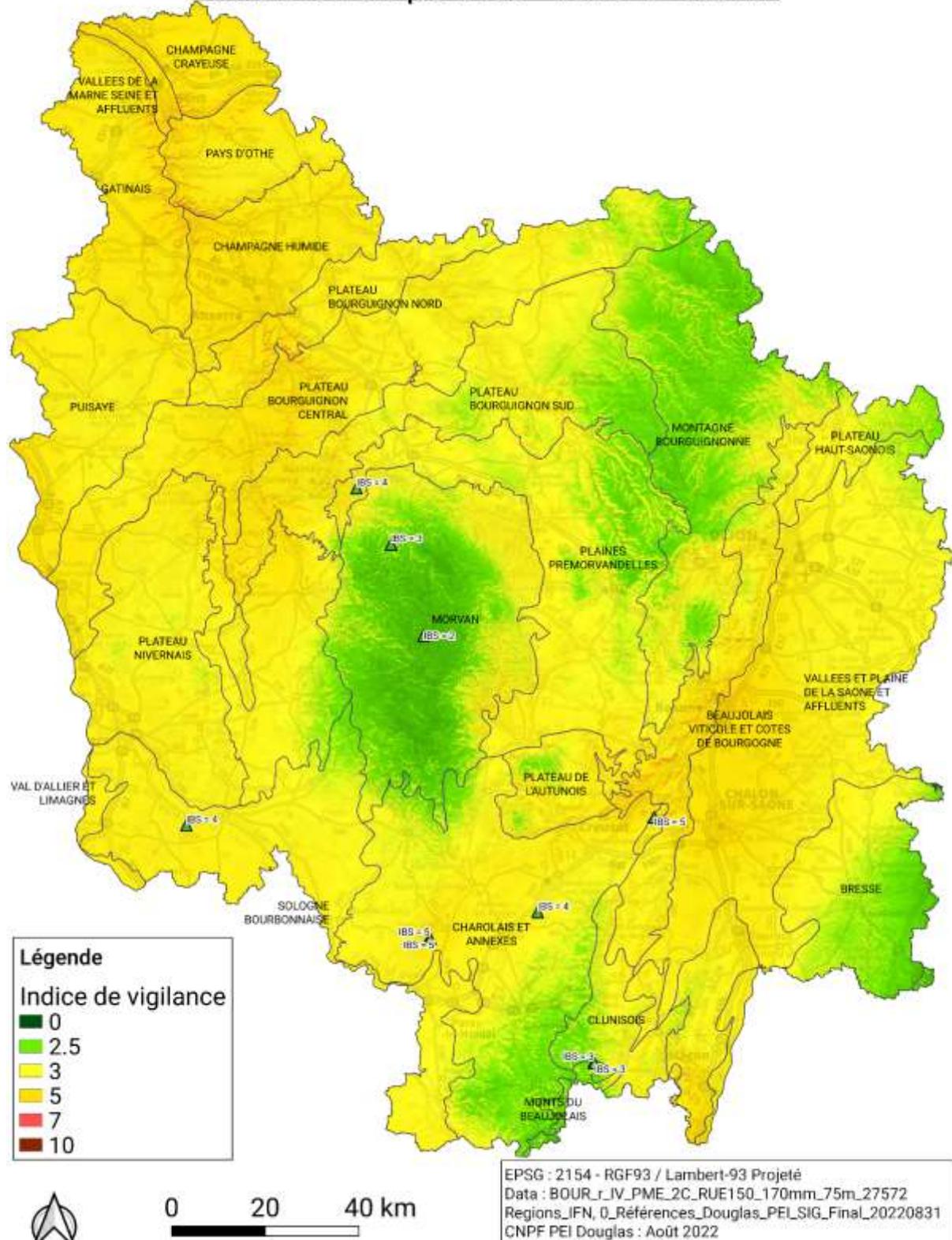
9 : Carte de vigilance climatique du réseau de placettes douglas dont la RUE150 est inférieure à 110mm

Carte d'indice de vigilance BioClimSol pour le Douglas en Bourgogne
Placettes dont la RUE est comprise entre 110mm et 150mm (18 placettes)
Scénario climatique : +2°C - RUE150 = 130mm



10: Carte de vigilance climatique du réseau de placettes douglas dont la RUE150 est comprise entre 110mm et 150mm

Carte d'indice de vigilance BioClimSol pour le Douglas en Bourgogne
Placettes dont la RUE est supérieure à 150mm (10 placettes)
Scénario climatique : +2°C - RUE150 = 170mm



11: Carte de vigilance climatique du réseau de placettes douglas dont la RUE150 est supérieure à 150mm

1.4.2. Diagnostic sanitaire et méthode ARCHI

1.4.2.1. Symptômes

En préalable et étant donné la sensibilité à ces phénomènes, il semble important que chacun se retrouve sur une définition commune afin de bien préciser quelques termes.

Dépérissement : Le terme « dépérissement » est avant tout un terme de symptomatologie. Il traduit « une altération durable de l'aspect extérieur des arbres (mortalité d'organes pérennes, réduction de la qualité et la quantité du feuillage) et une réduction de la croissance. La mort d'un certain nombre de sujets est observée mais l'issue n'est pas obligatoirement fatale même si la situation est préoccupante » (Delatour, 1990). Il s'agit d'un « phénomène complexe évolutif, dans lequel interviennent des facteurs de plusieurs types : prédisposants, déclenchant, aggravants en partie interchangeables » (Sinclair, 1964,1967 ; Manion, 1981).

Arbre dépérissant : arbre dont le houppier a perdu plus de 50 % de ramification (mortalité, chute, réduction) (M. Nageleisen – DSF).

Peuplement dépérissant : Peuplement dont au moins 20% des tiges dominantes et codominantes ont perdu plus de 50% de leur houppier fonctionnel (M. Nageleisen – DSF).

Consécutivement à l'augmentation des températures de ces dernières décennies, le risque sécheresse s'est accru. Tout le monde garde en mémoire l'année 1976 mais en réalité 1989, 90 et 91 sont trois années qui ont beaucoup marqué la croissance et l'état sanitaire des arbres. Les années 2003 et 2005 sont celles qui ont eu également un fort impact sur le douglas dans la mesure où elles ont déclenché de nombreux dépérissements sur le douglas. Depuis 2015 on observe une récurrence des sécheresses et pics de chaleur durant la saison de végétation. Cette période exceptionnelle par l'intensité des stress hydriques, l'intensité et la durée de la période caniculaire et surtout par la conjonction des deux facteurs pour certaines années, a entraîné des problèmes sanitaires sur des peuplements de douglas. Cela a été principalement constaté sur des parcelles où les peuplements étaient situés sur des stations non optimums pour cette espèce.



Figure 12 : Mortalité de douglas en août 2019 - Sailly (71) - (Photo B. Borde)

Des effets physiologiques complexes sur le douglas

Le fonctionnement de l'arbre repose en grande partie sur la circulation interne de l'eau, dont le moteur est l'évapotranspiration au niveau des feuilles. Lorsque la disponibilité en eau diminue, l'arbre est susceptible de réguler son fonctionnement hydrique, avec une efficacité très variable selon les essences et selon les provenances, en fermant les stomates des feuilles, donc en limitant son évapotranspiration et, par conséquent, le prélèvement d'eau dans le sol.

Lorsque le stress hydrique devient plus intense, la conduction de l'eau dans les vaisseaux du bois peut être affectée. La tension entre les racines, incapables d'absorber de l'eau, et les feuilles où la demande est très forte provoque alors des ruptures de la colonne de sève dans les vaisseaux. Les bulles d'air qui se forment empêchent la circulation de la sève brute. Quand le pourcentage de vaisseaux touchés devient trop important, les aiguilles, se dessèchent et tombent, parfois sans jaunissement préalable.

La fermeture des stomates a pour effet secondaire d'interrompre la circulation de gaz carbonique et donc de stopper la photosynthèse, la croissance de l'arbre et sa capacité à accumuler des réserves. Un épisode de stress hydrique est donc toujours un facteur d'affaiblissement de l'arbre.

Symptômes observés sur les placettes du réseau

Au sein des placettes du réseau, de manière disséminée, des douglas présentent un faciès dépérissant à divers stades. Les symptômes visuels d'un état sanitaire dégradé ont été observés. Ils sont souvent attribués aux effets du climat, mais bien souvent exacerbés par la non adaptation du douglas à la station dans laquelle il se trouve (faible altitude, faible réserve en eau du sol, bilan hydrique défavorable, exposition trop ensoleillée ...)

Déficit foliaire : afin de lutter contre le manque d'eau et limiter la surface d'échange, les végétaux réduisent le nombre de leurs feuilles. Le déficit foliaire est caractérisé par des houppiers mités et clairsemés, avec quelques mortalités de branches. Le déficit foliaire est une estimation de la perte en feuillage des arbres (notée de 0 à 100%). Cet indicateur intègre tous les aléas pouvant affecter les arbres. Le suivi du déficit foliaire représente un outil intéressant pour évaluer l'état de santé des arbres et la dynamique en réponse aux stress environnementaux jusqu'à un dépérissement éventuel. Différents facteurs sont à l'origine des pertes foliaires, mais les principaux expliquant les variations de déficit foliaire d'une année à l'autre pour le douglas sont liés à l'alimentation des arbres en eau. Généralement ce sont les années suivant des sécheresses pour lesquelles on observe une augmentation du déficit foliaire. En moyenne, on observe une croissance moindre en diamètre chez les arbres présentant un déficit foliaire plus élevé. Par rapport à des arbres parfaitement sains, cette diminution est visible dès les premiers stades de déficit foliaire et elle s'accroît en proportion des pertes de feuillage. Les observations réalisées montrent qu'une part importante des peuplements de douglas affectés aujourd'hui survivra et récupérera, même parmi ceux présentant des symptômes très alarmants. Le déficit foliaire est un élément important dans la réalisation du diagnostic ARCHI présentée dans le chapitre suivant.



Rougisement partiel ou total du houppier. Ce rougisement foliaire est souvent très important voire total, corrélé parfois avec des aiguilles encore vertes mais de couleur terne, en cours de dessiccation.

Les potentialités de récupération sont souvent très faibles chez les résineux (y compris dans les peuplements adultes en cas de rougissement total des aiguilles).



Figure 13 : Différents stades de dépérissement du douglas – St Aubin en Charollais (71) - (Photo B. Borde)

Mortalités totale de l'arbre. La trajectoire de croissance précédant la mort de l'arbre est difficile à analyser (réduction brutale ou perte de vitalité progressive), les individus morts sont souvent disséminés au sein du peuplement sans lien apparent eu égard au statut de l'arbre (dominant ou codominant).

Fente corticale avec coulure de résine. Ces microfissures avec des écoulements de résine parfois massifs ont été souvent observées avec un aubier sec en-dessous, on peut attribuer certainement ce phénomène à une dessiccation locale du bois causé par un stress hydrique important.



Coulure de résine et fente corticale – Dompierre les Ormes (71) - (Photo R. Lacheze)

Nécrose cambiale

Différentes hypothèses ont été émises quant aux facteurs d'apparition des nécroses cambiales : le climat (sécheresse, canicule, tempête), la station, la sylviculture... Les symptômes suggèrent que les causes sont plutôt abiotiques. Une étude du CRPF Bourgogne et du DSF réalisée en 2011 a montré que certains facteurs comme la pluviométrie ou l'altitude pourraient influencer la présence des nécroses cambiales en bande.

Figure 14 : Nécrose cambiale récente (photo de gauche) et plus ancienne (photo de droite) (Photo B. Borde)



Perte de croissance

Le premier effet d'un manque d'eau est un stress hydrique qui se manifeste par une réduction de la croissance cellulaire et conduit à un ralentissement de la pousse des rameaux et des racines fines. En effet, les stomates se ferment pour limiter la transpiration, ce qui bloque les échanges avec l'atmosphère et donc l'absorption de CO₂, la photosynthèse et par suite la croissance. Entre 2008 et 2011, dans le cadre du programme de recherche Dryade sur la vulnérabilité des douglas face aux aléas, l'Inrae de Nancy (Anne-Sophie Sergent, Nathalie Bréda) a mené, avec l'appui du CRPF Bourgogne, une étude écologique et rétrospective de la croissance radiale du douglas. L'objectif était d'identifier l'aléa déclenchant et les facteurs stationnels et sylvicoles de vulnérabilité associés. Plus de 900 arbres ont été carottés et les bilans hydriques de 60 parcelles ont été calculés. L'analyse rétrospective de la croissance radiale sur cette période montre qu'une réduction importante a été observée l'année la plus sèche c'est à dire en 2003 : - 30 % en moyenne en Bourgogne. De 2003 à 2006, la croissance radiale a également été significativement réduite de 16,8 % en moyenne en Bourgogne. Cette période est caractérisée par deux sécheresses successives en Bourgogne (2003 et 2005). Ensuite, une période de récupération a été observée en 2007 et 2008, avec un retour à une croissance normale voire supérieure, pour ces années où la disponibilité en eau dans les sols s'est nettement améliorée. Ce résultat démontre la grande sensibilité

de la croissance du douglas aux variations de bilan hydrique. Il est également intéressant de noter que la réponse de la croissance du douglas à la sécheresse est immédiate et n'entraîne que peu ou pas d'effets différés comme cela est observé chez certaines essences feuillues, notamment le hêtre et les chênes.

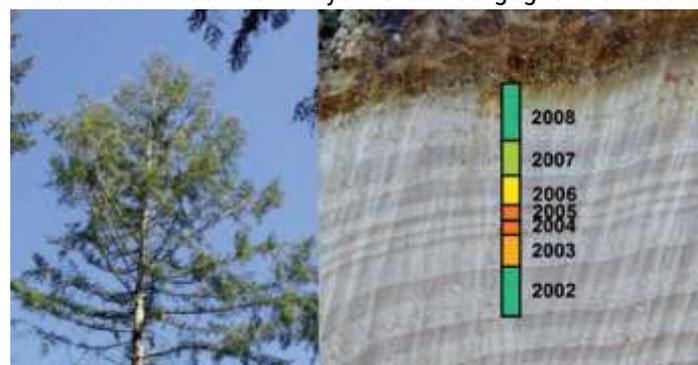


Figure 15 : Déficit foliaire important et réduction de la croissance radiale durant plusieurs années (Photo A.-S. Sergent INRAE)

En résumé, pour la période 2015-2020, en interprétation de ces cas observés de douglas dépérissants sur le réseau et consécutivement aux différents diagnostics réalisés par le DSF (département Santé des Forêts) en Bourgogne durant cette période, les causes semblent très souvent être de nature abiotique et avant tout consécutives à la sécheresse et à la chaleur constante durant la période de végétation, parfois au printemps ou à l'automne et quasi systématiquement l'été ; Elles peuvent être résumées ainsi :

- | des facteurs prédisposants : des stations avec des RU limitées (faible épaisseur de sols, charge en cailloux importante), des altitudes relativement basses comprises entre 200 et 400 m, des sols ponctuellement tassés et parfois des techniques de plantations sans travail du sol préalable.
- | des facteurs déclenchants : sécheresse et chaleur exceptionnelles durant l'été et parfois le printemps et/ou l'automne, avec un stress hydrique important.

Il est difficile d'estimer à partir des dommages visibles aux organes aériens si l'arbre dispose des capacités de survie et de récupération. L'évolution de chaque arbre dépendra fortement de son état sanitaire antérieur et des conditions climatiques et phytosanitaires de la fin de saison de végétation en cours et de celles à venir. Même si les effets différés de ces accidents climatiques sont décelables plusieurs années après, la capacité de réaction individuelle de certains douglas est possible. Il est donc vivement conseillé de prendre des décisions de travaux ou de récolte anticipée qu'après une étude détaillée des conditions phytosanitaires et économiques.

1.4.2.2. Méthode ARCHI

La méthode ARCHI est un outil de diagnostic visuel du dépérissement et des capacités de résilience des arbres. Elle est basée sur une lecture de l'architecture aérienne et caractérise les arbres selon leur état physiologique. Elle permet d'interpréter les symptômes d'un dépérissement, mais n'identifie pas leurs causes.

Cette méthode permet de diagnostiquer le caractère réversible ou irréversible d'un dépérissement. L'intérêt pour le sylviculteur est de distinguer les symptômes parfois passagers (déficit foliaire, coloration anormale, mortalité, etc.) des persistants. Elle permet ainsi de ne pas condamner les arbres stressés avant de connaître leur évolution naturelle. En effet, un déficit foliaire de plus de 50% n'implique pas nécessairement une mortalité chez le douglas (Sergent, 2011 & Cailleret, 2011). On s'attache à observer les symptômes de dégradation du houppier « hors concurrence », ainsi que le potentiel de restauration de l'arbre entier.

1.4.2.3. Données relevées

Les données relevées pour chaque parcelle sont :

- | arbres sains ;
- | arbres résilients ;
- | arbres stressés ;
- | arbres en dépérissement irréversible ;
- | arbres en descente de cime ;
- | arbres morts.

Sur toutes les placettes installées, nous avons relevé pour chaque Douglas un statut ARCHI en suivant la clé de détermination suivante :

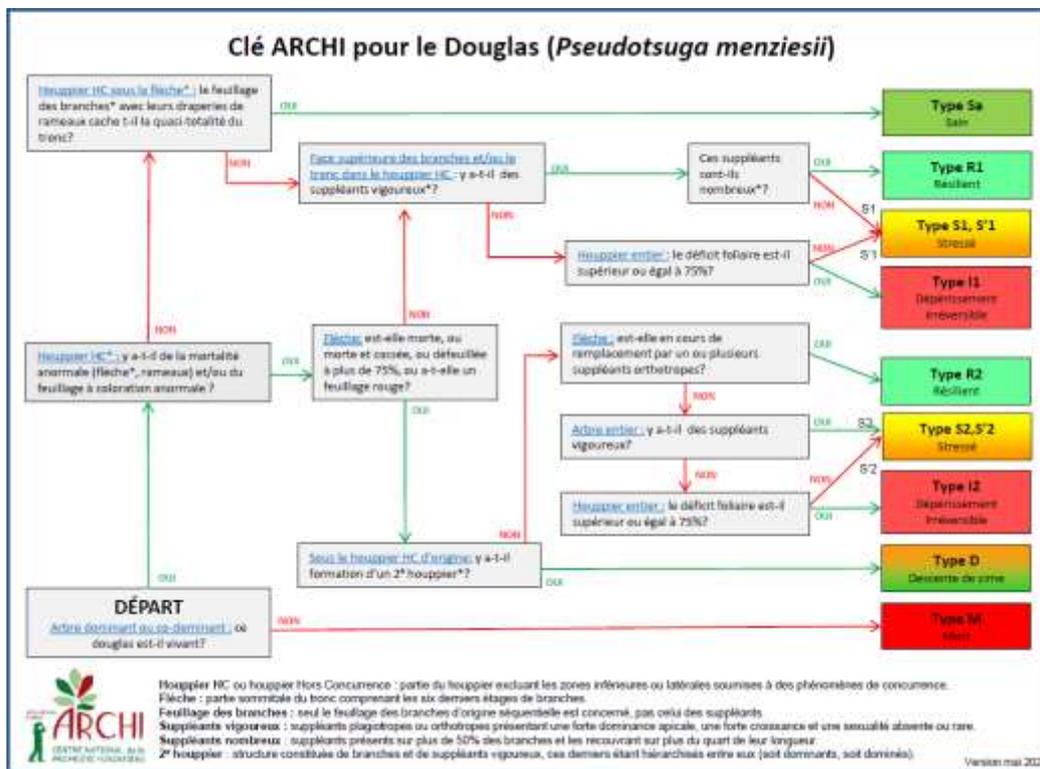


Figure 16 : Peuplement de douglas clairs (Ciry le noble 2021)



Figure 17 : résilience d'un douglas entre 2011 et 2014

1.4.2.4. Synthèse

Ces données nous permettent d'établir une comparaison par itinéraire sylvicole du taux de dépérissement des parcelles (figure ci-dessous). Sur l'ensemble des peuplements observés, on note que le pourcentage moyen de douglas sains est le plus élevé dans les peuplements mélangés douglas-feuillus (67%), suivi des peuplements en futaie irrégulière (58% d'arbres sains) et en cours de régénération (63%). La futaie régulière arrive en dernier avec une moyenne de 49% d'arbres sains.

Cette observation doit toutefois être modérée. En effet, le pourcentage d'arbres sains dépend fortement de la date de dernière éclaircie, où sont souvent prélevés les arbres dont l'état sanitaire est le moins bon. Ceci explique le bon score des peuplements en cours de régénération naturelle, dont la coupe d'ensemencement a souvent prélevé les arbres en moins bon état.

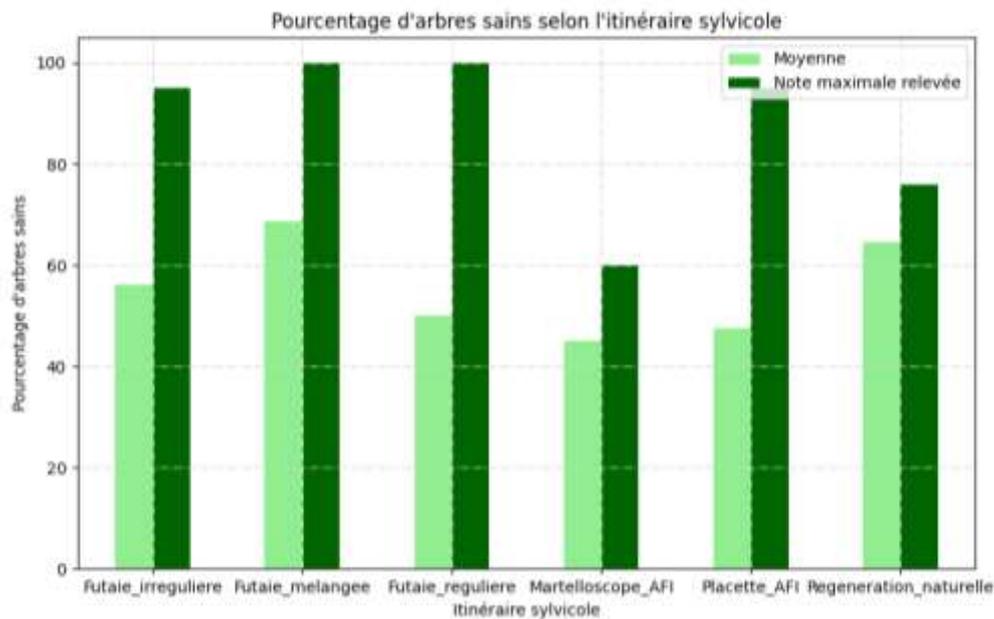
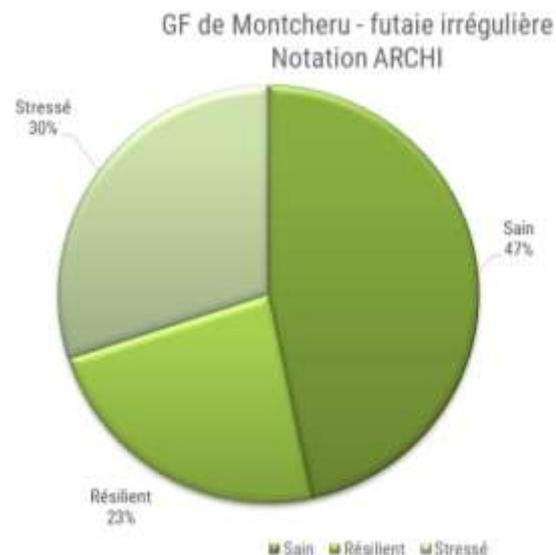


Figure 18 : Diagnostic ARCHI par itinéraire sylvicole

Exemple de présentation des diagnostics ARCHI dans les rapports de placettes :



1.4.3. Mesures indice de Biodiversité Potentiel (IBP)

1.4.3.1. Description

L'Indice de biodiversité potentielle, l'IBP, est un outil permettant aux gestionnaires forestiers d'intégrer aisément la biodiversité taxonomique ordinaire dans leur gestion courante.

Cet indicateur, simple et rapide à relever, permet d'évaluer la capacité d'accueil d'un peuplement forestier pour les êtres vivants (plantes, oiseaux, insectes...), et d'identifier les points d'amélioration possibles lors des interventions sylvicoles.

Sur chacune des placettes du réseau douglas, des relevés d'indice de Biodiversité potentiels ont été systématiquement réalisés.

1.4.3.2. Méthode et protocole

La version 3 du protocole IBP, parue le 10/08/2020 a été utilisée dans le cadre du projet Douglas en Bourgogne. Cette version a été rédigée par Pierre Gonin de l'IDF Toulouse et Laurent Larrieu du CNPF Midi-Pyrénées.

L'IBP est relevé à l'échelle du peuplement forestier, par la méthode du parcours en plein. On parcourt un hectare de peuplement homogène autour de chaque placette du réseau. Les fiches de relevé sont complétées directement sur le terrain au fil des observations. Il s'agit d'une estimation visuelle des caractéristiques du peuplement.

Pour la Bourgogne, nous avons choisi la région biogéographique continentale, bien que l'ouest de la Nièvre puisse être considéré comme atlantique dégradée. Cela afin d'avoir une homogénéité dans les résultats et que des comparaisons entre les résultats obtenus sur l'ensemble du réseau soient possibles.

Nous avons donc utilisé les fiches de relevé « Relevé IBP dans les forêts françaises par parcours en plein ou partiel » pour les « Régions atlantique, continentale et alpine - étages planitiaire, collinéen, montagnard et subalpin + étage montagnard méditerranéen ». Le modèle de fiches de relevé est disponible en annexe.

1.4.3.3. Variables relevées

On relève pour chaque placette les paramètres suivants :

- | l'abondance et la diversité des essences autochtones ;
- | la structure verticale de la végétation ;
- | l'abondance de bois morts sur pied ;
- | l'abondance de bois morts au sol ;
- | l'abondance de très gros bois vivants ;
- | l'abondance et la diversité des dendromicrohabitats ;
- | la superficie des milieux ouverts dans le peuplement ;
- | la continuité temporelle de l'état boisé ;
- | la présence de milieux aquatiques ;
- | la présence de milieux rocheux.

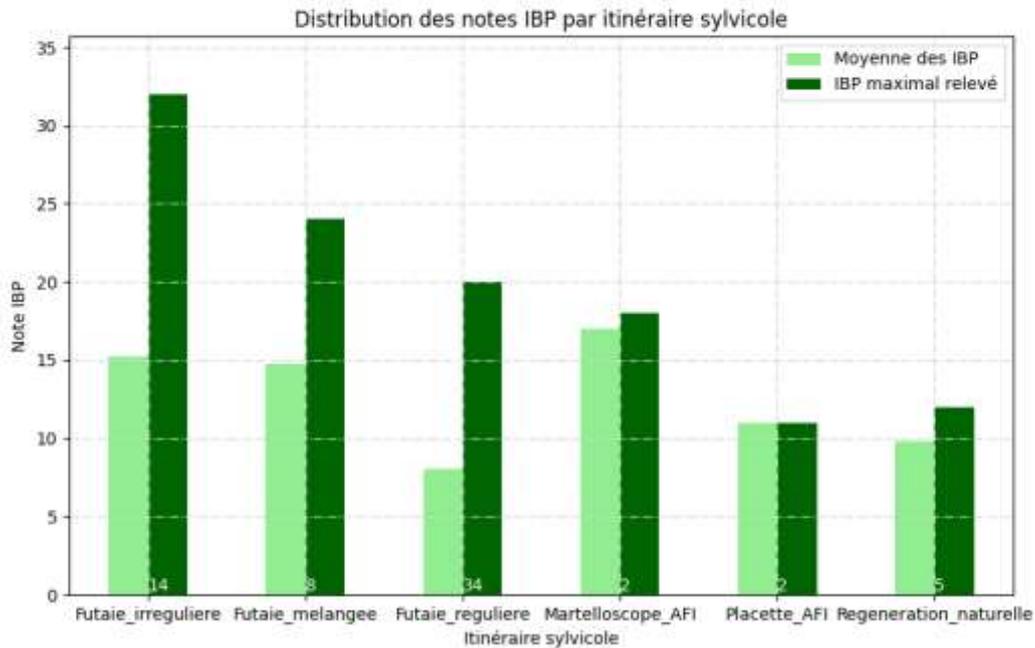


Figure 19 : Note IBP par itinéraire sylvicole

On constate que les meilleures notes IBP se retrouvent en futaie irrégulière et en futaie mélangée (note moyenne de 15) alors que la futaie régulière arrive en bon dernier avec une note IBP moyenne de 8. Ceci s'explique par un étagement moindre de la végétation, des proportions de très gros bois inférieures et l'absence de mélange avec des feuillus.

1.4.4. Mesure de carbone au sol

1.4.4.1. Description

Le choix a été fait de mesurer le stock de carbone au sol dans les parcelles de Douglas du réseau. La biomasse est une donnée facilement mesurable via des relevés de bois mort au sol.

1.4.4.2. Méthode

Le bois mort au sol est inventorié sur chaque placette grâce à la méthode de la « ligne d'intersection » (HARMON et SEXTON, 1996). Deux transects perpendiculaires de 50 m sont établis depuis le centre de la placette. Sur chacun de ceux-ci, chaque pièce de bois mort de plus de 10 cm de diamètre rencontrée est comptabilisée (si le diamètre est inférieur, on considère que le bois fait partie du compartiment « litière » qui n'est pas pris en compte ici). On note le diamètre de chaque pièce de bois mort rencontrée, ainsi que son état de décomposition selon les 3 classes : sain, intermédiaire ou pourri.

Pour déterminer le stade de décomposition, on utilise la « méthode de la machette » comme recommandé par le GIEC (2003). Le volume par hectare de bois mort au sol est ensuite calculé pour chacun des stades de décomposition défini ci-dessus grâce à la formule suivante :

$$\text{Volume (m}^3/\text{ha)} = \Pi^2 * \frac{(d_1^2 + d_2^2 + \dots + d_n^2)}{8L}$$

Où :

- | d_i est le diamètre de la pièce de bois mort i ;
- | n est le nombre total de pièces de bois mort rencontrées au sol sur le transect ;
- | L est la longueur du transect (ici deux fois 50 m soit 100 m).

Le volume de bois mort à l'hectare est ensuite converti en biomasse par hectare selon la densité de chacune des classes de décomposition, puis en tonne de carbone par hectare.

1.4.4.3. Variables relevées

On utilise une fiche de relevés informatisée sous la forme d'un tableur Excel embarqué sur tablette (exemple ci-dessous). Chaque bois mort rencontré sur les transects est noté ainsi que son diamètre et son stade de décomposition.

D (cm)	Sain	Intermédiaire	Pourri	Remarques
13,00			01	
18,00		01		
10,00			01	
12,00			01	
14,00		01		
10,00			01	
9,00			01	

On utilise ensuite ces données pour calculer le stock de biomasse. L'analyse des données par itinéraire sylvicole est présentée par l'IDF dans la *partie 2.3. Impact de la sylviculture sur le bilan carbone et la biodiversité générale.*

1.5. Caractéristiques du réseau par itinéraires

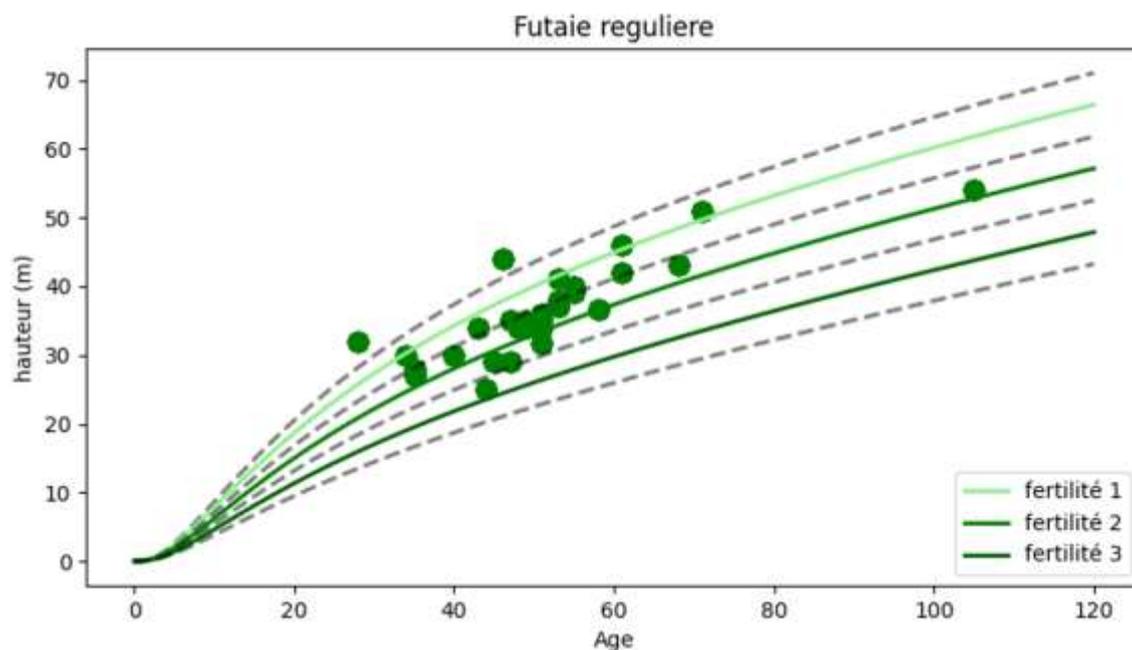
1.5.1. Futaie régulière



Figure 20 : Placette de référence en futaie régulière – La Celle en Morvan (Photo B. Borde)

Les peuplements de Douglas en Bourgogne sont très largement constitués de futaies régulières qui sont issus de plantation équiennne. L'objectif initial est une coupe définitive à environ 50 ans et un renouvellement par plantation, parfois par régénération naturelle. Les éclaircies, au nombre de 3 à 4, se font le plus souvent au profit de tiges dominantes. Il s'agit de la sylviculture traditionnelle du douglas depuis les plantations FFN et celle que l'on trouve encore le plus en Bourgogne.

35 peuplements réguliers ont été retenus pour l'installation d'une placette de suivi. L'âge de ces peuplements variant de 30 ans à plus de 100 ans. Le choix des sites a tenu compte de la diversité des contextes écologiques (climat, conditions stationnelles) des principales aires de production actuelles du douglas en Bourgogne et correspondant aux trois classes de fertilité pour cette essence.



Classe de fertilité (Guide ONF Douglas) permettant de déterminer des objectifs sylvicoles de production

Le choix des dispositifs s'est également attaché à illustrer la diversité des itinéraires de gestion appliqués à ces peuplements réguliers et notamment dans le cadre d'un itinéraire intensif avec un cycle court et un itinéraire avec allongement de la durée de production dans le cadre d'un cycle long :

| Futaie régulière à rotation moyenne (40 à 50 ans)

La gestion en cycle court avec une récolte précoce avant 50 ans est un itinéraire de futaie régulière plus intensif supposé être une stratégie d'adaptation pour réduire la vulnérabilité des peuplements en limitant le temps d'exposition aux risques, notamment les attaques d'insectes et les maladies. Ces récoltes précoces peuvent cependant entraîner une diminution de la fertilité du sol notamment avant l'âge de 60 ans (Ranger et al., 2002). La récolte précoce permet également d'accélérer la mise en place de peuplement et d'espèces d'arbre mieux adaptés.

| Futaie régulière à cycle long (50 à 80 ans)

Le concept de cycle long en futaie régulière a été développé dans l'objectif d'allonger le cycle de production du douglas et d'adapter la gestion de ces peuplements adultes. L'intérêt réside dans le bénéfice de profiter d'une importante production de bois d'œuvre après 50 ans, diminuant ainsi le risque de trou de production mais aussi dans le renouvellement naturel progressif limitant l'impact des coupes rases et répondant aux attentes sociétales et environnementales fortes. Ainsi, le cycle de production est allongé jusqu'à 70 ans et plus avec production de gros et très gros bois, surtout si le peuplement est productif et élagué. Le renouvellement est assuré progressivement par la régénération naturelle. Les coupes d'amélioration sont de faible intensité (15 à 20 % du volume) pour ne pas déstabiliser le peuplement. La rotation est assez courte (4 à 6 ans) pour prélever l'accroissement ou décapitaliser progressivement le peuplement si nécessaire. Ces éclaircies supplémentaires sont réalisées par le haut avec un objectif qui combine récolte, amélioration et régénération.

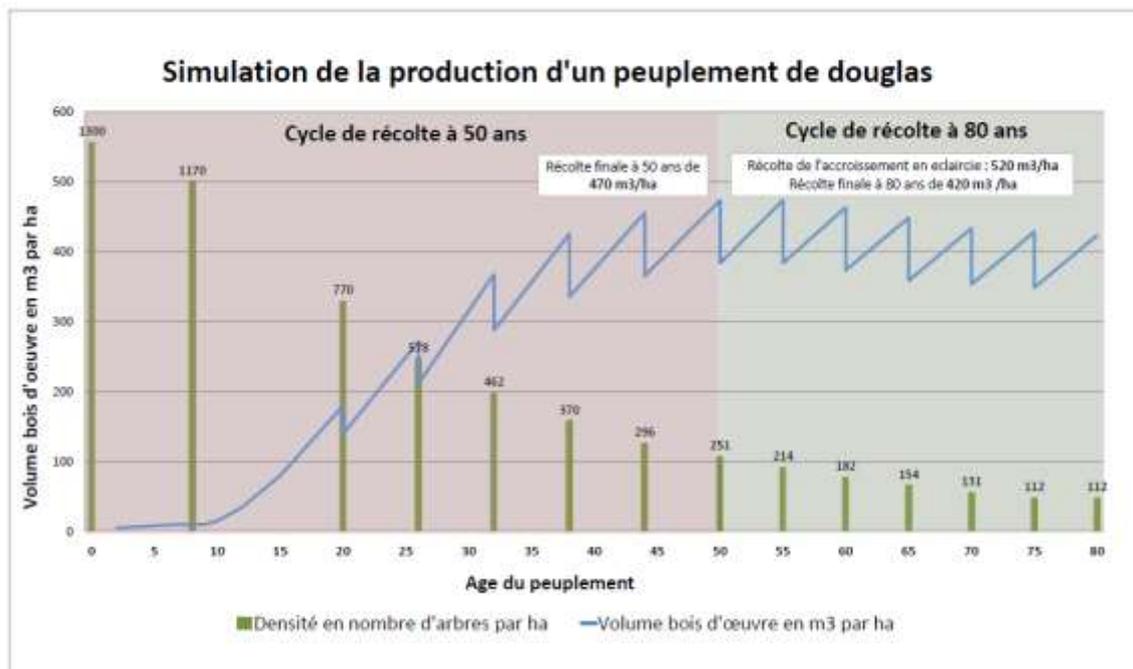


Figure 21 : Schématisation de la futaie régulière de douglas en cycle court et cycle long (B. Borde)

1.5.1.1. Localisation des sites



Réseau Régional Douglas et changement climatique Futaie Régulière



Légende

● Futaie régulière

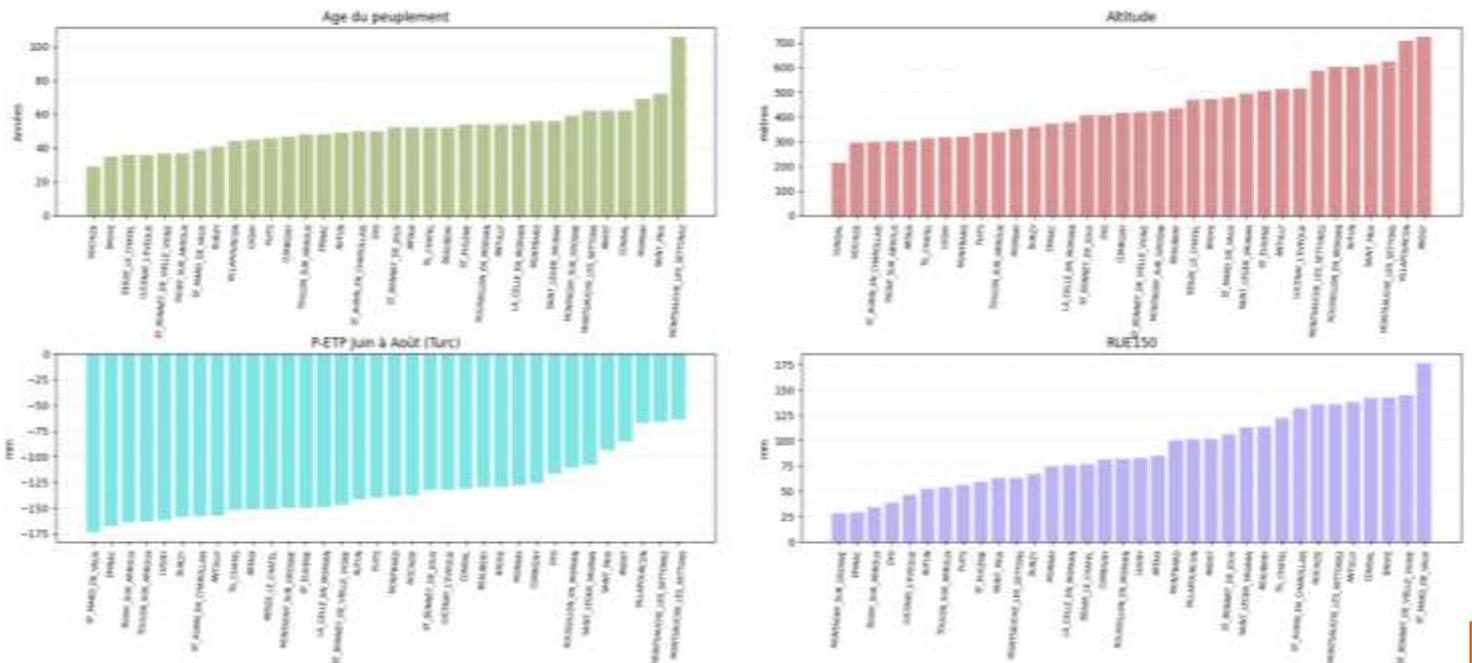


EPSG : 2154 - RGF93 / Lambert-93 Projcté
Data : Rezier Alt, Bourgogne, 2154 & Ombrage
SCAN100 Métropole LAM93 10-2021
0 Références_Douglas_PFI_20220422
CNPF PFI Douglas : Septembre 2022.

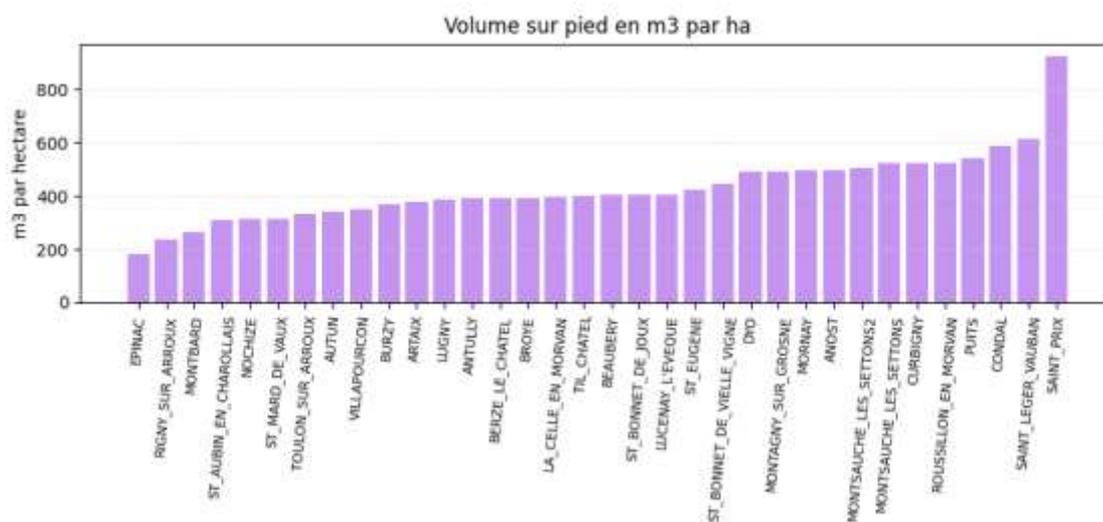
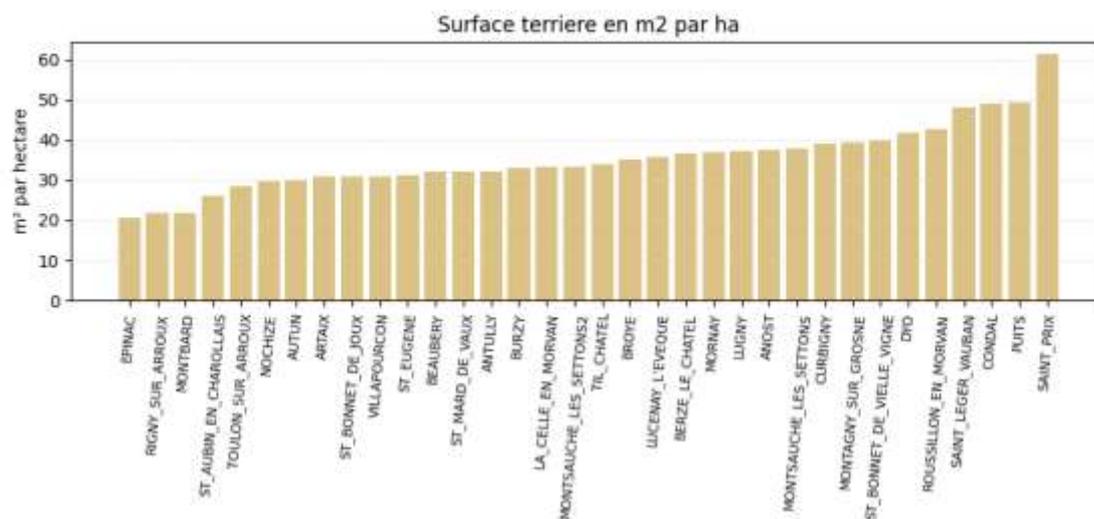
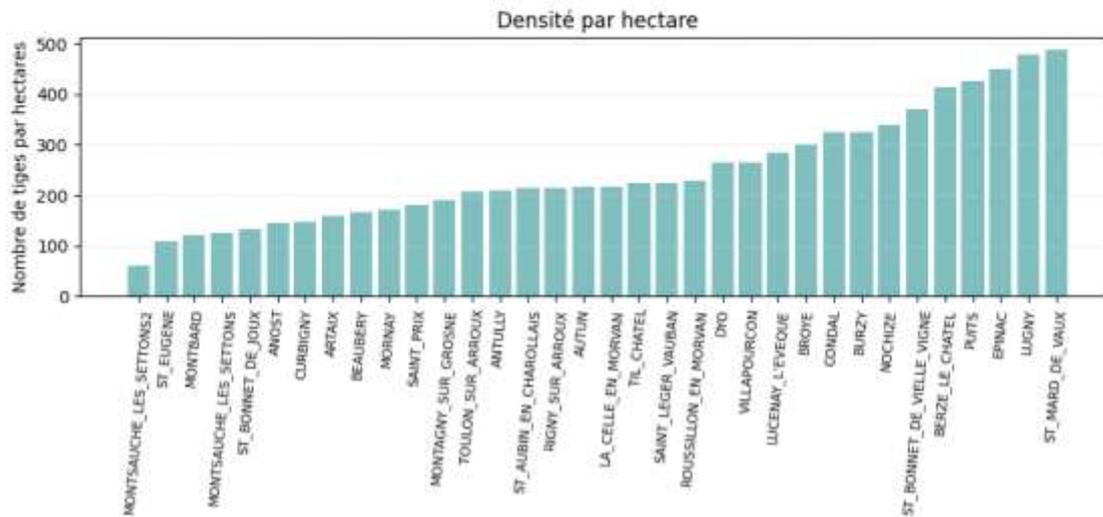
1.5.1.2. Données dendrométriques climatiques et environnementales

Communes	Année de plantation	Classe fertilité	Densité /ha	Surface terrière (m ² /ha)	Volume m ³ /ha	Note IBP	IBS Douglas 0°C	IBS Douglas +1°C	IBS Douglas +2°C	RU150 (mm)	Texture H1	Altitude (m)	Exposition °	P-ETP 06-08 (mm)	ARCHI sain (%)	ARCHI stressé (%)	ARCHI résilient (%)	ARCHI irréversible (%)	ARCHI Descente cime (%)	ARCHI mort (%)	Mesure fin
MORNAY	1953	2	172	37	494	6	3	3	4	74	Lm	351	49	-128	35	45	20	0	0	0	2017
SAINTE PRIX	1950	1	181	61,4	924	10	2	2	3	63	LIS	611	240	-94	85	15	0	0	0	0	2019
MONTAGNY SUR GROSNE	1963	2	190	39,3	492	5	3	4	4	28	LS	422	Aucune	-150	0	65	35	0	0	0	2020
ANOST	1960	1	146	37,4	496	12	2	2	3	102	LS	725	180	-86	75	25	0	0	0	0	2019
LA CELLE EN MORVAN	1968	2	217	33,3	394	5	3	4	5	76	LS	378	45	-149	83	17	0	0	0	0	2021
ROUSSILLON EN MORVAN	1968	1	230	42,6	524	6	3	3	4	82	LS	602	180	-111	90	10	0	0	0	0	2019
EPINAC	1974	3	450	20,6	183	4	4	5	6	29	LIS	374	130	-168	10	45	40	0	0	0	2020
ARTAIX	1970	2	160	30,8	377	6	3	3	4	85	AS	304	0	-151	15	65	20	0	0	0	2020
AUTUN	1973	2	216	30	341	5	3	4	5	52	LS	603	30	-142	65	25	10	0	0	0	2020
ST AUBIN EN MORVAN	1972	2	215	26	308	6	3	3	4	132	LmS	297	Aucune	-158	22,2	50	27,8	0	0	0	2020
ST BONNET DE JOLIX	1970	2	132	31	405	15	2	3	3	106	LLs	408	270	-133	70	14	16	0	0	0	2020
DYO	1972	2	265	41,8	490	6	3	3	4	39	LIS	408	274	-117	35	45	20	0	0	0	2020
BURZY	1981	2	325	33,1	367	6	3	4	5	67	LmS	359	81	-159	40	25	25	5	0	5	2019
NOCHIZE	1993	1	340	29,8	314	6	2	3	4	136	LA	296	Aucune	-138	35	45	15	0	0	5	2019
LUGNY	1977	3	478	37,2	385	8	3	3	4	83	LmS	317	Aucune	-162	45	15	25	0	5	10	2019
ST EUGENE	1968	1	110	31,1	422	12	3	4	5	59	LI	505	162	-150	100	0	0	0	0	0	2020
BEAUBERY	1970	1	167	32	404	5	2	3	3	114	LS	434	210	-130	33	67	0	0	0	0	2020
TOULON SUR ARBOUX	1974	2	208	28,5	331	8	3	4	5	54	LIS	339	18	-163	20	54	26	0	0	0	2020
RIGNY SUR ARROUX	1978	2	215	21,8	238	5	3	4	5	34	LIS	300	Aucune	-164	30	50	10	0	0	10	2020
BERZE LE CHATEL	1986	1	413	36,5	390	7	3	4		77	LmS	470	243	-151	75	10	15	0	0	0	2019
ST MARD DE VAUX	1983	2	488	32	315	5	3	4	5	177	Lm	477	270	-174	83	17	0	0	0	0	2020
ANTULLY	1968	2	210	32,2	389	5	2	3	4	138	ALS	514	Aucune	-157	36	44	20	0	0	0	2020
ST BONNET DE VIEUX VIGNES	1985	1	370	39,8	445	5	2	3	4	145	LAS	418	Sans	-147	35	45	20	0	0	0	2019
CONDAL	1960	2	325	49	586	8	2	3	3	142	Lm	213	40	-131	34	53	0	13	0	0	2020
LUCENAY L'ÉVÊQUE	1986	2	285	35,8	407	12	3	4	4	46	LS	516	240	-133	79	17	0	0	0	4	2020
CURBIGNY	1969	1	148	39	523	8	3	4	5	81	LIS	415	81	-126	50	35	15	0	0	0	2020
BROYE	1987	1	300	35,2	393	4	3	3	4	143	LmS	472	6,3	-130	50	50	0	0	0	0	2021
MONTBARD	1966	1	120	21,8	265	7	2	3	4	100	LA	319	Aucune	-139	47	53	0	0	0	0	2019
PUITS	1976	2	427	49,2	541	11	10	10	10	56	AL	337	Aucune	-140	46	48	6	0	0	0	2020
TIL CHATEL	1970	2	224	34	400	9	3	3	4	122	LI	313	Aucune	-152	59	32	9	0	0	0	2020
MONTSAUCHE LES SETTONS	1916	2	60	33,3	504	20	2	2	2	136	Lm	586	45	-66	47	53	0	0	0	0	2020
VILLAPOURCON	1978	1	266	31	349	9	2	2	2	102	Lm	707	270	-67	66	24	10	0	0	0	2019
MONTSAUCHE LES SETTONS	1960	1	126	37,7	521	10	2	2	3	63	LmS	626	0	-64	74	26	0	0	0	0	2020
SAINTE LEGER VAUBAN	1966	1	224	48	615	17	2	2	3	113	LS	495	90	-108	32	32	36	0	0	0	2020

Peuplements gérés en futaie Régulière
Contexte stationnel des placettes du Réseau Douglas



Peuplements gérés en Futaie Régulière Description dendrométrique des placettes du Réseau Douglas



1.5.1.3. Analyse et recommandations

Les mesures, suivis et observations réalisés permettront de mieux comprendre les effets de la sylviculture sur la production et la qualité des arbres produits et sur l'évolution de ces peuplements dans un contexte de changement climatique. Les premiers résultats permettent de formuler quelques conseils concernant la gestion en futaie régulière, notamment vis-à-vis des évolutions climatiques à venir.

- | **Dynamiser la sylviculture** en tenant compte de l'âge et de l'état des peuplements. Opérer régulièrement des coupes d'éclaircie et d'amélioration à rotation assez courte (4 à 6 ans) afin de limiter la capitalisation excessive du volume du peuplement et ainsi réduire la compétition entre les arbres pour l'eau et les éléments nutritifs. Sur les peuplements à faible réserve utile, une trop forte concurrence entre les tiges semble avoir généré un stress hydrique plus important en accroissant la compétition pour l'eau et du fait d'une plus forte interception (puis évaporation) des pluies par les houppiers. Les travaux de l'INRAE ont montré le rôle d'une densité excessive des peuplements dans le dépérissement qu'ils ont subi dans les années 80 (BRÉDA, PEIFFER, 1999). La surface foliaire des peuplements conditionne en effet leur bilan hydrique. Un peuplement trop « chargé » consomme plus d'eau, et intercepte plus les pluies (LEGAY, GINISTY, BRÉDA, 2006). Il convient d'en tenir compte en évitant les situations de surdensité, liées à des éclaircies insuffisantes. Adapter le rythme des éclaircies ou leur intensité entraîne également une augmentation de la vigueur du peuplement et réduit la vulnérabilité aux attaques biotiques (Wargo et Harrington, 1991 ; Gottschalk, 1995). Enfin, l'éclaircie permet d'augmenter l'apport en rayonnement, la disponibilité en eau et en nutriments pour les arbres restants (Smith et al. 1997 ; Papadopol, 2000). Ces éléments plaident pour des éclaircies modérées mais régulières (rotation de 4 à 6 ans selon la station et le développement des arbres). Attention cependant aux interventions trop brutales dans un peuplement âgé qui peuvent occasionner un stress. Il est toujours préférable de diminuer la rotation des coupes que d'augmenter trop fortement les taux de prélèvement.
- | **Adapter le capital du peuplement** (volume, surface terrière, densité) à la Réserve Utile moyenne du peuplement.
- | **Adapter le martelage des coupes**
 - en identifiant et récoltant les arbres en mauvais état sanitaire, malades ou affaiblis sans toutefois être systématique (méthode ARCHI) ;
 - en identifiant les arbres les plus résistants et les plus résilients et en travaillant à leurs profits ;
 - en réalisant des éclaircies par le haut et en prélevant prioritairement les gros bois, notamment de faible qualité, qui sont les plus gros consommateurs en eau.
- | **Favoriser la régénération naturelle** en fin de cycle de production. A l'état juvénile, les semis de douglas sont tolérants à l'ombrage et la conduite d'un peuplement en futaie claire va en général permettre à ceux-ci de profiter des apports de lumière réalisés au gré des éclaircies.
- | **Récolter les peuplements dépérissants** dans un délai assez court et ne pas renouveler en plein avec du douglas, favoriser la mélange ou introduire une ou plusieurs essences de substitution au douglas.
- | **Réaliser une approche stationnelle** plus précise, notamment au niveau de l'évaluation de la réserve utile maximale du sol et du niveau trophique (humus, pH, flore ...). En effet, si les

aspects hydriques sont essentiels, il a été montré, suite aux dépérissements de douglas post-2003, en Bourgogne et en Midi-Pyrénées, que la richesse chimique des sols influence la récupération des arbres (thèse A.S. SERGENT - 2011).

- | **Ne prendre des décisions de récolte anticipée de peuplements qu'après** une étude détaillée des conditions phytosanitaires et économiques.

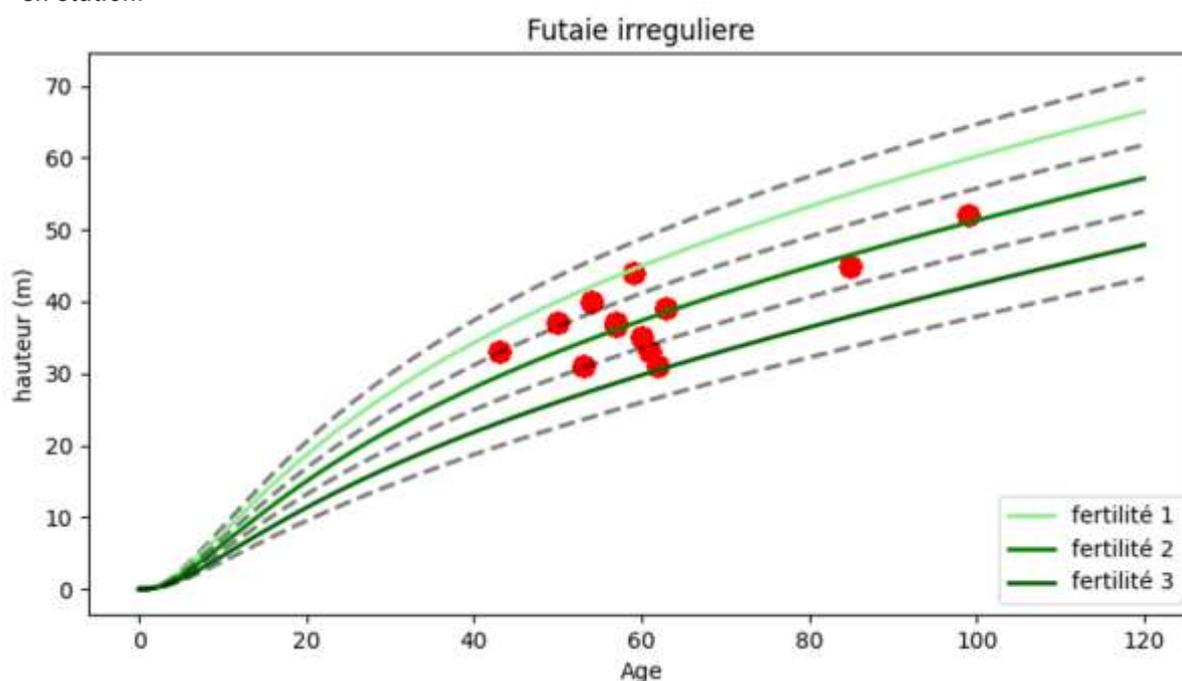
1.5.2. Traitement irrégulier



Figure 22 : Placette de référence en peuplement irrégulier - Roussillon en Morvan (71) - (Photo B. Borde)

Cet itinéraire qui consiste à valoriser les meilleures tiges d'un peuplement quelles que soient leurs dimensions et à le renouveler sans pratiquer de coupe rase, ne concerne pour l'instant qu'une minorité de peuplement de douglas. Les résultats sont parfois probants, cet itinéraire demande une certaine technicité dans la gestion et l'exploitation. Il peut s'appliquer plus facilement à des peuplements déjà plus ou moins irréguliers (ou hétérogènes) à la suite d'interventions volontaires (conversion en futaie irrégulière), de conditions naturelles diversifiées (variations stationnelles...) ou d'accidents (tempêtes...).

14 peuplements ont été retenus pour installer ou remesurer un dispositif déjà présent. Le choix des sites a tenu compte de la diversité des contextes écologiques (climat, conditions stationnelles) avec des stations optimales pour le douglas (classe de fertilité 1) mais aussi des stations peu adaptées (classe de fertilité 3). En effet cet itinéraire est potentiellement intéressant et adapté pour faire évoluer des peuplements inadaptés vers un mélange avec d'autres essences déjà présentes et mieux en station.



Classe de fertilité (Guide ONF Douglas) permettant de déterminer des objectifs sylvicoles de production

1.5.2.1. Localisation des sites



Réseau Régional Douglas et changement climatique Futaie Irrégulière



Légende

● Futaie irrégulière



EPSG : 2154 - RGF93 / Lambert-93 Projété
Data : Raster MNI Bourgogne_2154 & Ombrage
SCAN100 Métropole LAMB93 10-2021
0_Références_Douglas_PEI_20220422
CNPF PEI Douglas : Septembre 2022

1.5.2.2. Données dendrométriques climatiques et environnementales

Communes	Année de plantation	Classe fertilité	Densité /ha	Surface terrière (m²/ha)	Volume m³/ha	Note IBP	IBS Douglas 0°C	IBS Douglas +1°C	IBS Douglas +2°C	RU150 (mm)	Texture H1	Altitude (m)	Exposition °	P-ETP 06-08 (mm)	ARCHI sain (%)	ARCHI stressé (%)	ARCHI résilient (%)	ARCHI irréversible (%)	ARCHI Descente cime (%)	ARCHI mort (%)	Mesure fin
SAINT FIRMIN	1964	2	116	27,5	331	19	3	4	5	108	LmS	486	Aucune	-167	30	60	10	0	0	0	2020
MARTIGNY-LE-COMTE	1971	2	157	22,5	268	11	3	3	4	107	Lm	391	100	-156	0	62	20	8	0	0	2020
MORNAY	1964	2	101	24	320	18	2	3	4	119	LA	353	288	-134	10	55	35	0	0	0	2017
GIBLES	1936	2	189	42,1	573	16	2	3	3	62	SL	425	340	-120	60	20	20	0	0	0	2017
DOMPIERRE LES ORMES	1962	1	192	38,5	483	9	2	2	3	152	LmS	406	30	-91	95	5	0	0	0	0	2020
OZOLLES	1978	1	381	31,8	336	6	2	3	3	93	LAS	394	230	-119	75	25	0	0	0	0	2020
ROUSSILLON EN MORVAN	1922	1	112	48	706	15	2	2	3	65	LI	666	0	-76	84	13	3	0	0	0	2019
THOSTE	1968	3	263	38,1	448	10	3	3	4	78	LI	350	250	-139	65	35	0	0	0	0	2020
MISSERY	1959	3	107	23,3	294	13	10	10	10	56	LA	533	270	-133	14	67	0	19	0	0	2020
ST FRANCHY	1967	2	300	26,8	311	32	3	3	4	110	LmS	348	297	-153	84	9	0	0	0	7	2020
AVRIL SUR LOIRE	1960	2	165	17,8	211	17	3	3	4	177	LA	224	9	-159	87	9	0	0	0	4	2020
VILLAPOURCON	1961	1	93	20,6	265	11	2	2	3	93	LA	748	243	-67	67	15	18	0	0	0	2020
MONTREUILLOIN	1958	2	153	34,5	382	15	2	3	3	140	LmS	387	180	-128	47	30	23	0	0	0	2020
SEMELAY	1967	1	234	26,6	452	21	3	3	4	75	LI	327	90	-134	67	13	17	0	0	3	2019

Peuplements gérés en futaie Irrégulière Contexte stationnel des placettes du Réseau Douglas

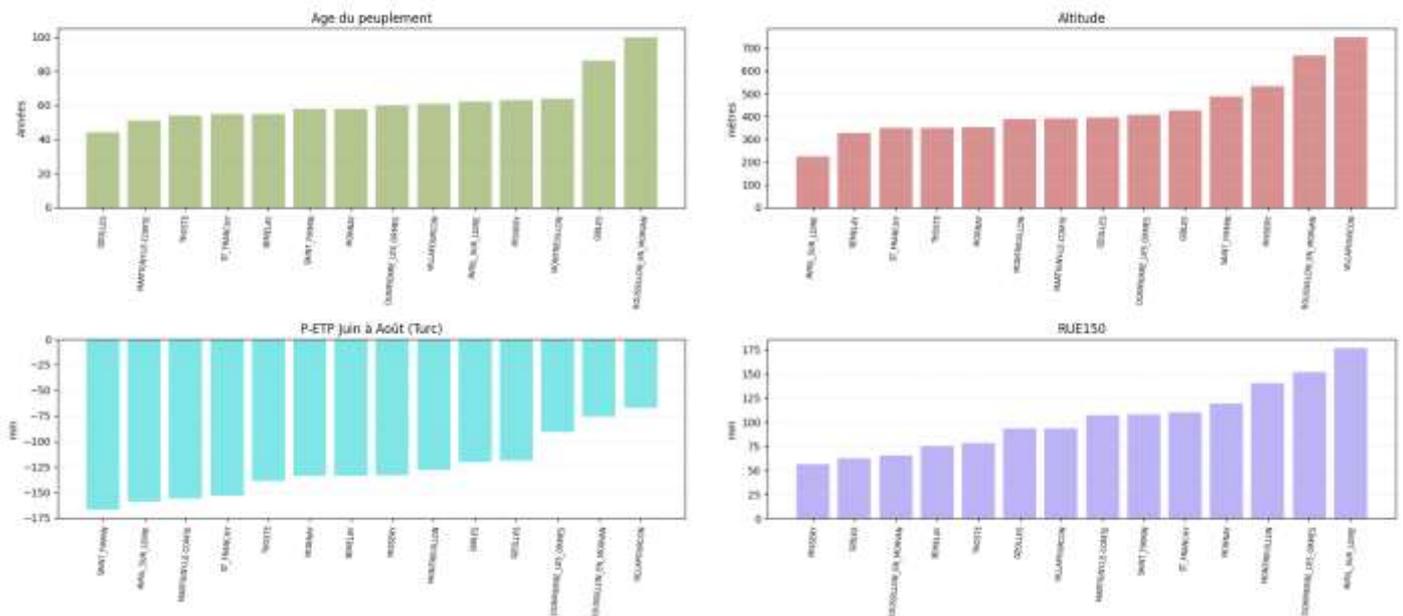
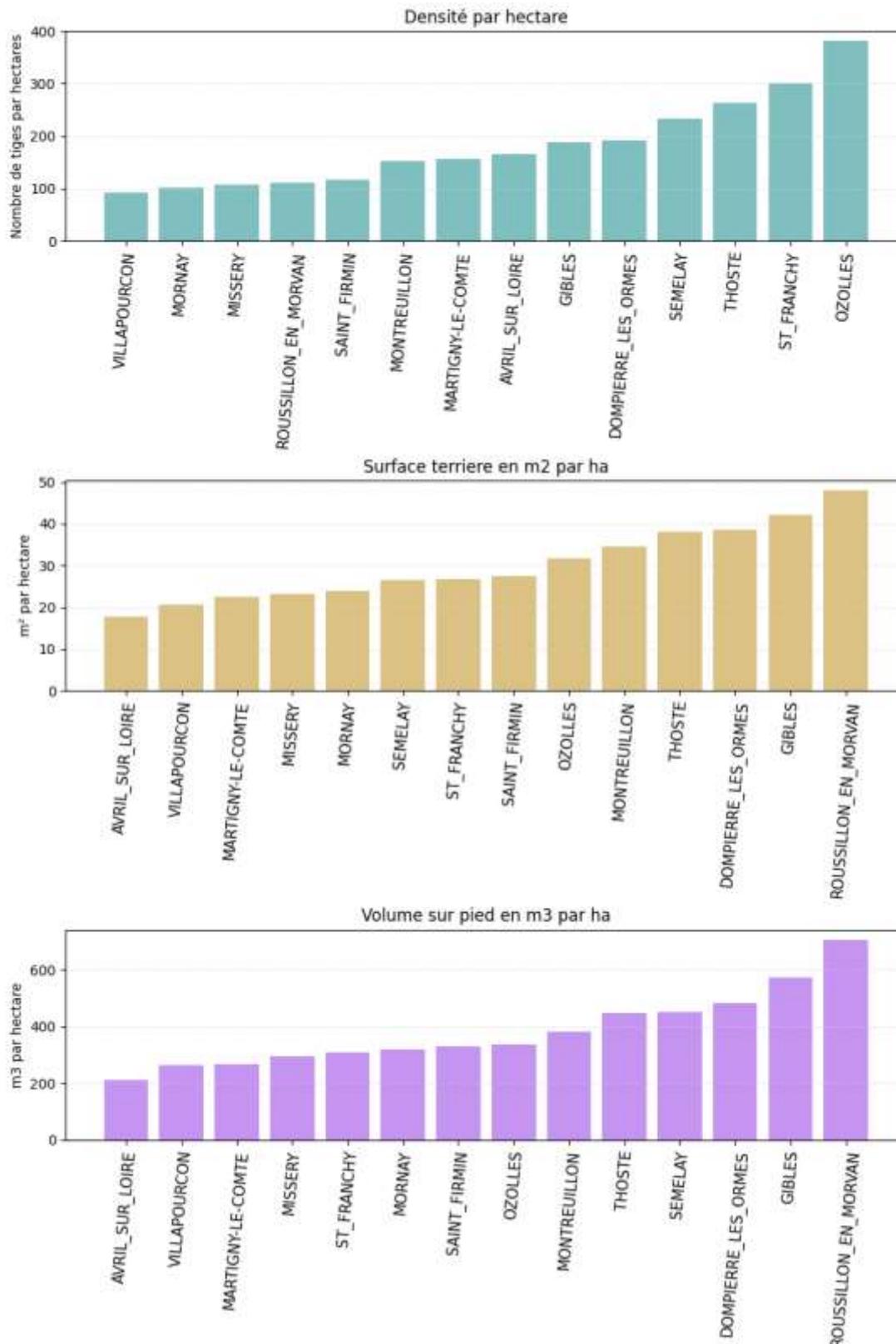


Figure 23 : Placette de référence en peuplement irrégulier



Figure 24 : Placette de référence en peuplement irrégulier - Gibles (71) - (Photo B. Borde)

Peuplements gérés en Futaie Irrégulière Description dendrométrique des placettes du Réseau Douglas



1.5.2.3. Analyse et recommandations

Le réseau constitué de 14 placettes installées dans des peuplements aux caractéristiques assez différentes permettra de visualiser et d'étayer techniquement cet itinéraire dans différentes configurations stationnelles et climatiques. Les suivis futurs permettront de mieux comprendre les clefs dendrométriques de ce traitement, notamment en termes de régénération continue et de passage à la futaie. La question de l'adaptabilité de cet itinéraire dans un contexte de changement climatique semble intéressante, notamment avec des structures verticales étagées qui ont de nombreux atouts car elles permettent notamment :

- | de conserver le microclimat des sous-bois et ainsi faire tampon aux écarts de températures et aux sécheresses du macroclimat ;
- | une meilleure occupation verticale de l'espace aérien et souterrain, en limitant la concurrence pour les ressources en eau et en éléments minéraux ;
- | une meilleure résistance aux tempêtes et, en cas de chablis conséquents, une meilleure reprise de la croissance végétale après tempête. Notons cependant, qu'à partir d'une certaine force, une tempête détruit tout sur son passage, quelle que soit la structure et la composition du peuplement ;
- | de ne jamais avoir le sol nu, les plus grands arbres pouvant protéger la régénération ;
- | permettre dans le temps d'améliorer l'adaptabilité des peuplements à la modification du climat.

Dans le contexte du changement climatique, les forêts irrégulières ont donc l'avantage d'une plus grande résistance aux perturbations, la coupe progressive jardinatoire permet de plus facilement augmenter la diversité des essences et de maintenir un capital plus faible que la futaie régulière. Cependant, dans le contexte de changement climatique, le passage de la futaie régulière à la forêt pérenne devra faire l'objet d'un suivi attentif au cours des prochaines décennies avec notamment les recommandations suivantes :

- | **suivre l'état sanitaire une fois par an** et évaluer le niveau de résilience du peuplement (ARCHI) après un délai lui permettant de s'exprimer (en moyenne 2 à 5 ans) ;
- | **favoriser les tiges résilientes** ou saines de qualité lors des éclaircies ;
- | **favoriser le mélange des essences** lors des coupes ;
- | **réaliser des éclaircies douces et fréquentes** et raccourcir le terme d'exploitabilité si nécessaire ;
- | **introduire des essences plus résistantes** aux sécheresses et aux fortes chaleurs, par parquets ou nids.



Figure 25 : Le traitement irrégulier en futaie claire permet le développement d'autres essences – St Firmin (71) - (Photo B. Borde)

1.5.3. Futaie mélangée feuillus-résineux

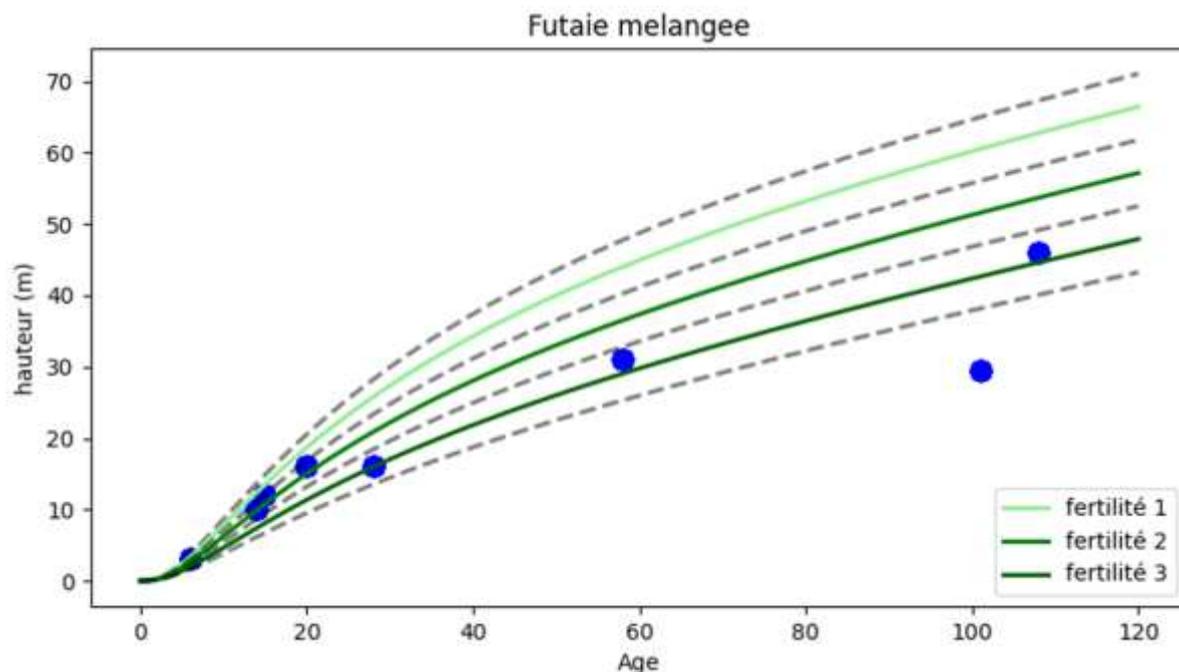


Figure 26 : Placette de référence en peuplement mélangé - St Maurice des Champs (71) - (Photo B. Borde)

On définit par peuplement mélangé tout peuplement dont le couvert d'une essence donnée représente moins de 80 % du recouvrement total. Les mélanges sont définissables d'après leur composition, leur structure verticale et leur distribution spatiale. Le mélange constitue une solution régulièrement conseillée pour faire face notamment au changement climatique ou aux attaques parasitaires ou bien dans les zones socialement sensibles. L'évolution des mélanges n'est cependant pas toujours celle attendue et leur suivi nécessite de fréquentes visites.

Les mélanges réussis avec le douglas sont peu répandus en Bourgogne car il demande une bonne connaissance du comportement respectif des différentes essences et leur possibilité d'association.

Il existe cependant de bons exemples dont il est possible de tirer des enseignements, les peuplements retenus pour constituer le réseau sont âgés pour certains avec des dispositifs originels par bande et des peuplements plus jeunes issus de plantation. Les interactions entre les espèces sont complexes et méritent d'être étudiées à l'échelle locale pour le douglas. Dans cette optique, dix peuplements mélangés ont bénéficié de l'installation d'un dispositif de suivi.



Classe de fertilité (Guide ONF Douglas) permettant de déterminer des objectifs sylvicoles de production

1.5.3.1. Localisation des sites



1.5.3.2. Données dendrométriques climatiques et environnementales

Communes	Année de plantation	Classe fertilité	Densité /ha	Surface terrière (m ² /ha)	Volume m ³ /ha	Note IBP	IBS Douglas 0°C	IBS Douglas +1°C	IBS Douglas +2°C	RU150 (mm)	Texture H1	Altitude (m)	Exposition °	P-ETP 06-08 (mm)	ARCHI sain (%)	ARCHI stressé (%)	ARCHI résilient (%)	ARCHI irréversible (%)	ARCHI Descente cime (%)	ARCHI mort (%)	Mesure fin
BROYE	2001	2	520	14,5	134	10	3	4	5	92	LmS	417	292	-150	83,3	16,7	0	0	0	0	2021
MATOUR	2015	1	850	X	X	6	3	3	4	71	LIS	530	270	-127	100	0	0	0	0	0	2020
ST MAURICE DES CHAMPS	1963	3	220	23	182	12	3	4	5	115	LaS	358	230	-162	25	73	0	2	0	0	2020
SELONGEY	1920	3	754	54	582	22	3	3	4	52	AL	343	120	-149	100	0	0	0	0	0	2020
MARIGNY L'EGLISE	2006	1	215	3,7	19	NA	2	2	3	163	Lm	411	0	-94	92	4	0	4	0	0	2020
MARIGNY L'EGLISE	1913	3	250	43,4	547	18	3	3	4	61	LS	433	270	-108	50	29	7	3	11	0	2020
MONTREUILLO	2007	1	380	5,2	25	13	2	3	4	124	LmS	385	180	-141	83	17	0	0	0	0	2020
MONTSAUCHE LES SETTONS	1993	1	740	23	184	10	2	2	3	101	LmS	625	100	-72	NA	NA	NA	NA	NA	NA	2020
BUSSY EN OTHE	Chênes 1950 Douglas	2	97	18,9	234	9	3	4	5	69	LS	218	230	-166	62	38	0	0	0	0	2020
ISLAND	Douglas 1977	2	191	19,8	224	24	3	3	4	167	LA	240	0	-146	54	26	10	5	3	2	2020

Peuplements gérés en futaie Mélangée Contexte stationnel des placettes du Réseau Douglas

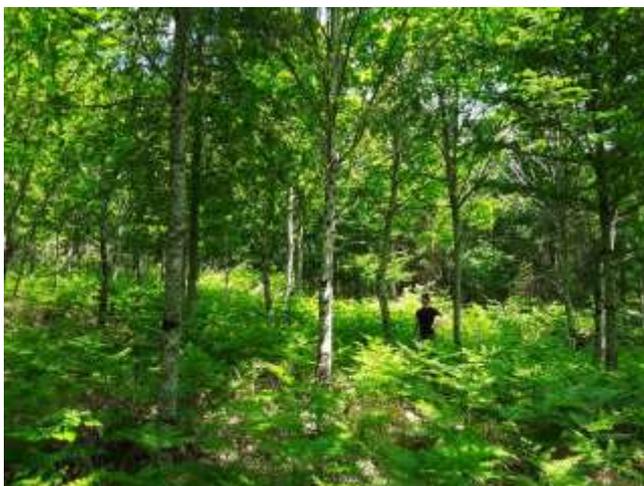
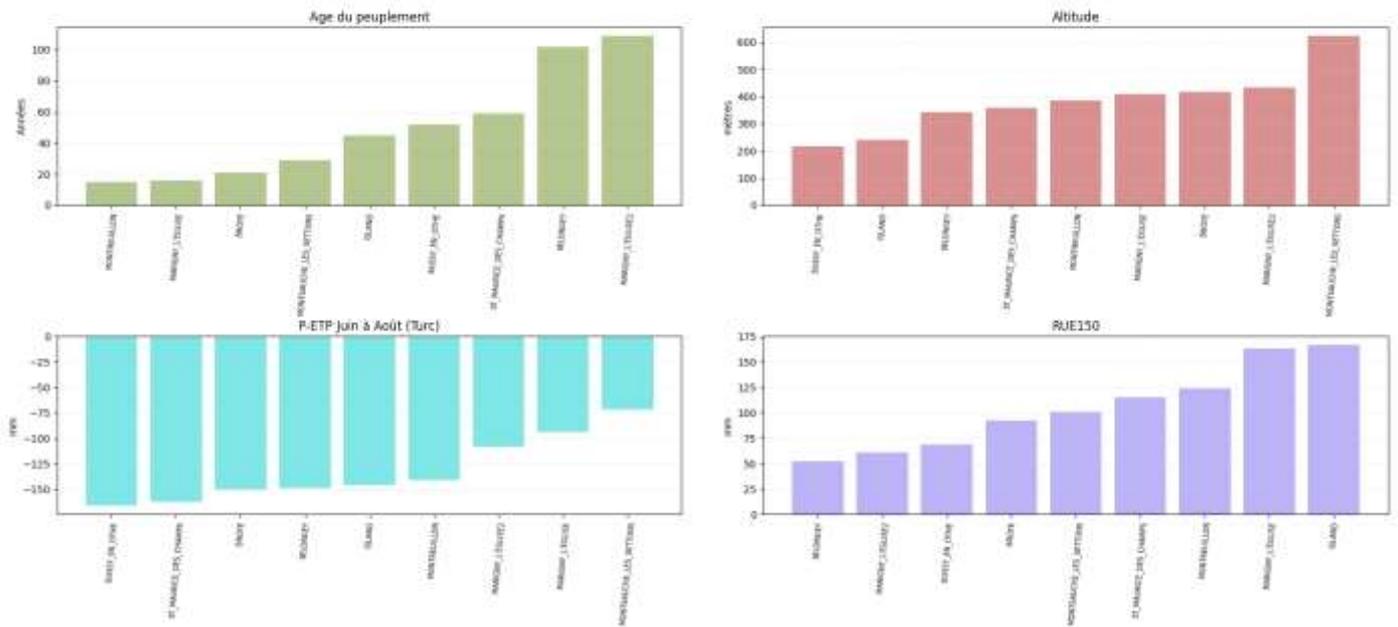
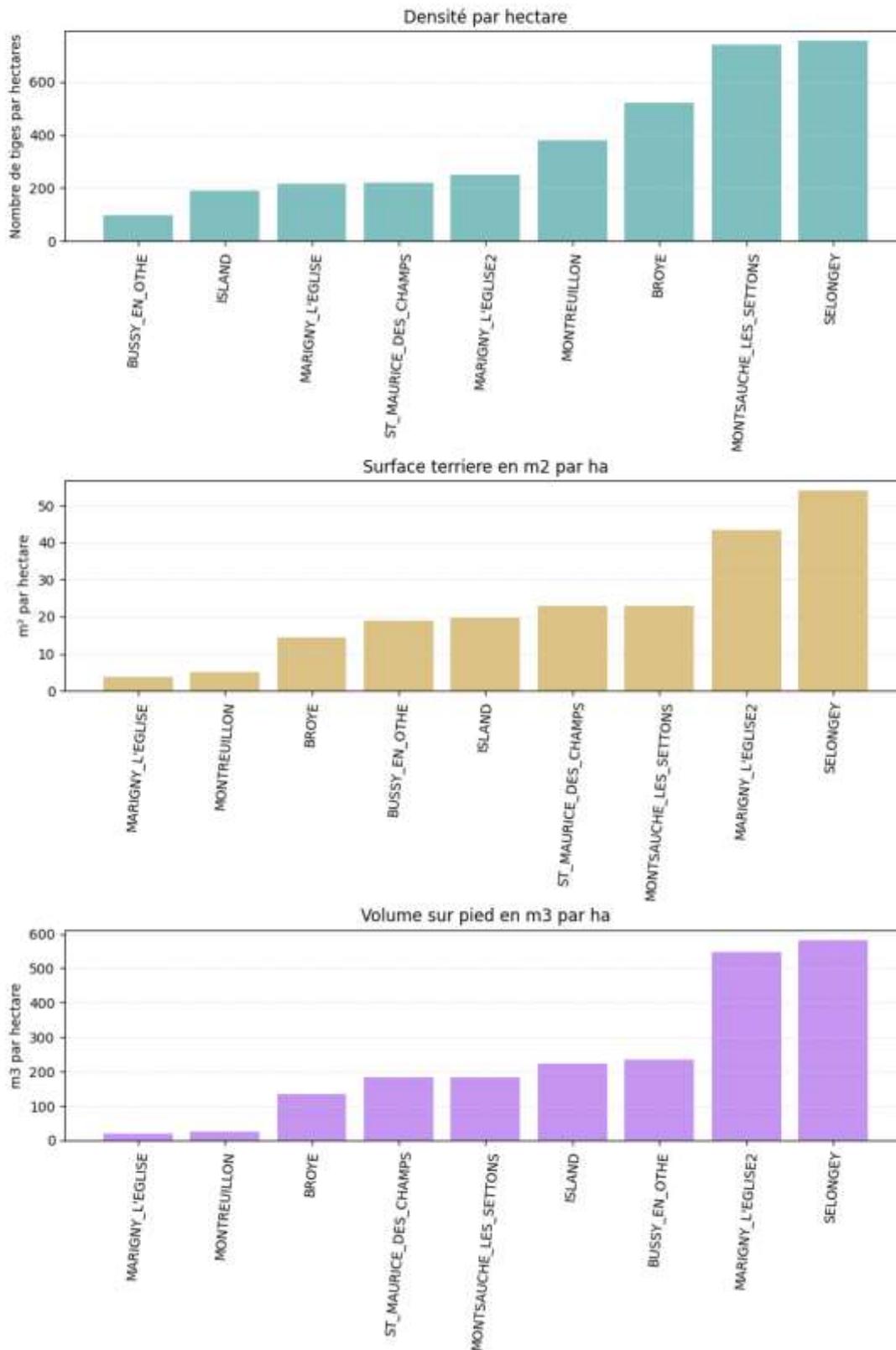


Figure 28 : Placette de référence en peuplement mélangé douglas/châtaignier - Montreuillon (58) - (Photo B. Borde)



Figure 27 : Placette de référence en peuplement mélangé douglas/cèdre - Montsauche (58) - (Photo B. Borde)

Peuplements gérés en Futaie Mélangée Description dendrométrique des placettes du Réseau Douglas



1.5.3.3. Analyse et recommandations

Les mélanges observés au travers de ce réseau montrent que l'association de plusieurs essences poursuit soit un objectif de peuplement final mélangé, soit de peuplement de douglas pur. Le premier cas de figure, le plus intéressant car le plus résilient dans le cadre du changement climatique, implique souvent de devoir favoriser au niveau des travaux puis des éclaircies la ou les essences associées, au détriment de la production du douglas.

La diversité des exigences des essences pour la lumière, l'eau et les éléments minéraux, nécessite de prendre certaines précautions dans les types et les modalités pratiques de l'installation des mélanges mais aussi dans la gestion ultérieure du peuplement. L'association d'essences au tempérament compatible est souvent préférable. En matière de suivi, certaines associations nécessitent une bonne technicité et il est indispensable de connaître les caractéristiques de croissance des différentes essences pour que le mélange choisi aboutisse à une complémentarité optimale. Cela permet de réduire d'autant les interventions humaines (dégagements, tailles de formation, ...) de plus en plus coûteuses au fil des années.

De nombreuses études scientifiques ont démontré que le mélange d'essence peut être favorable à plusieurs niveaux. Certains peuplements mélangés ont une consommation en eau différente en quantité ou en saisonnalité par rapport à des peuplements purs. La biodiversité augmente avec le nombre d'essences arborées dans un peuplement. Les peuplements mélangés peuvent également présenter une sensibilité moindre aux problèmes sanitaires comparés aux peuplements purs ; ceci est notamment dû au fait que les ravageurs repèrent moins facilement leurs arbres hôtes. Une augmentation de la productivité globale du peuplement a aussi été observée dans le cas de certains mélanges.

Les mélanges qui ont été étudiés :

- Douglas / Chêne sessile
- Douglas / Châtaignier
- Douglas / Mélèze
- Douglas / Robinier
- Douglas / Epicéa / hêtre / sapin

1.5.4. Régénération naturelle

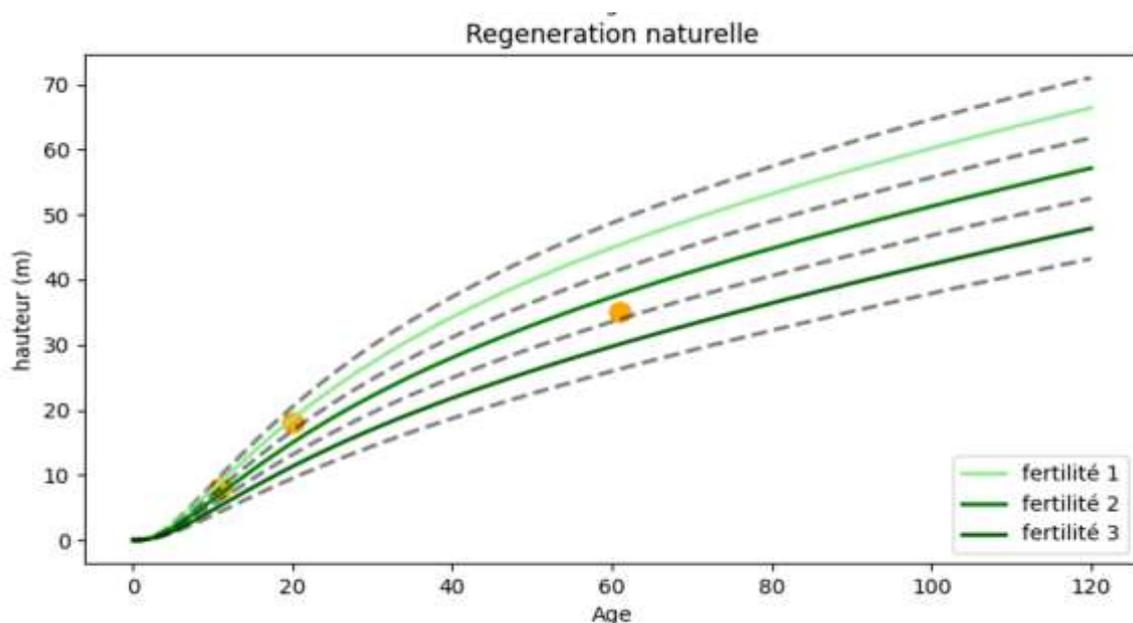


Figure 29 : Placette de référence régénération naturelle – St Firmin (71) (Photo B. Borde)

A l'heure où les peuplements de douglas arrivent à maturité, la question du renouvellement se pose et la régénération naturelle apparaît comme une alternative intéressante à la coupe rase et la plantation. Ce mode de renouvellement lent et moins exposé aux événements climatique peut apporter une solution à certains problèmes tels que les échecs de reprise en plantation, les attaques d'hylobes et de cervidés...

Cet itinéraire se démarque de la plantation car il s'appuie sur un peuplement adulte en place et en âge de se régénérer pour assurer le renouvellement. Il demande une certaine technicité, afin de doser progressivement la lumière, faire apparaître et développer les semis tout en limitant la végétation concurrente.

Les dispositifs du réseau permettent d'étudier les différentes phases de gestion d'un peuplement de douglas renouvelé par régénération allant de l'ensemencement du peuplement à la coupe définitive. Des références permettront également de mieux connaître les itinéraires de travaux nécessaires dans la régénération pour atteindre le stade de la première éclaircie.



Classe de fertilité (Guide ONF Douglas) permettant de déterminer des objectifs sylvicoles de production

1.5.4.1. Localisation des sites

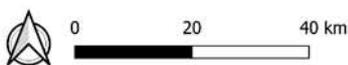


Réseau Régional Douglas et changement climatique Régénération naturelle



Légende

★ Régénération naturelle



EPSG : 2154 - RGF93 / Lambert-93 Projété
Data : Raster Alti_Bourgogne_2154 & Ombrage
SCAN100 Métropole LAMB93 10-2021
0_Références_Douglas_PEI_20220422
CNPF PEI Douglas : Septembre 2022

1.5.4.2. Données dendrométriques climatiques et environnementales

Communes	Année de plantation	Classe fertilité	Densité /ha	Surface terrière (m ² /ha)	Volume m ³ /ha	Note IBP	IBS Douglas 0°C	IBS Douglas +1°C	IBS Douglas +2°C	RU150 (mm)	Texture H1	Altitude (m)	Exposition °	P-ETP 06-08 (mm)	ARCHI sain (%)	ARCHI stressé (%)	ARCHI résilient (%)	ARCHI irréversible (%)	ARCHI Descente cime (%)	ARCHI mort (%)	Mesure fin
SAINT FIRMIN	Dépressage	NA	NA	NA	NA	NA	3	4	5	108	LmS	486	Aucune	-167	NA	NA	NA	NA	NA	NA	2020
CIRY LE NOBLE	Coupe ensemencée	2	172	31,4	383	12	2	3	4	194	LI	309	180	-163	63	21	14	0	0	2	2020
ANOST	Coupe ensemencée	1	107	19,8	256	6	2	2	2	124	Ls	713	340	-76	43	29	28	0	0	0	2020
ST DIDIER	2015?	NA	NA	NA	NA	NA	2	3	3	82	LIS	552	10	-115	NA	NA	NA	NA	NA	NA	2020
SAINTE-VICTOIRE SUR OUCHE	1960	2	148	28,1	346	10	3	3	4	54	AL	553	270	-137	76	24	0	0	0	0	2020
MARIGNY L'ÉGLISE	2001	1	209	5,9	39	9	3	3	4	45	SL	445	270	-109	76	20	0	2	0	2	2020
PLANCHEZ EN MORVAN	2010	1	500	0,7	3	12	2	2	2	167	LmS	643	30	-80	NA	NA	NA	NA	NA	NA	2020

Peuplements gérés en Régénération Naturelle Contexte stationnel des placettes du Réseau Douglas

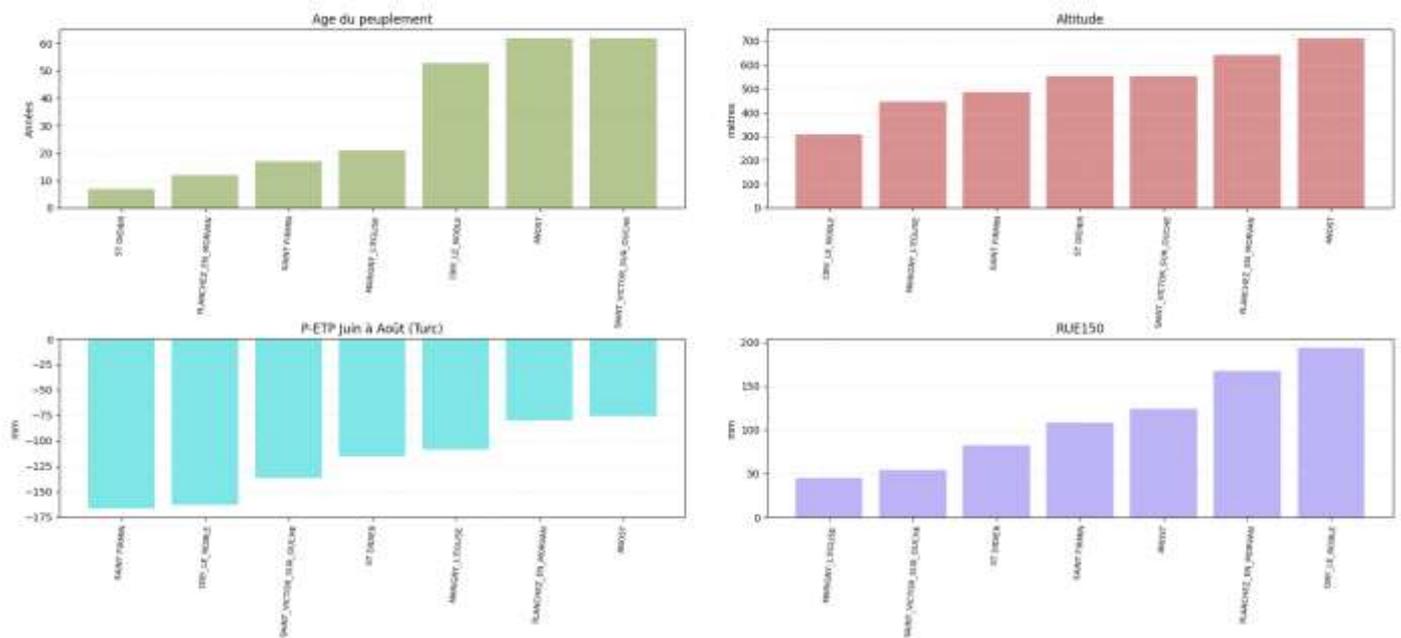
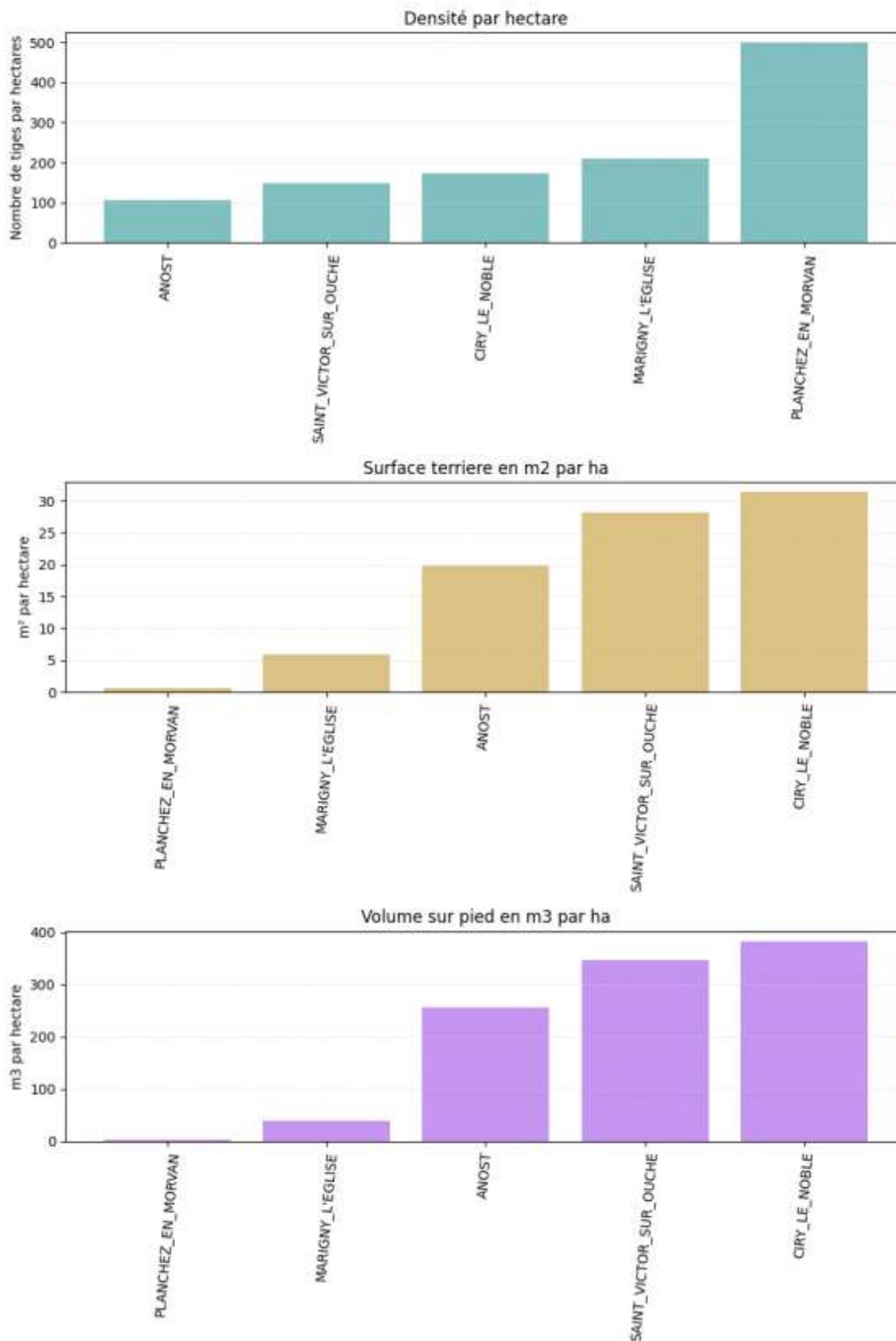


Figure 31 : Placette de référence - Coupe secondaire



Figure 30 : Placette de référence - Dépressage de régénération

Peuplements gérés en Régénération Naturelle Description dendrométrique des placettes du Réseau Douglas



1.5.4.3. Analyse et recommandations

Régénérer naturellement un peuplement permet de valoriser une bonne origine. En effet, cela permet de conserver la génétique de semenciers les plus résistants ayant déjà subi de fortes contraintes (climatiques et autres aléas).

Il est possible d'augmenter la diversité en essences pour plus de résilience, adaptées au contexte stationnel, en réalisant des complément-regarnis avec des essences résineuses plus tolérantes à la sécheresse (telles que le sapin de Nordmann, le sapin de Bornmüller, le cèdre, le pin maritime...) et en diversifiant avec des feuillus (tels le chêne sessile, le châtaignier...)

1.5.5. Mélange à la plantation

Les plantations en mélanges sont détaillées en **partie 3.3** du présent rapport

1.5.6. Essai variétés douglas

Les essais de variétés sont détaillés en **partie 3.4** du présent rapport.

1.5.7. Placettes AFI et Martelloscopes

Auteur : Valentin Demetz – Cabinet Forestalia – AFI

1.5.7.1. Sites retenus et intérêt des dispositifs

Le réseau AFI, de parcelles expérimentales et de démonstration dans des peuplements irréguliers, réparti sur l'ensemble du territoire national ainsi que dans plusieurs pays européens, est constitué de parcelles ou parties de parcelles. Il est organisé à deux échelles :

Echelle parcelle : suivi dendrométrique (évolution de la composition en essence, accroissement par catégorie de produit) et économique (comptabilité des différentes recettes et dépenses, temps consacré aux différentes activités, analyse des flux financiers, suivi de l'évolution du capital). Ces informations auront pour but de mesurer la rentabilité économique d'une telle sylviculture. Ce niveau permettra également de dresser un bilan de la gestion passée, de l'état actuel, et par comparaison d'inventaires, permettra d'étudier l'évolution globale de la parcelle. Ces suivis se feront en collaboration étroite avec le gestionnaire. Un protocole spécifique (plan comptable, précautions lors de l'inventaire en plein, ...), a été élaboré à l'intention du gestionnaire.

Echelle arbre : mise en place d'un certain nombre de placettes permanentes (10 en général). Elles permettront un suivi individuel des principales caractéristiques des arbres échantillonnés (essence, diamètre, hauteur, dimensions du houppier, qualité) et un suivi de l'évolution de la régénération. Elles permettront également de quantifier l'importance et la qualité des perches, ainsi que l'importance du taillis. Certains indicateurs écologiques seront également relevés (micro-habitats et bois mort). Ces placettes seront remesurées tous les cinq ans. Certaines de ces placettes pourront être utilisées ultérieurement pour une analyse plus fine du milieu (pédologie, richesse et diversité biologique) et des conditions de croissance (microclimat : rayonnement, température, humidité de l'air, bilan hydrique, ...).

Les martelloscopes sont à la fois des outils pédagogiques et de formation, ils seront mis à disposition des professionnels de la forêt et des propriétaires intéressés mais aussi des élèves d'établissements professionnels forestiers de Bourgogne. Sous forme d'un exercice de mise en situation, les participants se prêtent à l'analyse de la parcelle forestière, en gardant en tête la question « Pourquoi couper ou conserver cet arbre ? ». L'objectif est de comprendre les enjeux économiques et écologiques auxquels sont confrontés au quotidien les gestionnaires forestiers lors du marquage d'une éclaircie.

Les installations de dispositifs ont été faites par l'AFI, Valentin Demetz, Marie-Laure Martin et Lucien Vennet (experts forestiers indépendants) avec un appui du CNPF Bourgogne-Franche-Comté.

Cinq sites ont été choisis en concertation avec l'AFI afin de répondre au mieux aux objectifs du projet. Les gestionnaires retenus sont :

- | la **Société Forestière de la Caisse des Dépôts et Consignations**, partenaire du projet (placettes de Montbard, Martigny le Comte et martelloscope de Saint-Firmin) ;
- | le **cabinet Susse**, qui pratique la gestion en irrégulier en Bourgogne (placette de Dompierre les Ormes) ;
- | **Jean-Loup Bugnot** pour le martelloscope de Gibles.

Tous les dispositifs se situent dans la « zone de transition » du Douglas en Bourgogne. La station de Montbard en particulier, sur sous-sol calcaire, peut être considérée comme défavorable au Douglas. Ces stations, bien que permettant la sylviculture du Douglas, seront à surveiller avec attention dans

un contexte de changement climatique. La carte ci-dessous présente la localisation des trois placettes et des deux martelloscopes.

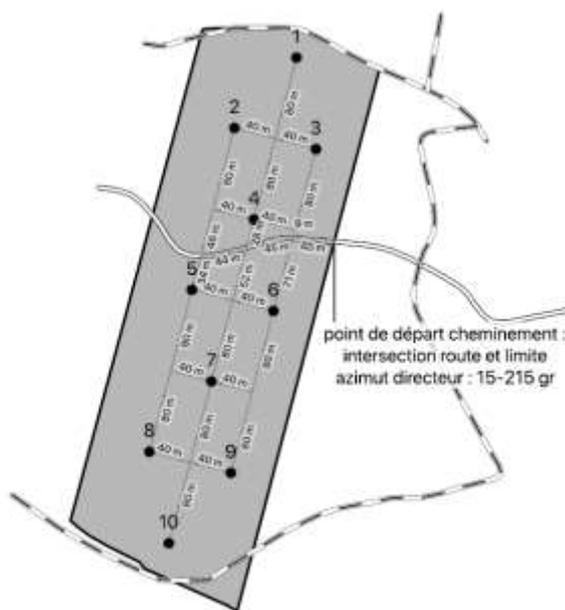
Les martelloscopes ont pour vocation à être des outils de vulgarisation et de sensibilisation des sylviculteurs. A l'avenir, le CNPF pourra organiser des formations et des exercices de martelage sur ces deux sites, avec l'accord des propriétaires.



1.5.7.2. Dispositif AFI n°148- GF de la Fayolle - Commune de Dompierre les Ormes (71)

Cette parcelle a été retenue dans le cadre du suivi de peuplements de douglas traités en irrégulier et dans le cadre des changements climatiques.

Le peuplement est issu d'une plantation de douglas dans lequel s'intercalaient à l'origine quelques lignes de sapin de Vancouver. Les trop nombreux dépérissements de ces derniers ont conduit à leur extraction, permettant ainsi l'ouverture de cloisonnements d'exploitation.



Plan d'échantillonnage

Les placettes sont installées de manière systématique, selon une maille rectangulaire. Ce dispositif comprend 10 placettes permanentes à angle fixe, matérialisées par un piquet métallique en leur centre.

L'objectif est d'avoir une bonne répartition des placettes sur l'ensemble de la parcelle, afin que les résultats issus de l'inventaire statistique aient du sens et soient le plus représentatif possible.

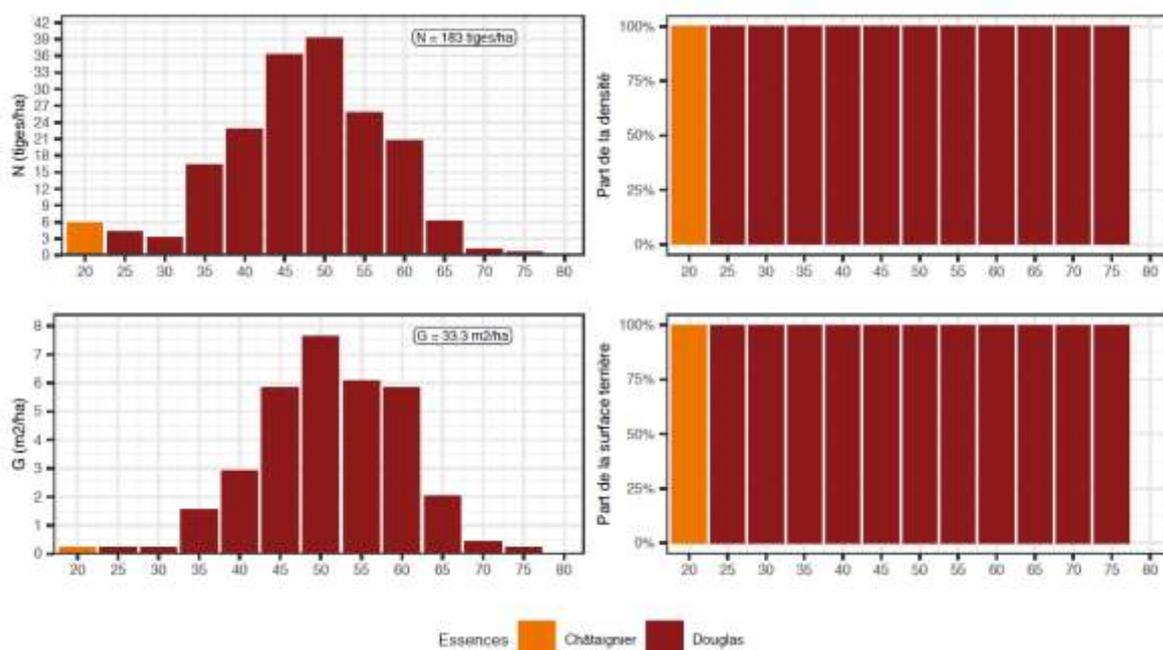


Figure 32 : répartition de la densité de tiges et de la surface terrière en absolu et en relatif

Le protocole AFI prévoit d'inventorier les dendro-micro-habitats (DMH) présents sur les arbres vivants et morts. Il s'agit de relever tous les éléments (trous de pic, cavités, présence de mousse, ...) permettant d'évaluer le degré de naturalité des forêts. Les résultats sont présentés en figure 33 ci-dessous.

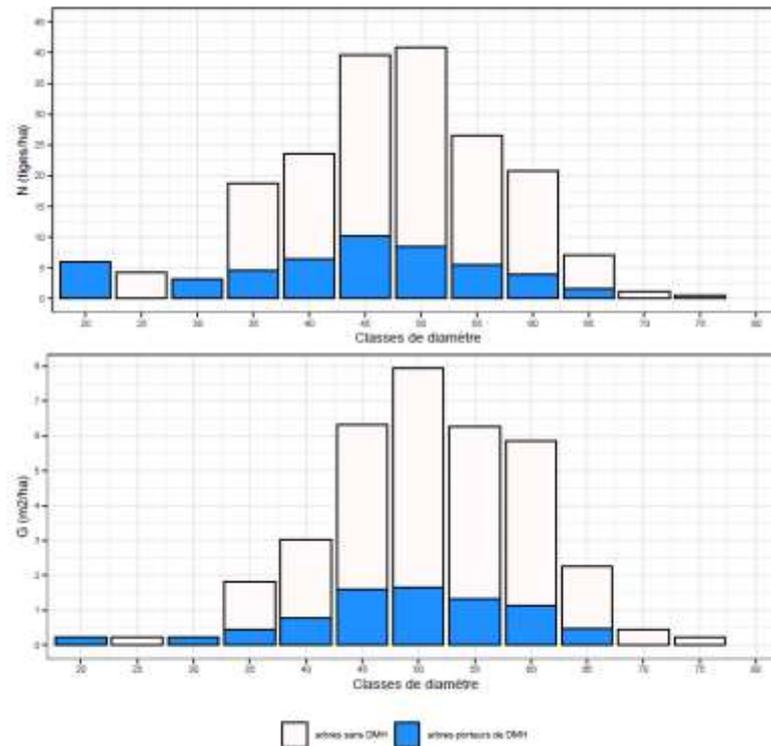


Figure 33 : Répartition des arbres porteurs de dendromicrohabitats (DMH)

On note que la répartition des DMH suit la répartition du nombre de tiges par classes de diamètre, ceci semble indiquer que les DMH sont présents sur tous les arbres, indépendamment de leur diamètre.

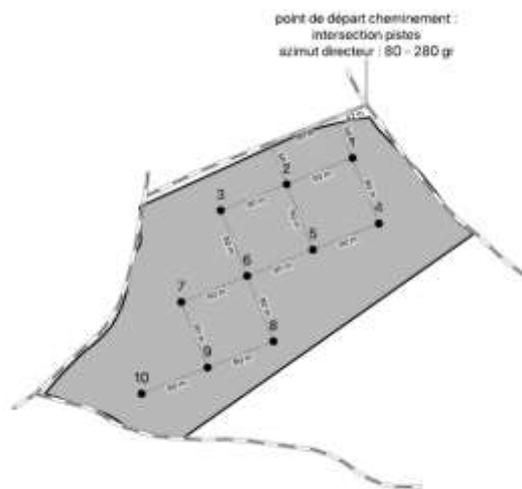
Cette placette a été installée les 11 et 12 février 2021.

Les résultats complets des mesures de cette placette AFI sont disponibles en Annexe 2 du présent rapport.

1.5.7.3. Dispositif AFI n°149 – Bois de Cressu – Commune de Martigny-le-Comte (71)

Cette parcelle a été retenue dans le cadre du suivi de peuplements de douglas traités en irrégulier et dans le cadre des changements climatiques.

Ce peuplement est issu d'une plantation de douglas équienne ayant été fortement impactée par la tempête de 1999. Le gestionnaire a choisi de laisser se développer le peuplement en l'état, ce qui a conduit à l'apparition spontanée d'un sous étage de feuillus divers (bouleaux, trembles, chênes sessiles).



Plan d'échantillonnage

Les placettes sont installées de manière systématique, selon une maille carrée.

Ce dispositif comprend 10 placettes permanentes à angle fixe, matérialisées par un piquet métallique en leur centre.

L'objectif est d'avoir une bonne répartition des placettes sur l'ensemble de la parcelle, afin que les résultats issus de l'inventaire statistique soient le plus représentatif possible.

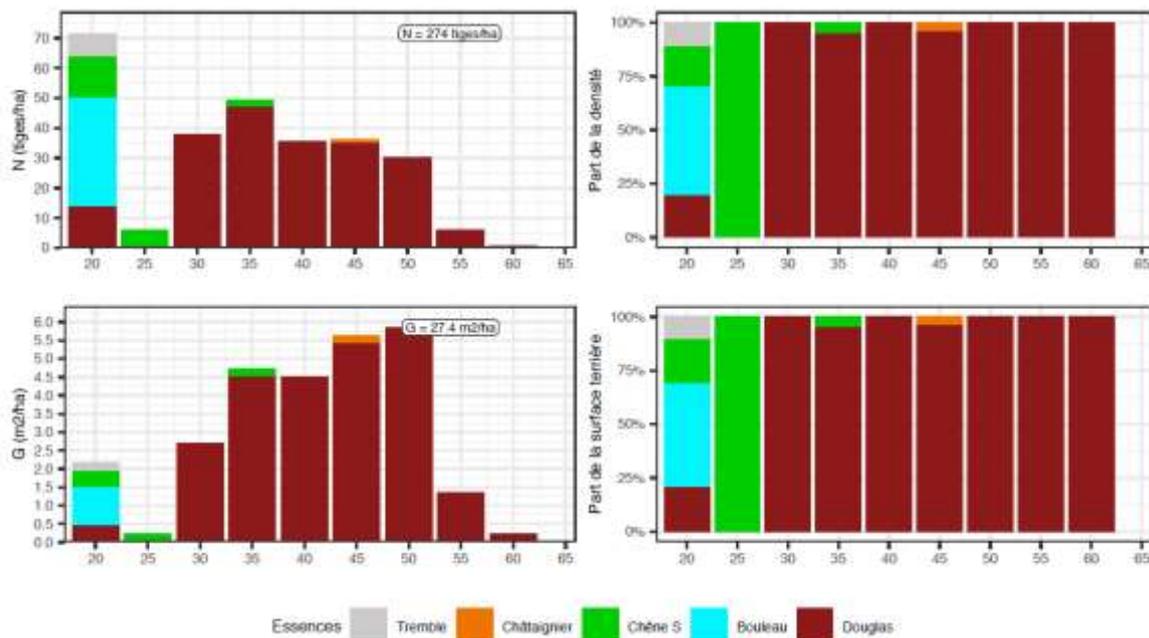


Figure 34 : répartition de la densité de tiges et de la surface terrière en absolu et en relatif

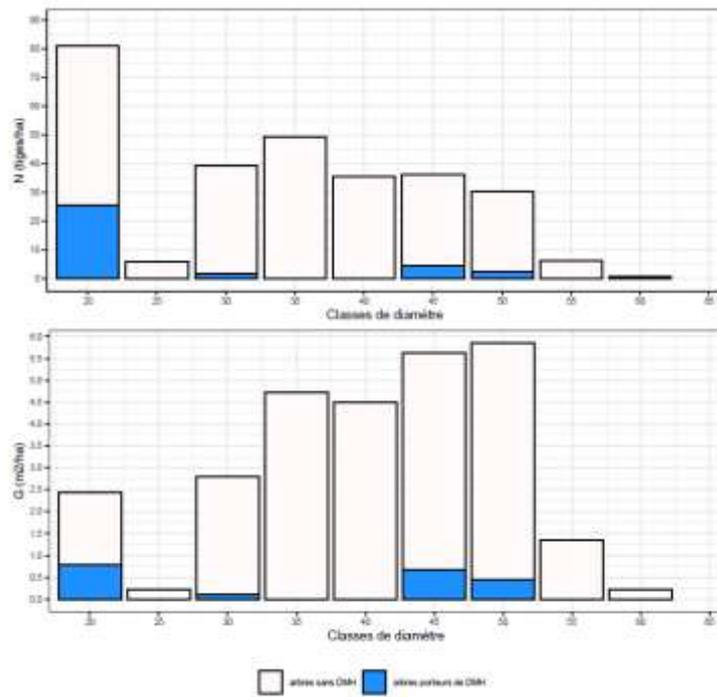


Figure 35 : Répartition des arbres porteurs de dendromicrohabitats (DMH)

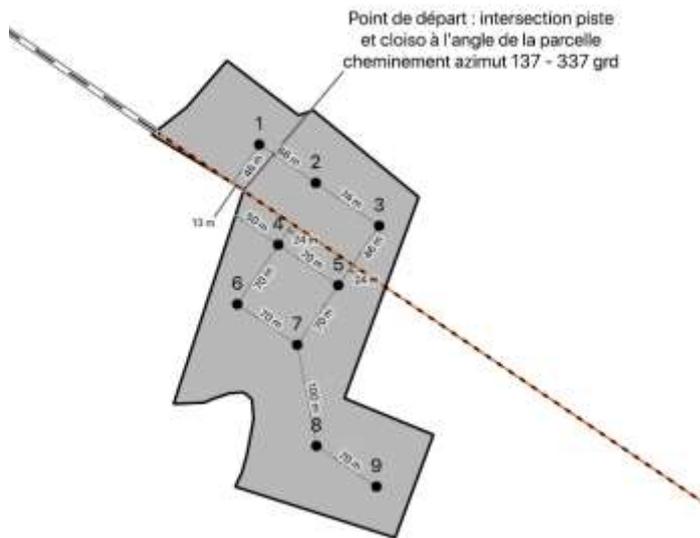
Cette placette a été installée les 2 et 3 mars 2021.

Les résultats complets des mesures de cette placette AFI sont disponibles en Annexe 2 du présent rapport.

1.5.7.4. Dispositif AFI n°156 – Bois Thourau – Commune de Montbard (21)

Ce dispositif a été installé au sein d'un peuplement de douglas issu d'une plantation monospécifique d'une trentaine d'années.

Le gestionnaire a souhaité changer de traitement pour adopter une sylviculture à couvert continu. Deux difficultés majeures se rencontrent dans ce secteur : la vigueur de la végétation adventice (ronce) ainsi que la présence importante de gibier (présence d'un dispositif de clôture important).



Plan d'échantillonnage

Les placettes sont installées selon une maille permettant le sondage de la plus grande partie du peuplement.

Ce dispositif comprend 9 placettes permanentes à angle fixe, matérialisées par un piquet métallique en leur centre.

L'objectif est d'avoir une bonne répartition des placettes sur l'ensemble de la parcelle, afin que les résultats issus de l'inventaire statistique soient le plus représentatif possible.

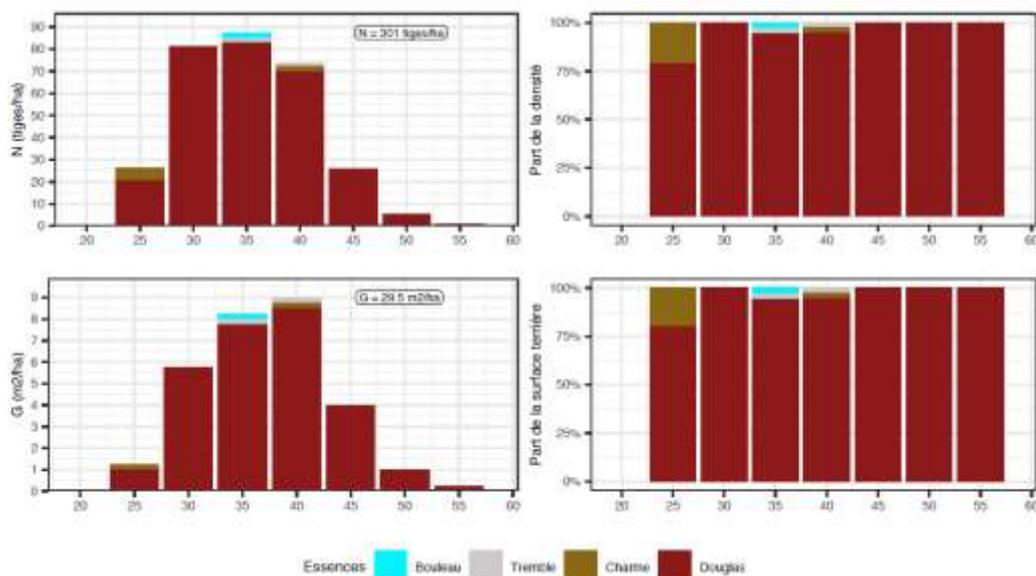


Figure 36 : répartition de la densité de tiges et de la surface terrière en absolu et en relatif

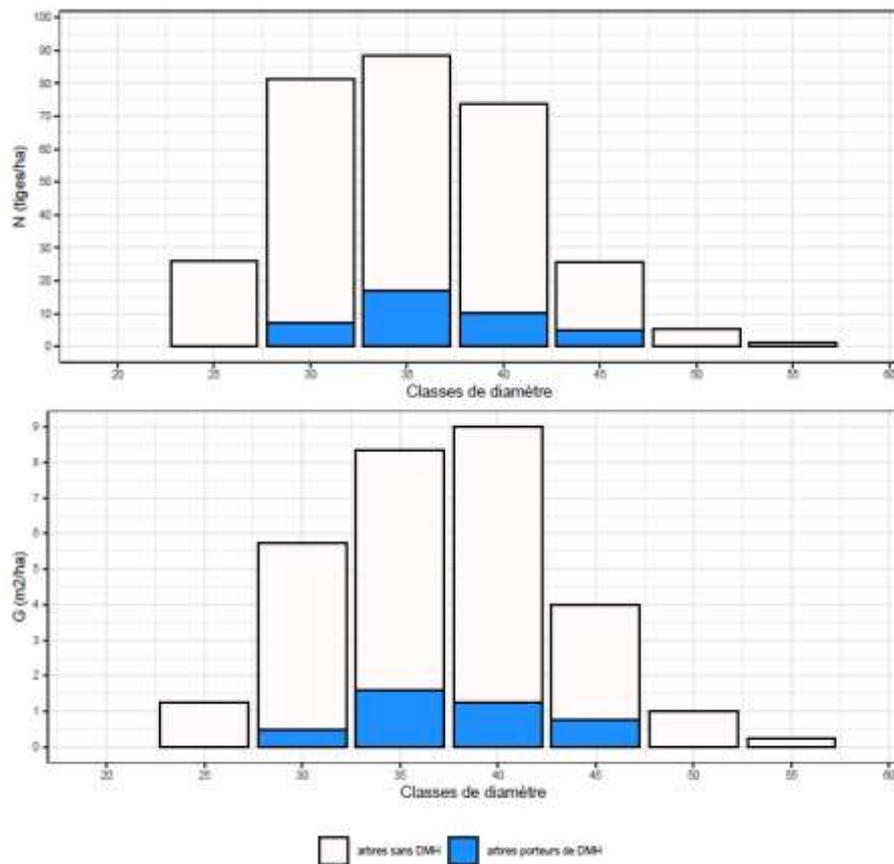


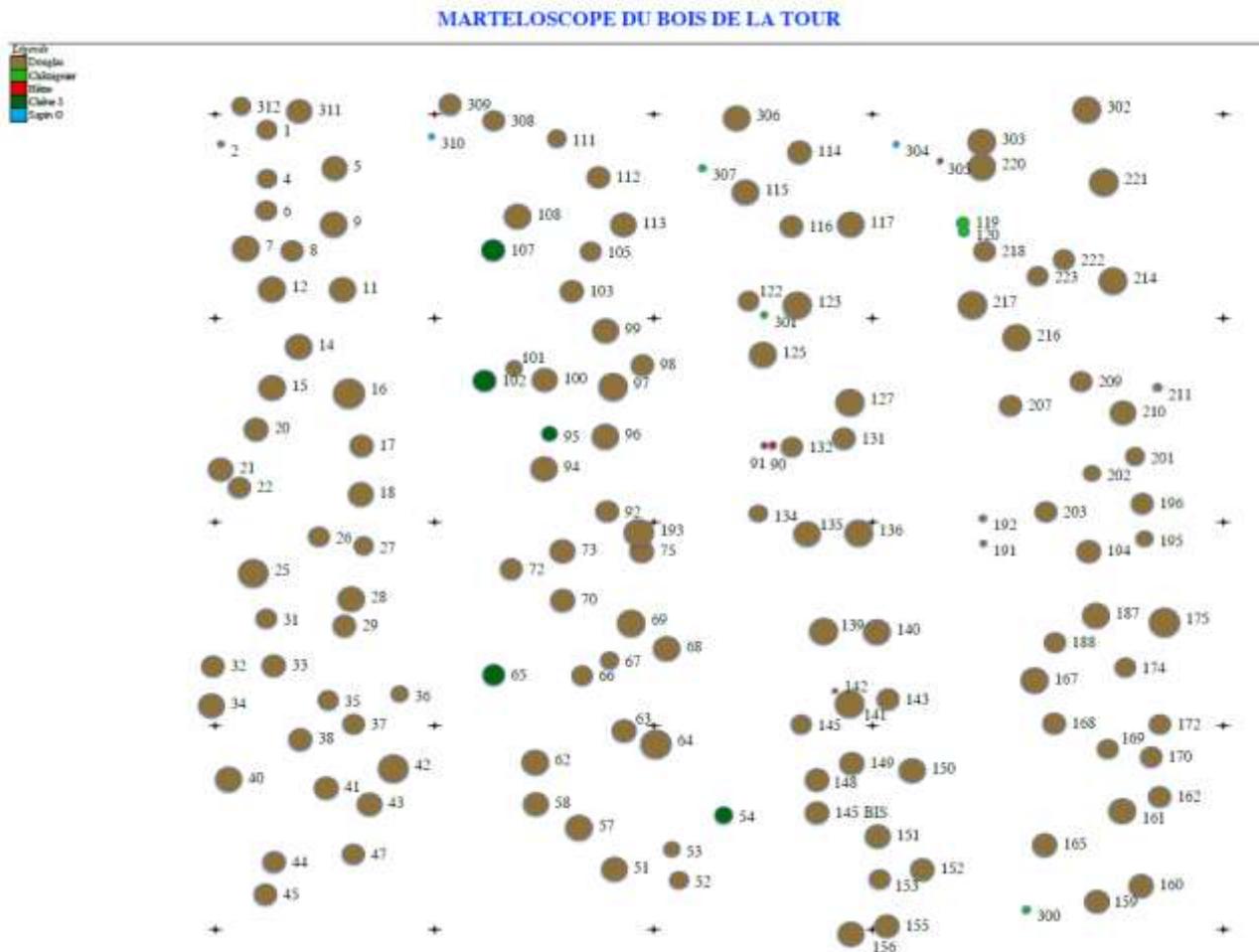
Figure 37 : Répartition des arbres porteurs de dendromicrohabitats (DMH)

Cette placette a été installée les 11 et 12 janvier 2022.

Les résultats complets des mesures de cette placette AFI sont disponibles en Annexe du présent rapport.

1.5.7.5. Martelloscope – Bois de la Tour – Commune de Saint Firmin (71)

Ce peuplement a été sélectionné pour illustrer le devenir d'un peuplement mixte Douglas – Abies grandis planté initialement en bandes alternées. Les Grandis ayant tous dépéri, ils ont été récoltés tout en laissant le peuplement de douglas en place. On assiste, une quinzaine d'années après la récolte à l'installation d'un gaulis mélangé de douglas et feuillus dans les anciennes bandes de grandis. La station étant limite pour le douglas, il est intéressant de suivre l'avenir de ce peuplement.

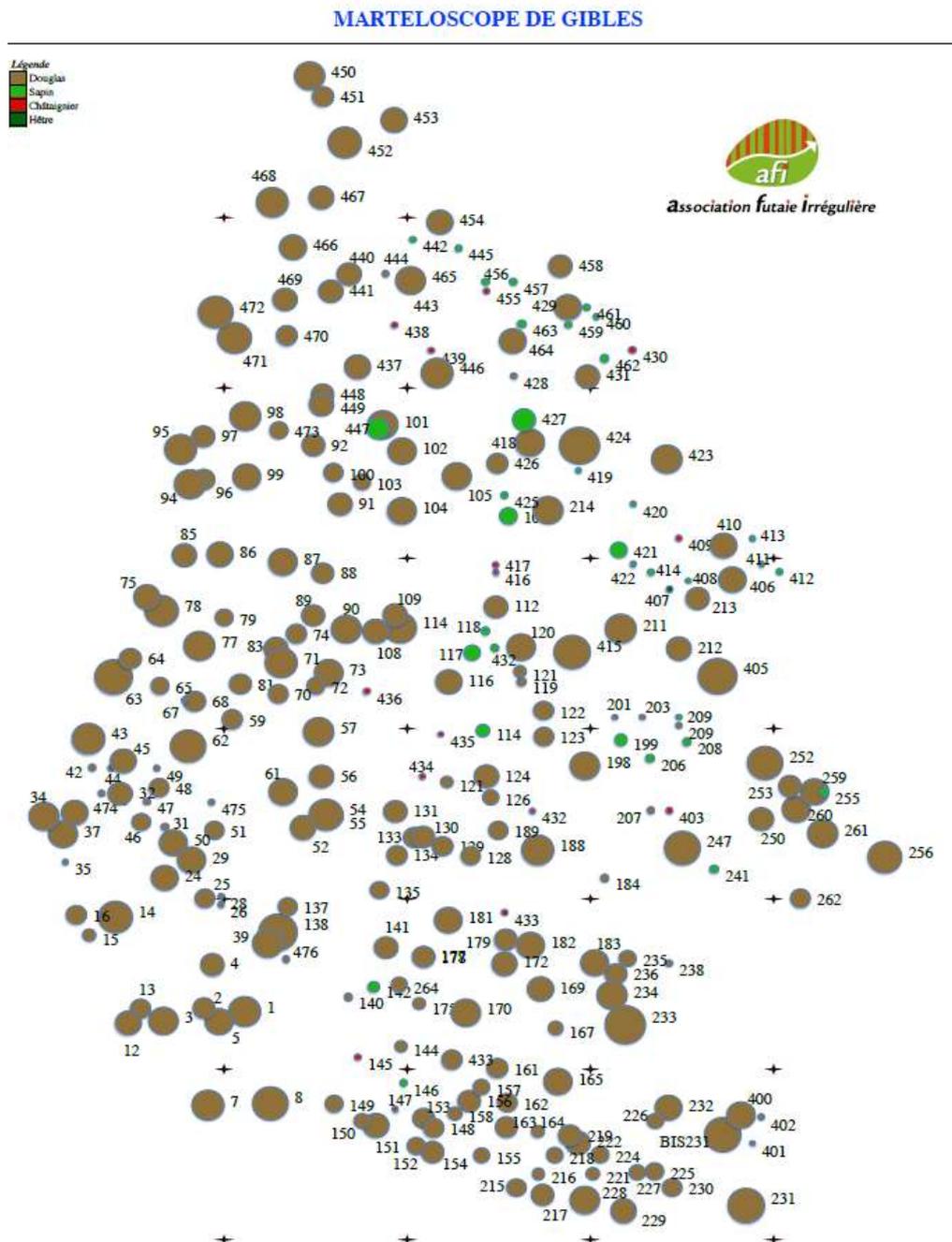


On distingue bien les anciennes bandes de grandis sur la carte des arbres géoréférencés ci-dessus.

Le patrimoine dendrométrique sur cette placette est de 142 arbres par hectare, pour une surface terrière de 30,5m²/ha et un volume de 431,6 m³/ha. La valeur de consommation de ce peuplement est estimée à 33 916€/ha.

1.5.7.6. Martelloscope – Commune de Gibles (71)

Ce peuplement a été sélectionné pour sa localisation, dans les monts du charolais, qui est identifiée comme zone à enjeux pour le douglas face au changement climatique. Le peuplement est en cours d'irrégularisation depuis plusieurs années et représente un bel exemple de traitement d'irrégularisation en Douglas. Le mélange avec le sapin éparés est intéressant et cette placette permettra de suivre l'évolution du comportement du mélange.



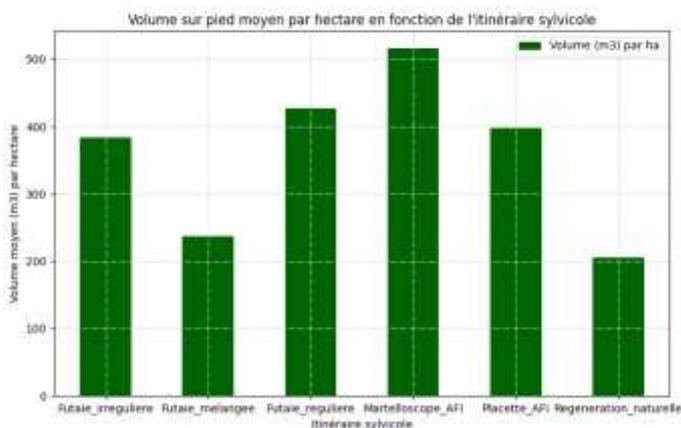
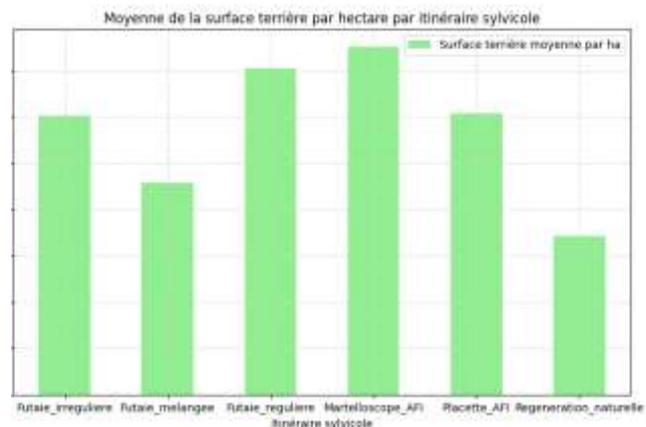
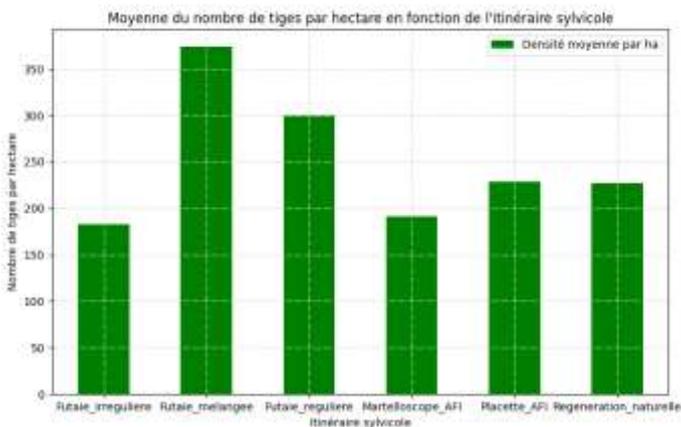
Le patrimoine dendrométrique sur cette placette est de 242 arbres par hectare, pour une surface terrière de 44,6 m²/ha et un volume de 601 m³/ha. La valeur de consommation de ce peuplement est estimée à 55 780 €/ha.

1.6. Synthèse du réseau

La création d'un réseau de référence et d'essais de parcelles de Douglas en Bourgogne nous permet d'avoir un éventail de sylvicultures, de stations et de climats recouvrant la Bourgogne. Ce réseau est un « Etat initial » d'un ensemble de peuplements qui devront être suivis pour avoir un intérêt à l'avenir. En gestion forestière, un état, à un instant donné, ne suffit pas pour tirer des conclusions quant aux pratiques qui sont, ou ne sont pas, favorables au changement climatique.

Nous pouvons cependant observer notre réseau et en tirer quelques conclusions et recommandations d'ordre général. La description dendrométrique du réseau de placettes au complet est présentée dans les tableaux et graphiques dans les pages suivantes.

Thématique	Densité moyenne (tiges/ha)	Volume moy (m ³ /ha)	Surface terrière moyenne (m ² /ha)
Futaie régulière	300	427	35
Futaie irrégulière	183	384	30
Futaie mélangée	374	237	23
Régénération naturelle	227	205	17



La dendrométrie moyenne des peuplements varie logiquement en fonction du traitement sylvicole. On constate que les futaies irrégulières ont un nombre de tiges à l'hectare plus faible qu'en futaie régulière. Cependant, la surface terrière à l'hectare des futaies irrégulières est similaire à celle des peuplements réguliers et mélangés. De même, le volume sur pied est très proche entre futaie régulière et irrégulière. Cela s'explique par la plus grande quantité de gros bois et très gros bois en futaie irrégulière qu'en régulier.

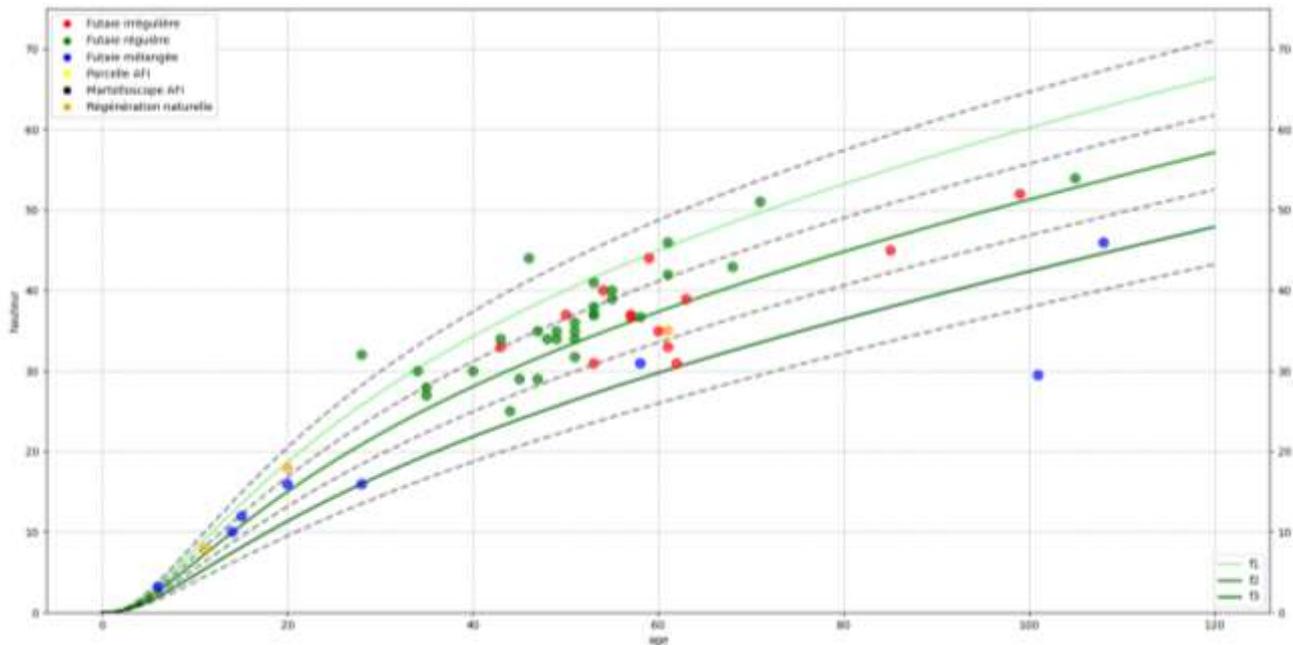


Figure 38 : Disposition des placettes du réseau sur les courbes de fertilité du Douglas (ONF)

Classe de fertilité	Moyenne de la notation ARCHI d'arbres Sains (%)
1	68,74
2	47,48
3	44,14
Total général	55,37

Le tableau ci-dessus présente la moyenne des notes ARCHI en fonction de la classe de fertilité. On note que plus la classe de fertilité est bonne, plus le pourcentage d'arbres sains moyen est élevé.

Classe de fertilité	Moyenne de l'IBS Douglas +2°C
1	3,42
2	4,29
3	5,29
Total général	4,06

Le tableau ci-dessus présente la moyenne des indices de vigilance BioClimSol en fonction de la classe de fertilité. On note que plus la classe de fertilité est bonne, plus l'indice de vigilance moyen est faible.

Ces observations nous encouragent à recommander la sylviculture du Douglas sur les meilleures stations et dans la mesure du possible, à diversifier et irrégulariser les peuplements sur les stations les moins fertiles.

Le réseau de référence ainsi constitué comprend :

- | 8 peuplements en régénération naturelle de Douglas ;

- | 10 peuplements mélangés à base de Douglas ;
- | 13 peuplements de Douglas gérés en irrégulier ;
- | 20 essais de plantation de Douglas en mélange ;
- | 35 peuplements de Douglas en futaie régulière.

Ce réseau s'étend sur toutes les sylvo-éco-régions de Bourgogne où la sylviculture du Douglas est possible, avec un plus grand nombre de peuplements sur les zones de transition en Bourgogne (monts du beaujolais, annexes cristallines du Morvan et Autunois).

Les peuplements en cours de régénération naturelle ont un volume sur pied et une surface terrière qui représente la moitié de ce qu'on trouve en futaie irrégulière et plus de deux fois la moitié du volume des peuplements réguliers.

En nombre de tiges, on observe que les peuplements irréguliers et en régénération naturelle ont un nombre de tiges à l'hectare équivalent.

Ces observations peuvent nous conduire à quelques propositions :

- | malgré une structure irrégularisée, un peuplement irrégulier dispose d'un capital sur pied équivalent à celui d'une futaie régulière classique ;
- | afin d'obtenir une régénération naturelle, une densité proche de 200/ha semble nécessaire.

Afin de favoriser la poursuite de la sylviculture du Douglas en Bourgogne, ce réseau nous permettra d'observer l'influence de pratiques sylvicoles diverses sur l'état sanitaire des arbres. Les hypothèses selon lesquelles les peuplements irrégularisés, d'essences variées avec une bonne capacité d'accueil de la biodiversité favorisent la résilience des peuplements pourront être contrôlées.

Les tests de plantations en mélange, ainsi que les mesures faites sur des peuplements déjà mélangés nous permettront d'estimer quelles essences sont les plus à même d'accompagner efficacement le douglas et celles qui pourraient s'y substituer dans le cas où celui-ci serait trop sensible au changement du climat à venir. Les peuplements en mélange Douglas / châtaignier sur stations acides que nous avons pu observer se comportent admirablement et avec une sylviculture dynamique peuvent donner d'excellents résultats.

Les tests de variétés de Douglas semblent indiquer que la variété Californie, bien qu'elle ne meure pas moins que les variétés classiquement utilisées (Luzette, Washington, Darrington) réagit mieux que celles-ci lors des années à fort déficit hydrique estival (maintien de la production dans des conditions plus sèches). Ceci, en plus de l'apport de variabilité génétique par rapport aux provenances habituelles, nous encourage à en recommander aux planteurs qui souhaiteraient varier les provenances (cf partie 3.4).

Concernant l'itinéraire technique permettant une séquestration de carbone maximale, les résultats préliminaires ne sont pas suffisamment clairs pour apporter une conclusion ferme et définitive. En effet, la biomasse au sol (paramètre relevé au cours de cette étude), dépend de nombreux facteurs, dont l'âge du peuplement et la date de la dernière opération sylvicole menée sur la parcelle. Juste après une éclaircie, on trouve systématiquement plus de carbone au sol que si cette éclaircie a eu lieu plusieurs années auparavant.

Recommandations aux sylviculteurs

Peuplements de douglas en général :

- Établir un diagnostic pédologique et climatique afin d'identifier les contraintes auxquelles est soumis le douglas. L'outil BioClimSol combine des critères de climat actuel ou futur et des indices de sol mesurés sur le terrain. Il aide le forestier dans la gestion du peuplement sur pied ou d'une parcelle à boiser et informe sur le risque de dépérissement.
- Identifier les arbres résilients dans un peuplement (méthode ARCHI), arbres les mieux à même de surmonter un stress hydrique, et travailler à leur profit.

Peuplements réguliers :

- Pratiquer une sylviculture dynamique mais sans à-coup. Être vigilant et passer régulièrement sans prélèvements trop marqués dans les peuplements pour conserver croissance, vigueur et ambiance forestière.
- réaliser des éclaircies régulières pour maintenir une surface foliaire en adéquation avec le contexte pédo-climatique.
- Diminuer le capital sur pied pour les peuplements trop capitalisés, en récoltant plus que l'accroissement moyen périodique en volume du peuplement sur une rotation d'éclaircie.
- Sur les meilleures stations, réaliser des éclaircies fréquentes prélevant un faible capital pour perturber le peuplement le moins possible, la fréquence des éclaircies peut-être tous les quatre à six ans, en prélevant 15 % à 20 % du volume sur pied.
- Dans les zones de transition à la limite de l'aire du Douglas, la clef d'entrée du martelage devrait être, par ordre de priorité :
 - o l'état sanitaire – sélectionner les arbres dépérissant ou irréversibles ;
 - o la qualité – prélever les arbres dominants de moins bonne qualité (les « loups ») ;
 - o l'amélioration - détournement des co-dominants en bon état sanitaire.
- Aménager systématiquement des cloisonnements d'exploitation pour faciliter la gestion et diminuer le tassement des sols.
- Ne prendre des décisions de travaux ou de récolte anticipée de peuplements qu'après une étude détaillée des conditions phytosanitaires et économiques.
- Favoriser la régénération lorsqu'elle provient d'arbres dominants de qualité et adaptés à leur environnement, eux-mêmes issus de plusieurs décennies de sélection par la station et par les derniers accidents climatiques.

Peuplements irréguliers :

- Poursuivre la gestion irrégulière en diversifiant les essences qui se régénèrent naturellement dans le peuplement.
- Chercher à obtenir une surface terrière comprise entre 15m² et 25m² par hectare.
- Favoriser le mélange d'essences via des travaux sylvicoles.
- Prévoir des enrichissements par nids dans le peuplement à l'aide d'essences ou de variétés résistantes aux sécheresses et aux fortes chaleurs.

Peuplements mélangés :

- Favoriser les essences autochtones connues pour leur résistance à la sécheresse (chêne pubescent, alisier torminal, poirier sauvage, pommier sauvage...).
- Diminuer le capital sur pied en nombre de tiges, tout en conservant le mélange.

En plantation :

- L'analyse de la station devient un acte encore plus indispensable qu'auparavant, car il n'est plus question de « favoriser ce qui marche » ou de « planter ce qui a fait ces preuves » sans une réflexion préalable.
- Repli sur les stations optimales. Cultiver le douglas dans son optimum écologique constitue un gage de bonne santé. Cela favorisera son bon développement et sa capacité à surmonter les futurs stress.
- limiter le plus possible le douglas en versant sud.
- Favoriser les mélanges de provenances des douglas, dont les plus méridionales comme les provenances californiennes. Diversifier le choix des provenances permet d'assurer une diversité génétique aux plantations.
- Conserver le plus possible l'ambiance forestière et des bandes latérales d'abri (avec des feuillus) : les petits boisements sont plus soumis à l'effet de forte température et de dessèchement de l'air. L'important est d'éviter le plus possible l'exposition à des forts rayonnements des peuplements lors de canicules.
- Dans la zone de vigilance élevée, réaliser un mélange de douglas avec des essences plus résistantes à la sécheresse comme le cèdre de l'Atlas ou les pins maritime et laricio.
- Implanter le douglas en mélange avec des essences ayant une dynamique de croissance proche (châtaignier, pins) ou tolérantes à l'ombre (hêtre, abies sp.). La proportion de Douglas doit être adaptée ($\leq 50\%$), sous peine de n'avoir qu'un peuplement mono-spécifique à terme,
- Si besoin, travailler le sol de manière localisée (potets travaillés) pour faciliter l'implantation des plants sans dégrader les sols.
- Préserver la végétation adventice entre les lignes de plantation (ou une ligne sur deux) pour conserver la fraîcheur au sol.
- Les très jeunes plantations, particulièrement celles de l'année, résistent difficilement aux aléas climatiques pendant toute la durée de leur "crise de transplantation", pour cette raison on évitera autant que possible le broyage en plein et la mise en andains des rémanents dans les stations à risques.

La pire solution serait de ne rien faire et de constater à nouveau des dégâts analogues à ceux des canicules passées.

1.7. Transfert des connaissances

Les premières observations et les premiers résultats de ce réseau de peuplement et de plantation ont fait office assez rapidement de transfert de connaissance auprès des sylviculteurs de douglas, des propriétaires forestiers, des gestionnaires forestiers et des professionnels de la filière (pépiniériste, entrepreneur de travaux forestiers, reboiseurs ...), principalement au travers des actions suivantes :

Journées de formation, d'information et de vulgarisation

Durant l'action PEI et depuis la mise en place de ces essais de plantations en mélange, ce sont environ 300 propriétaires forestiers et sylviculteurs qui ont visité au moins l'un des essais lors de l'une des rencontres de terrain suivantes :

- | Réunions de vulgarisation du CNPF (10 septembre 2021 en Morvan, 22 octobre 2021 en Saône et Loire, novembre 2021 dans la Nièvre)
- | Formation FOGFOR sur l'adaptation des forêts aux changements climatique (Automne 2022)
- | Journée technique du CETEF de Bourgogne (5 septembre 2021)
- | Tournées forestières de propriétaires et gestionnaires d'autre région de France (Auvergne-Rhône-Alpes le 24 juin 2021, Limousin le 7 juin 2021,)
- | Journée technique lors du conseil de centre CNPF le 14 avril 2021



CNPF
Centre National de l'Élevage et de la Forêt
Bourgogne-Franche-Comté

RECHION BOURGOGNE-FRANCHE-COMTE

Nous vous invitons à une réunion d'information sur le thème :

Avenir du Douglas face aux changements climatiques

Présentation des actions du Programme Européen d'Innovation

Rendez-vous le **22 octobre 2021**
à **9h30 précises** à **Touton sur Arroux (71)**
- voir plan au verso -
Prenez un repas tôt ou tard pour la passer-déjeuner

Animateur : Bruno BORDE (06 12 01 40 00) et Louis-Adrien LAGARAU (06 13 50 50 90)

Au programme sur le terrain :

- Les impacts du réchauffement climatique sur le douglas
- Évaluation et analyse des risques pour un peuplement adulte
- Adapter la gestion et renouveler les peuplements pour favoriser la résilience
- Essai de comparaison des 9 provenances de douglas
- Dispositif HRAZ de micro dendrométrie sur la croissance du douglas
- Essai de reboisement douglas en plantation mixte

La réunion se déroulera entièrement sur le terrain, prévoir des chaussures de marche, des bottes et vêtements de pluie si nécessaire. Afin de prendre des mesures sanitaires liés à la covid 19, il est demandé à chacun de respecter la réglementation sanitaire en vigueur et les gestes barrières.

Fin de la réunion vers 16h

Centre Régional de la Forêt et de l'Élevage de Bourgogne-Franche-Comté
Contact : Bruno BORDE, 7A rue de Rey-Saintes 71100 CHALUN-VAL SACRÉ
Tél : 06 12 01 40 00 - Courriel : bruno.borde@cnpf.fr

CETEF DE BOURGOGNE
GROUPE DOUGLAS

Les adhérents du CETEF Bourgogne sont invités à participer à une journée de présentation du Programme Européen d'Innovation Douglas :

Changement climatique, quel avenir pour le douglas en Bourgogne ?

Rendez-vous vendredi **5 Novembre 2021**
à **9 h précises** en forêt à **DETTEY (71190)**
- voir plan au verso -

Un itinéraire pourra être pris en commun au restaurant « Le Relais de Dettéy » 71100 DETTEY.

Au programme :

- Présentation des actions PEI Douglas
 - Constitution d'un réseau de référence
 - Évaluation et analyse des risques
 - Adapter et renouveler les peuplements pour favoriser la résilience
- Visites en forêt
 - Essai de comparaison des provenances de douglas
 - Dispositif HRAZ de micro dendrométrie sur la croissance du douglas
 - Essai de reboisement douglas en plantation mixte

Fin de la journée vers 17h

Renseignements/Contact : Bruno BORDE 06 12 01 40 00 et Antoine DELBERGUE 06 12 01 49 06

INSCRIPTION OBLIGATOIRE AVANT LE 28 OCTOBRE

CETEF de Bourgogne - Association loi 1901 - 22 rue Olympe 58000 AUBUSSON
Tél : 03 25 34 82 20 - mail : cef@bourgogne@cnpf.com

Rédaction de support technique

Ce réseau de références techniques est un appui pour l'établissement d'itinéraire sylvicole dans des futurs guides de sylviculture et d'articles et dans des revues spécialisées. Les placettes installées fournissent d'ores et déjà des données initiant la simulation d'itinéraire de sylviculture et la rédaction de support technique de vulgarisation (brochure, plaquette) et de formation.



Support de communication

Relayé par le site internet du CNPFP et prochainement par un projet de réalisation d'une vidéo des groupes opérationnels ou via Educagri, la mise en place concrète sur le terrain de ce réseau d'essais est un support qui permet une communication pertinente et convaincante sur les changements de pratiques à opérer dans le cadre de l'adaptation aux évolutions climatiques.

Base de données pour les futurs projets de recherche et développement

Les données du réseau sont disponibles sur la base ILEX du CNPFP, elles pourront être utilisées pour d'autres études qui pourront s'appuyer sur les essais déjà installés et les compléter par d'autres axes de recherches et d'observations.



1.8. Conclusion

Depuis les années 60, les douglas de Bourgogne ont majoritairement donné des résultats très satisfaisants lorsque les conditions suivantes étaient réunies :

- ✓ Climat : une pluviométrie supérieure à 800 mm, une altitude supérieure à 400 m
- ✓ Sol : limon à limon sableux, de plus de 40 cm de profondeur, sans hydromorphie et avec une réserve utile supérieure à 80 mm.

Depuis deux décennies, au vu de l'évolution constatée du climat, les conditions déterminées ci-dessus soumettent le douglas à un stress hydrique (pratiquement tous les ans depuis 2015). Cela n'empêche pas des niveaux de production intéressants, mais fragilise les peuplements et peut conduire à des dépérissements. Aujourd'hui, il est nécessaire de prendre en compte les risques liés au changement climatique, avant de reconduire ou d'installer de nouveau du douglas en Bourgogne. Les limites climatiques à retenir doivent donc être plus strictes afin de lui assurer une possibilité de résistance suffisante pour les décennies futures. Ainsi, sur les sols adaptés, le maintien ou l'installation du douglas devrait nécessiter que la parcelle se situe à une altitude supérieure à 600 m et bénéficie d'une pluviométrie annuelle supérieure à 900 mm. En dessous de ces seuils et pour les conditions de station les plus éloignées de son optimum, le douglas devra impérativement être associé à des essences plus résistantes ou bien être remplacé par une essence de substitution.

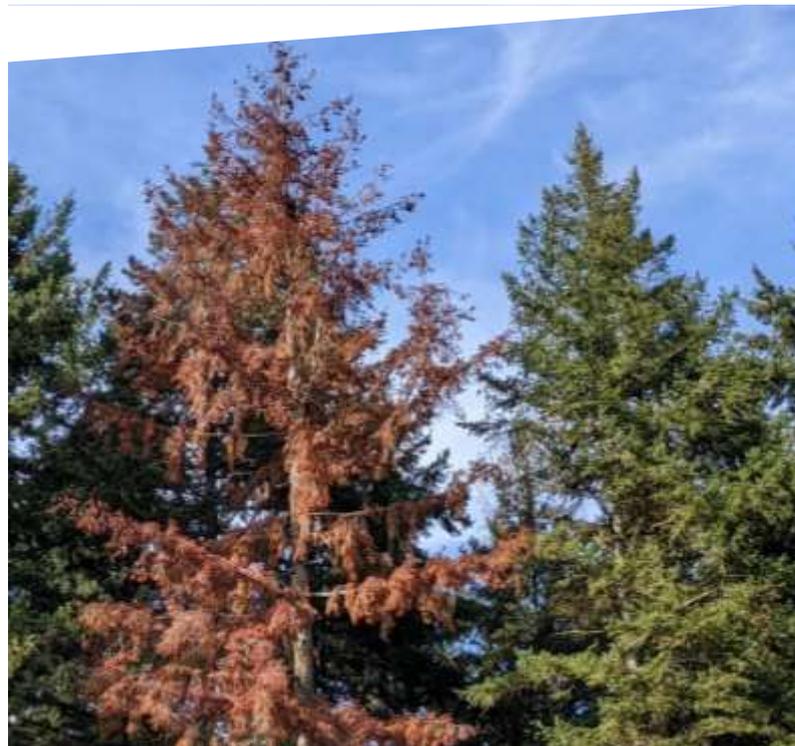
La constitution du réseau de référence sera, à court terme, un véritable outil de vulgarisation et de formation destiné aux propriétaires et gestionnaires. On peut toutefois considéré qu'il l'est déjà au vu du nombre de visites déjà organisées par le CNPF BFC ou en autonomie. De plus des demandes affluent régulièrement de toute la France. Ce réseau permettra également, dans le contexte de changement climatique d'aujourd'hui et de demain, de redéfinir les conditions stationnelles optimums du douglas, d'apprendre à évaluer le niveau de vulnérabilité des peuplements et de mettre en évidence des sylvicultures plus résilientes.

A moyen terme, il constituera une importante base pour poursuivre la recherche initiée sur les sylvicultures « résilientes », poursuivre les expérimentations sur les techniques de renouvellement des peuplements et donner aux propriétaires des pistes pour renouveler les peuplements inadaptés.

A long terme, ce réseau est destiné à conforter la filière douglas en Bourgogne (deux scieries importantes, de nombreuses petites scieries, des emplois en gestion, exploitation...) et la développer en contournant les incertitudes des évolutions climatiques.

Tâche 2

Evaluation et analyse des risques



2. TÂCHE 2 : Evaluation et analyse des risques

2.1. Evaluer la vulnérabilité hydrique et thermique au changement climatique

Chef de projet : CNPFP IDF – Simon Peyrin & Jean Lemaire

Base de données DSF
Etude bibliographique et bilan de l'enquête

2.1.1. Etude Bibliographique

Un état de l'art a été mené au démarrage du projet afin de faire le point sur les recherches passées et en cours sur la sensibilité du douglas au changement climatique. Elle a eu pour but de recenser :

- | les provenances de Douglas connues ;
- | les connaissances actuelles sur modalités de plantations en mélange ;
- | les connaissances sur la physiologie du Douglas et ses capacités d'adaptation.

Cette phase bibliographique a permis d'orienter le projet notamment sur les typologies des peuplements de Douglas du référentiel (Partie 1), sur le choix des modalités de mélange (partie 3.3 du présent rapport) ainsi que sur le choix des essences à implanter en mélange avec le Douglas (Partie 3.5).

Les documents principaux sur lesquels nous avons basé notre travail sont :

- | le guide de l'expérimentation forestière (*Jérôme Rosa, Philippe Riou-Nivert, Eric Paillassa*) – CNPFP IDF ;
- | optimising the yield of Douglas-fir with an appropriate thinning regime (*Jean-Philippe Schütz, Peter Lukas Ammann, Andreas Zingg*) – ETZ Zürich;
- | Les publications du projet : Plantations expérimentales d'essences d'avenir (*Esther Frei, Kathrin Streit, Peter Brang*) – WSL.

Un remerciement particulier est adressé à Peter Brang de [l'institut fédéral de recherches sur la forêt, la neige et le paysage \(WSL\)](#) basé en Suisse, qui nous a partagé ses réflexions sur les essais d'essences adaptées au changement climatique, ainsi qu'à Martin Wichmann, basé en Allemagne, pour sa réflexion sur le choix des provenances de Douglas ainsi que sur les densités de plantation.

Les documents de référence cités tout au long de ce rapport sont présentés en fin de document dans la partie bibliographie.

2.1.2. Analyse du dépérissement des plantations : modélisation du risque climatique

2.1.2.1. Jeu de données

Ce travail de modélisation du risque de dépérissement dû au changement climatique est basé sur une étude du Département de Santé des Forêts (DSF) réalisée à l'automne 2018 au cours de laquelle le taux de reprise de 229 placettes de Douglas plantées entre novembre 2017 et mai 2018 a été observé.

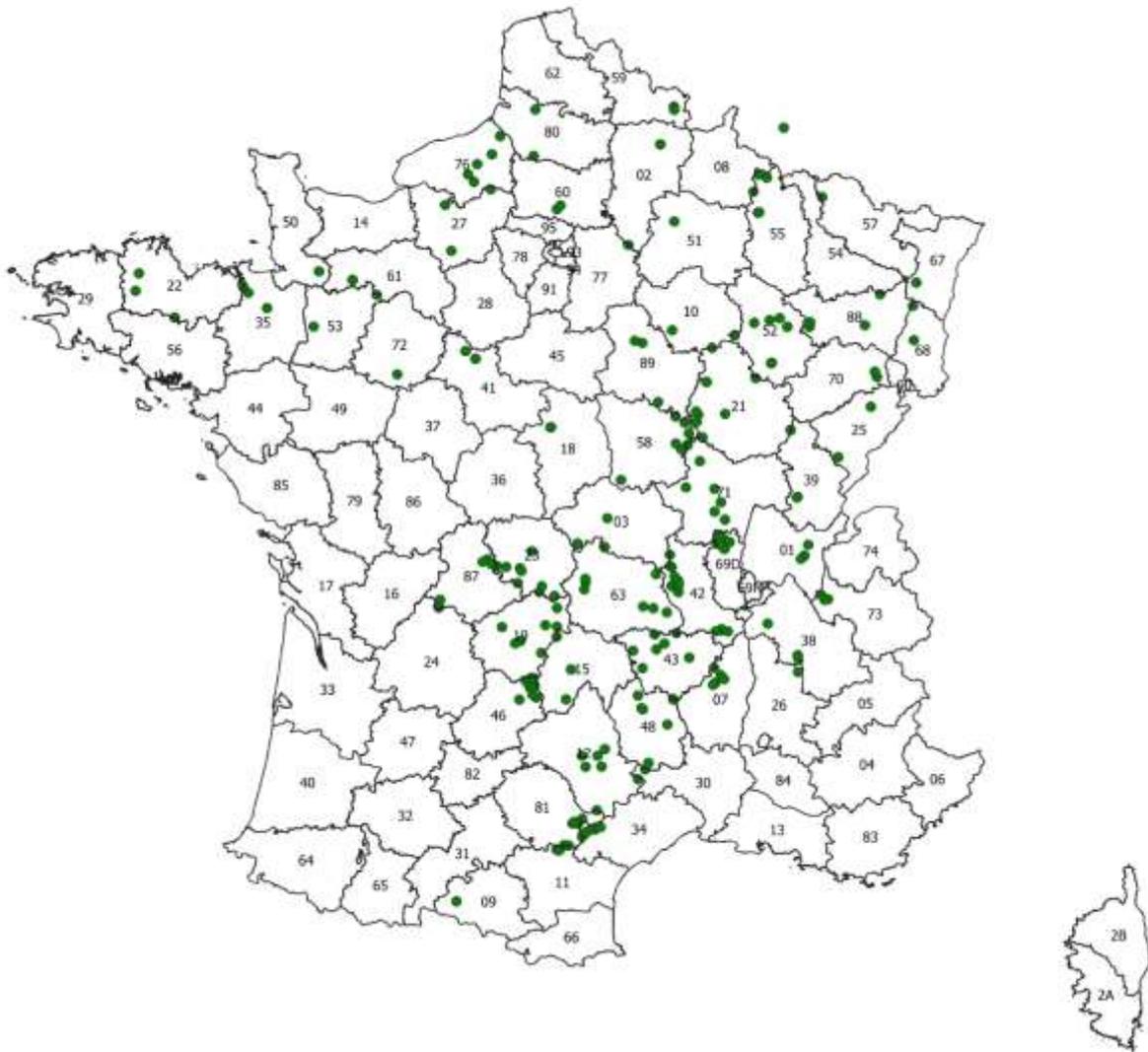


Figure 39 : Emplacement des 229 placettes DSF ayant servi de base à la modélisation.

2.1.2.2. Traitement des données

En vue d'effectuer un travail de modélisation visant à corréliser la mortalité du Douglas des plantations aux caractéristiques topo-climatiques issues de NORCLIS (CNPF) et SAFRAN (Météo France) pour l'année 2018, nous avons calculé en tout 255 variables explicatives potentielles. Elles sont données en annexe.

Trois variables TM_{corr} , TN_{corr} et TX_{corr} correspondant respectivement aux températures T_Q , $TINF_H_Q$ et $TSUP_H_Q$ corrigées à partir de relevés stationnels Météo France ont été calculées :

$$\begin{aligned}
 TX_{corr} &= TX - 19,38 + 0,23 \times \text{MoisVeg} - 0,49 \times TN01 + 0,70 \times TMAN + 0,0013 \times \text{Alt}_{saf} \\
 &\quad - 0,059 \times X_{4326} + 0,27 \times Y_{4326} \\
 TN_{corr} &= TN - 16,07 - 0,51 \times \text{MoisVeg} - 0,41 \times TN03 + 0,12 \times TX0608 + 0,0030 \times \text{Alt}_{saf} \\
 &\quad + 0,22 \times Y_{4326} \\
 TM_{corr} &= (TX_{corr} + TN_{corr})/2
 \end{aligned}$$

MoisVeg = 0 ou 1. Les mois de végétation (*MoisVeg*) vont de mai à septembre.

Ces valeurs de températures corrigées ont été substituées aux températures fournies par SAFRAN qui sont fortement lissées (en raison de la résolution du maillage : 8km) et donc biaisées.

Pour chaque maille SAFRAN, le nombre de jours successifs sans pluie est calculé. On définit un jour sans pluie comme un jour pour lequel $P = 0$ ou $P < P-ETP$ d'après Turc. Une période estivale est définie comme une période dont le début ou la fin se situe entre juin inclus et septembre inclus.

Chaque fiche du DSF correspondant à une plantation a été associée à la plus proche maille Safran (sur la base des coordonnées de son centroïde) à l'aide du plug-in *NNJoin* de QGIS.

Pour chaque période sans pluie, on calcule :

- | TM_som : somme de TM_{corr} en degrés-jours (dj)
- | TM_max : valeur maximale de TM_{corr} (°C)
- | TX_som : somme de TX_{corr} en degrés-jours (dj)
- | TX_max : valeur maximale de TX_{corr} (°C)
- | TN_som : somme de TN_{corr} en degrés-jours (dj)
- | TN_max : valeur maximale de TN_{corr} (°C)
- | $Humid_som$: somme de l'humidité relative (%)
- | $Humid_max$: valeur maximale de l'humidité relative (%)
- | $VitesseVent_som$: somme de la vitesse du vent (m/s)
- | $VitesseVent_max$: valeur maximale de la vitesse du vent (m/s)
- | ETP_Turc_som : somme de l'ETP calculée d'après Turc (mm)
- | ETP_Turc_max : valeur maximale de l'ETP de Turc (mm)
- | $PETP_Turc_som$: somme de P-ETP de Turc (mm)
- | $PETP_Turc_max$: valeur maximale de P-ETP de Turc (mm)
- | $Rvis_Whm2_som$: somme du rayonnement visible (Wh/m^2)
- | $Rvis_Whm2_max$: valeur maximale du rayonnement visible (Wh/m^2)

7

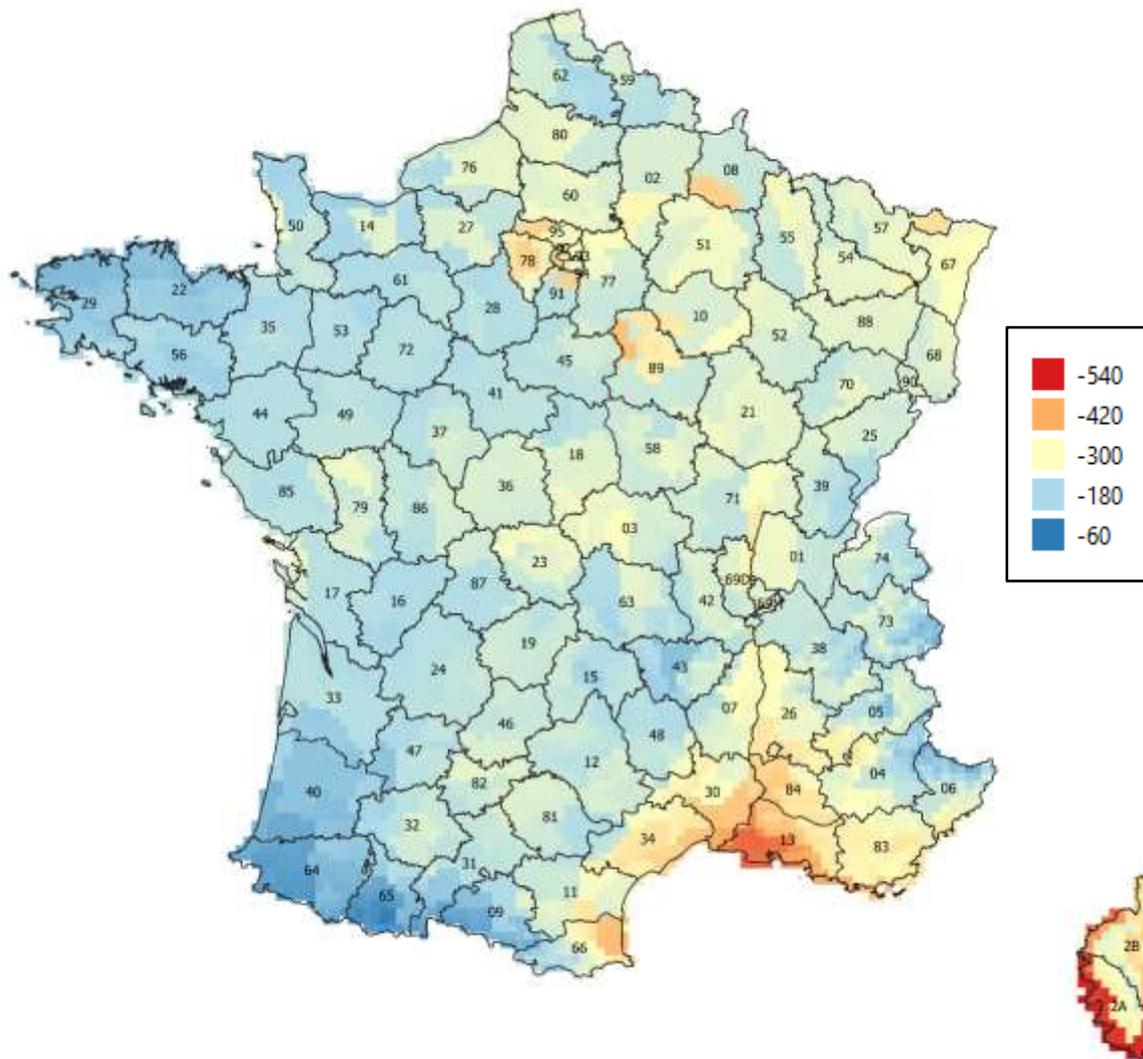


Figure 40 : Somme du bilan hydrique en mm ($P-ETP$ calculé d'après Turc) des périodes sans pluie situées entre avril et juin 2018. Données SAFRAN (Météo France). Résolution : 8km.

2.1.2.3. Recherche de variables explicatives

Afin d'établir un modèle de risque topo-climatiques, nous avons cherché parmi les 255 variables explicatives potentielles celles étant le mieux corrélées au dépérissement qui a été défini comme un taux de mortalité de 15% minimum, soit un taux de reprise inférieur ou égal à 85%.

C'est la fonction logistique pas à pas ascendante qui a permis d'identifier les variables les mieux corrélées au dépérissement :

- PETP_Turc_som_sspluie_0406 (mm) : somme de P-ETP (Turc) sur l'ensemble des périodes sans pluie d'avril à juin 2018 ;
- ALTITUDE (m) : altitude NORCLIS (MNT 75m) ;
- IKRL (sans unité) : indice de luminosité fonction de la latitude, de l'exposition et de la pente.

Le tableau ci-dessous est la matrice de confusion du modèle logistique. Il montre que sur 114 placettes saines (dont le taux de reprise est supérieur à 85%), le modèle en a classé 81 correctement et 33 ont été classées dépérissantes. De même, sur 103 placettes dépérissantes, 69 ont été correctement catégorisées et 34 incorrectement.

Cela aboutit à un taux général de bon classement de 69%.

	Sains	Dépés	Total
Sains	81	33	114
Dépés	34	69	103
Total	115	102	217

Figure 41 : Table de confusion du modèle.

La fonction logistique s'exprime ainsi :

$$\text{MOD_LOGIT} = -9,21$$

$$- 1,59.10^{-2} \times \text{PETP_Turc_som_sspluie_0406}$$

$$- 2,12.10^{-3} \times \text{ALTITUDE}$$

$$+ 6,74 \times \text{IKRL}$$

On observe que le bilan hydrique ainsi que l'altitude sont des facteurs compensant le risque contrairement à l'indice de luminosité IKRL qui l'aggrave.

La transformation de la fonction logistique aboutit à la probabilité de dépérissement d'après la méthodologie BioClimSol : $RISQUE = 1/(1 + \exp(-MOD_LOGIT)) \times 10$

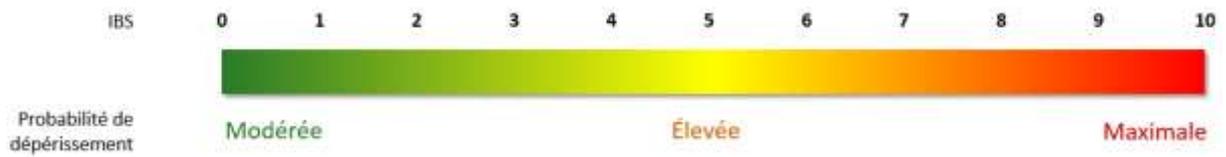


Figure 42 : Probabilité de dépérissement en fonction de l'indice BioClimSol entre 0 et 10.

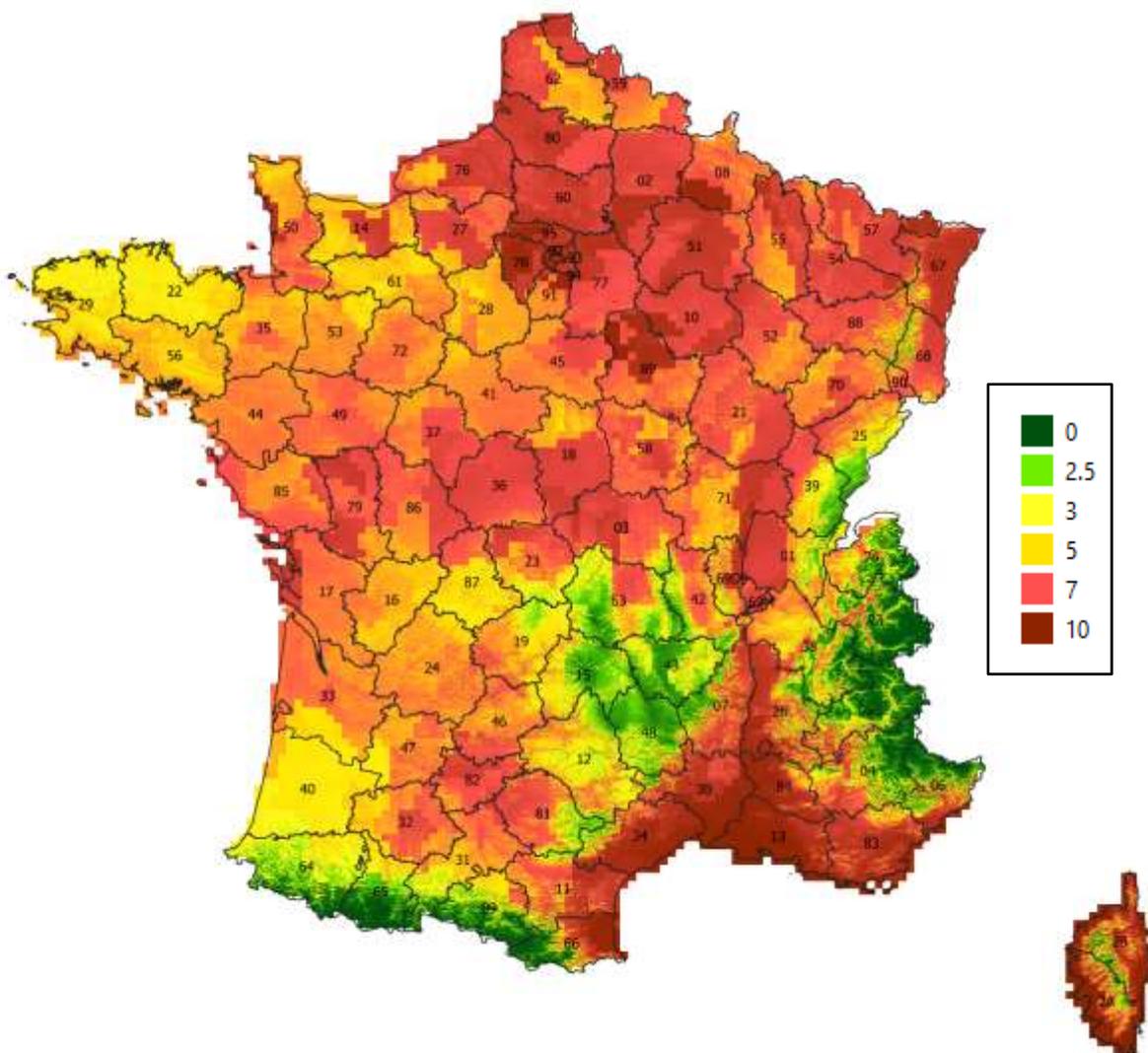


Figure 43 : Carte topo-climatique de risque de dépérissement des plantations en 2018. Résolution : 75m.

Les pixels de la carte de risque sont dus à la résolution grossière de la maille SAFRAN qui est de 8km.

2.1.3. Cartes de Vigilance climatique

2.1.3.1. Conception des cartes et utilisation

Les cartes de vigilance climatique pour le Douglas ont été élaborées à l'aide du logiciel R, à partir des données climatiques du modèle NORCLIS.

- On établit tout d'abord une carte d'Indice BioClimSol (IBS) avec les éléments suivants :

PENTE (%) pente exprimée en % ici le MNT à 75 m
%DEF_HYD (%) pourcentage d'années à fort déficit hydrique climatique
P-ETP0608 (mm) déficit hydrique climatique sur la période de juin à août (ETP Turc) 1981-2010
RU150 (mm) réservoir utile en eau dans les 150 premiers centimètres de sol suivant le modèle Jamagne, sans éléments grossiers. Trois niveaux de réservoir utile en eau (RUE150) sont fixés : **FAIBLE (90MM)**, **MOYENNE (130MM)**, **ELEVEE (170MM)**.

- Estimation de l'indice de vigilance en fonction de l'IBS :

Une fois le calcul de l'IBS finalisé, on cartographie la vigilance à l'aide d'une l'équation.

En faisant le calcul pour les 3 scénarios climatiques 0°C, +1°C, +2°C (valeurs climatiques fixées par rapport aux normales 1981-2010), et pour les 3 niveaux de RUE, on obtient en sortie 9 rasters de vigilance pour le douglas :

Ces rasters sont utilisés dans ce rapport pour réaliser les cartes de vigilance pour le Douglas en Bourgogne, présentées ci-après.

- Précautions d'utilisation et lecture des cartes :

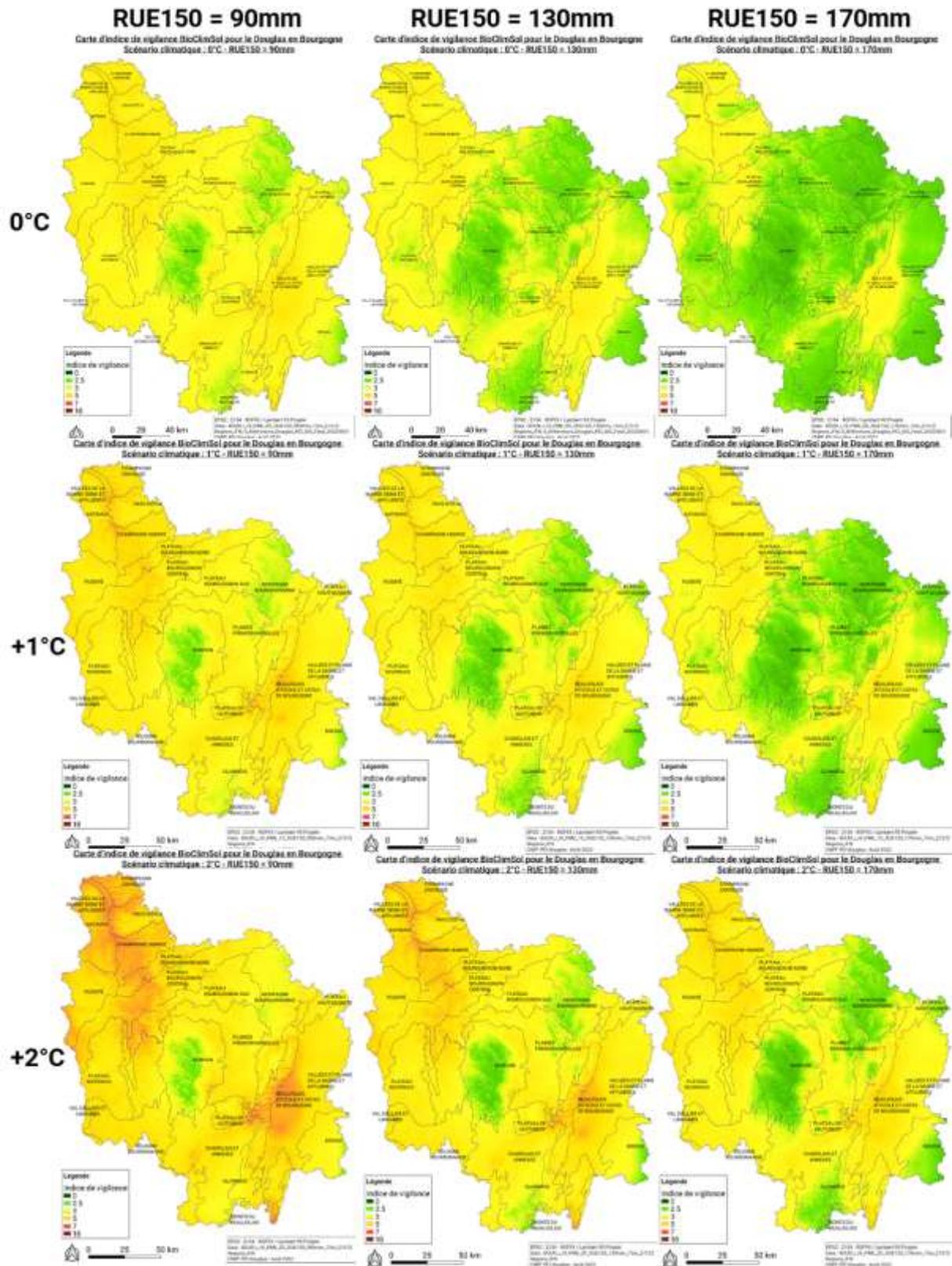
Les cartes sont mises en forme de manière standard selon un code couleur qui indique le niveau de vigilance. Le niveau de vigilance se rapporte à la **PROBABILITE DE DEPERISSEMENT STANDARDISEE**, soit la probabilité de présence d'au moins 20 % des tiges avec plus de 50 % de perte foliaire ou de ramification (Classe D, E ou F protocole DEPERIS). La figure ci-dessous présente le rapport entre niveau de vigilance et probabilité de dépérissement.

NIVEAU Vigilance		PROB DEPE STANDARDISE*
MAXIMALE	10	87
MAXIMALE	9	78.3
ELEVEE	7	60.9
ELEVEE	4	34.8
MODEREE	3	26.1
MODEREE	0	0

Par ailleurs, les données climatiques utilisées ont une précision de 75 mètres. Il est délicat de donner des interprétations fines à l'échelle de la parcelle forestière sur la base de ces cartes.

ATTENTION : Les cartes présentées dans les pages suivantes sont des **outils de visualisation et d'aide à la décision** qui ne se substituent pas au diagnostic de terrain. Les conditions stationnelles locales peuvent fortement influencer sur les potentialités d'une station.

2.1.3.2. Cartes de la région Bourgogne



2.1.3.3. Analyse et recommandations

Le choix des sites ayant comme objectif de couvrir un panel de situations variées dans lesquelles le douglas est présent et dont les enjeux face aux changements climatiques sont importants, trois types de situation ont ainsi été définis en sachant que la RU150 peut modifier, en positif ou négatif, l'adaptation du douglas à ces situations :

- Situation défavorable au douglas

Station de plaine souvent d'altitude inférieure à 400 m d'altitude pour des RU 150 inférieures à 150mm avec un IBS+2 de 5. Le douglas n'est plus adapté et des essences de substitution doivent être envisagées.

- Situation non optimum pour le douglas

Station souvent comprise entre 400 et 600 m d'altitude pour des RU150 comprise entre 90mm et 150mm et un IBS+2 de 4. Le douglas peut éventuellement être envisagé sous condition de l'introduire en mélange avec d'autres essences supposées plus résistantes au stress hydrique.

- Situation optimum pour le douglas

Station d'altitude supérieure à 600 m avec un IBS+2°C de 2 et 3. Les différentes sylvicultures du douglas peuvent être envisagées.

2.2. Evaluer l'effet de la fertilité des sols et de la sylviculture sur la capacité du douglas à faire face au changement climatique

Les résultats présentés dans cette partie sont provisoires, l'ensemble des analyses de sols nécessaire à l'étude n'étant pas disponibles à la date d'écriture du rapport. Ces résultats préliminaires nous permettent de présenter quelques pistes concernant les facteurs influençant le potentiel de nitrification dans les sols sous Douglas. Ces résultats devront être consolidés et revus lorsque toutes les analyses de sol seront disponibles

Auteurs

Alexia Paul, Arnaud Legout (INRAE-BEF Nancy)

2.2.1. Introduction

Le douglas a été introduit il y a près de 200 ans en Europe en provenance de l'ouest de l'Amérique du Nord. Il est réputé pour la rapidité de sa croissance, la qualité de son bois et sa bonne résistance aux maladies. En France, les peuplements de douglas couvrent environ 420 000 hectares et cette couverture est en expansion, 80% de la production étant située dans le massif central et dans le Morvan. Les peuplements de douglas sont généralement développés sur des sols acides à faible fertilité minérale, où les ressources nutritives à disposition sont un des facteurs clés régissant la croissance des peuplements. Peu de travaux se sont intéressés à ce jour à l'effet du douglas sur l'environnement et ces effets doivent aujourd'hui être précisés afin de garantir la durabilité et le bon fonctionnement de ces écosystèmes et des services associés.

Les effets de la substitution d'espèces natives d'Europe par le douglas ont déjà fait l'objet de quelques travaux. Parmi ces effets, des changements de l'abondance et de la diversité de la faune, de la flore et des champignons (Tschopp et al. 2014; Schuldt and Scherer-Lorenzen 2014), du stock des matières organiques et des litières ont été observés (Augusto 1999; Prietzel and Bachmann 2012). Plus inattendues, des modifications du cycle de l'azote ont été mises en évidence sur des plantations de douglas en France, avec une production de nitrate qui semble être excédentaire comparée à d'autres systèmes forestiers (Legout et al. 2016; Zeller et al. 2019). La préservation voire l'amélioration de la fertilité des douglasaies est l'une des composantes qui permettra à cette essence de résister et/ou s'adapter au changement climatique et aux risques sanitaires associés.

L'objectif général de cette tâche est donc de documenter et d'évaluer les effets du douglas sur la fertilité chimique des sols en France, la disponibilité en éléments nutritifs sur le long terme ainsi que la qualité des eaux de surface, afin de garantir la durabilité et le bon fonctionnement de ces écosystèmes et des services associés. Les objectifs détaillés sont :

- i) Etudier les concentrations et les flux de nitrates circulant dans les sols sous douglas en Bourgogne et plus généralement en France, par l'intermédiaire d'un réseau de placettes instrumentées ;

2.2.3. Impact du Douglas sur la qualité des eaux de surface à l'échelle du bassin versant

Deux bassins versants se situant dans le Morvan ont été sélectionnés pour cette étude. Le premier (Lat : 47.2955, Long : 47.2933) d'environ 5.5km² est une tête du bassin versant de la Cure traversé par le ruisseau du Breuil. Les précipitations annuelles moyennes sont de 1170mm, la température annuelle moyenne est de 10°C et l'évapotranspiration potentielle annuelle moyenne est de 800mm (de 2010 à 2020). Couvert par différentes essences, nous avons sélectionné quatre sous-bassins versants dominés par 1) des épicéas, 2) des feuillus, 3) du douglas et 4) une coupe-rase.

Le deuxième bassin versant, Haute-Roche, est également une tête du bassin de la Cure (lat : 47.3294, Long : 3.9580), de 3.5 km², situé à 10km au nord-ouest du Breuil et il présente les mêmes conditions climatiques. Ce bassin versant est traversé par le ruisseau des Paluds qui se jette dans la Cure. Nous avons sélectionné à Haute-Roche trois sous-bassins versants couverts par 1) du Douglas, 2) une prairie permanente et 3) une forêt d'épicéas et d'aulnes qui a été partiellement coupée.

Les eaux de surface ont été prélevées toutes les quatre semaines de janvier 2019 à décembre 2021, à l'exutoire des sous-bassins versants et dans le cours d'eau principal pour l'analyse des concentrations en anions et en cations majeurs.

Une campagne de prélèvement de sol a été également menée en novembre 2020. Six profils de sol (de 0 à 40 cm) ont été collectés sur chaque sous-bassin versant : quatre profils en milieu de pente et deux profils en bas de pente, de part et d'autre du ruisseau. Les caractéristiques chimiques et physiques du sol ont été analysées sur les échantillons de sol collectés (0-10cm, 10-25cm et 25-40cm). En plus des échantillons prélevés en 2020, les horizons 0-10cm ont également été prélevés en juin 2019 et novembre 2019. Les concentrations en nitrate et en ammonium ont été mesurées dans les sols issus de ces 3 campagnes de prélèvement après extraction au K₂SO₄ (0.5M ; 200ml pour 40g de sol). L'activité nitrifiante des sols (NEA) a également été mesurée afin de déterminer les processus qui contrôlent la production et la transformation des nitrates dans les sols. L'activité nitrifiante a été mesurée en incubant 3g de sol sec en aérobie avec 6ml d'une solution de (NH₄)₂SO₄. La concentration en nitrate au cours du temps est mesurée par chromatographie ionique. Le potentiel de dénitrification brut a été mesuré par chromatographie gazeuse dans des conditions anaérobiques (l'air est remplacé dans les tubes par de l'hélium et de l'acétylène) après avoir ajouté du glucose (0.5mgC/g), de l'acide glutamique (0.5mgC/g) et du KNO₃ (50µgN/g) à 10g de sol (équivalent sec). L'ADN de 0.5g de sol a également été extrait en utilisant le Kit NucleoSpin® Soil : une quantification des gènes d'intérêt a ensuite été faite par qPCR (voir méthode Florio et al. 2021).

Les résultats de ce volet ont permis de comparer l'effet du douglas avec d'autres essences forestières, une prairie et une coupe-rase sur la qualité des cours d'eau à l'échelle du petit bassin versant. Un lien a également pu être établi entre les processus impliquant la production de nitrate dans les sols de chaque sous-bassin versant et les concentrations en nitrate retrouvées dans les ruisseaux. Les résultats détaillés de ce volet sont disponibles sur demande.

Les deux premiers volets ont mis en évidence les effets du douglas sur la fertilité des sols et sur la qualité des eaux de surface mais il existe une grande variabilité de ces effets en fonction notamment des paramètres pédo-climatiques intrinsèques aux peuplements. Le troisième volet s'intéresse tout particulièrement aux facteurs qui modulent la nitrification dans les sols de douglasaies.

2.2.4. Facteurs modulants de la nitrification dans les peuplements de Douglas

Afin de mieux étudier et comprendre les facteurs qui modulent la nitrification dans les peuplements de douglas, nous avons sélectionnés 89 sites dans les trois grandes régions de production française : Bourgogne, Limousin et Vosges. Ces sites présentent une grande diversité de géologie, type de sol, climat, altitude, âge et densité de peuplement.

En novembre 2021, 5 prélèvements de sol ont été effectués sur chacun des 89 sites. Les horizons de surface (0-10cm) a été conservés et traités individuellement, les horizons profonds (10-25cm et 25-40cm) ont quant à eux été regroupés en mélangeant les 5 échantillons collectés pour chaque profondeur. Après avoir mesuré son épaisseur, la litière a été prélevée dans un carré de 31cm*31cm. Sur chaque site, la surface terrière (G) a été estimée au relascope.

Les nitrates et l'ammonium dans les horizons de surface (0-10cm) ont été extraits avec une solution de K₂SO₄ à 0.5M (200ml pour 40g de sol) dès le retour au laboratoire. Ces mêmes sols ont été incubés à 20°C à la capacité au champ pendant 42jours. Les nitrates et l'ammonium ont été extraits après 7 jours de pré-incubation puis à 0, 21 et 42 jours après incubation. Le potentiel de nitrification de chaque échantillon a été calculé en faisant la différence entre la concentration en nitrate à 42j et celle à 0j. Le résultat est donné en mg/kg de sol sec/jour.

Les caractéristiques physiques du sol (humidité du sol et granulométrie) et chimiques (pH, C et N totaux, P disponible, CEC (capacité d'échange cationique) et cations échangeables) ont été déterminées au laboratoire d'analyse des sols INRAE d'Arras pour chaque échantillon sol. Les paramètres climatiques associés à chaque site (température, ETP, précipitations) ont été fournis par Météo-France.

Les résultats confirment la très grande variabilité du potentiel de nitrification dans les sols des douglasaies et l'analyse statistique des relations entre le potentiel de nitrification et les facteurs pédologiques, climatiques et ceux liés au peuplement nous ont permis de mettre en évidence les combinaisons de paramètres qui atténuent ce potentiel. Ces résultats arrivés très récemment sont en cours de consolidation. Les résultats détaillés de ce volet sont disponibles sur demande.

En l'état actuel des connaissances et malgré les besoins de recherche supplémentaire, quelques pistes de recommandations ont pu être établies. Les résultats obtenus dans le cadre de cette étude permettront à terme d'élaborer des recommandations pour la gestion durable des douglasaies en Bourgogne et plus généralement en France. Néanmoins, pour déterminer des modalités précises de sylviculture, cette étude pointe la nécessité d'élargir et de prolonger les recherches engagées sur l'impact du douglas sur la fertilité des sols et des eaux de surface, en étudiant en particulier i) l'effet du mélange du douglas avec d'autres essences à l'échelle de la placette ou du bassin versant, ii) l'effet de l'âge et de la densité du peuplement, iii) l'effet des structures irrégulières et iv) l'effet de l'amendement calco-magnésien.

2.3. Impact de la sylviculture sur le bilan carbone et la biodiversité générale

2.3.1. Carbone

2.3.1.1. Contexte

Les enjeux d'atténuation du changement climatique placent la forêt dans un rôle central de puits de carbone et de pourvoyeur de bois, matériau « bas carbone » par nature. La stratégie Nationale Bas Carbone implique une prise en compte de l'impact « carbone » des orientations de gestion. Le carbone de la biomasse forestière est bien connu et suivi par inventaire de gestion ou à de larges échelles par l'inventaire forestier national. Les sols forestiers contiennent d'importants stocks de carbone, difficilement mesurables. Les recherches récentes lèvent cependant certains verrous de connaissance sur le lien entre les pratiques de gestion et les stocks de carbone du sol (Augusto et al., 2019). Il est admis qu'en forêt gérée, les stocks de carbone du bois mort sont d'un ordre de grandeur moins importants que les stocks de bois sur pied et dans le sol (Roux et al., 2017). Il n'en demeure pas moins intéressant de connaître l'impact de différentes pratiques de gestion sur le carbone du bois mort au sol (BMS).

2.3.1.2. Méthode

Un inventaire du bois mort au sol a été adjoint au protocole de mesure des placettes du projet.

N°	Nom Forêt / propriétaire	Commune	Stade de décomposition	Nombre	Nombre	Nombre	Nombre	Nombre	Nombre	Nombre	Nombre	Nombre	Nombre	Nombre	Nombre	Nombre	Nombre	Nombre	Nombre	Nombre	
				de BMS de classe 5	de BMS de classe 10	de BMS de classe 15	de BMS de classe 20	de BMS de classe 25	de BMS de classe 30	de BMS de classe 35	de BMS de classe 40	de BMS de classe 45	de BMS de classe 50	de BMS de classe 55	de BMS de classe 60	de BMS de classe 65	de BMS de classe 70	de BMS de classe 75	de BMS de classe 80	de BMS de classe 85	
1	Pierre Girard	Antully	Sain		4	1	1														
	Pierre Girard	Antully	Intermédiaire			1	1														
	Pierre Girard	Antully	Pourri				2														
2	Les grandes fosses	Bussy en Othe	Sain		1					1											
	Les grandes fosses	Bussy en Othe	Intermédiaire		6	1															
	Les grandes fosses	Bussy en Othe	Pourri		1																
3	GF de Chaumont	Mornay	Sain																		
	GF de Chaumont	Mornay	Intermédiaire																		
	GF de Chaumont	Mornay	Pourri		1																
4	Argoulais	Montsauche	Sain		1																1
	Argoulais	Montsauche	Intermédiaire		2																
	Argoulais	Montsauche	Pourri				2	1													
5	GF du Grand Champ	Montsauche	Sain		3																
	GF du Grand Champ	Montsauche	Intermédiaire		6	1															
	GF du Grand Champ	Montsauche	Pourri		2						1					1					
6	Marcel Tachot	Misery	Sain																		
	Marcel Tachot	Misery	Intermédiaire		1	1															
	Marcel Tachot	Misery	Pourri		5																
7	De Ganay	Lucenay l'évêque	Sain																		
	De Ganay	Lucenay l'évêque	Intermédiaire			4															
	De Ganay	Lucenay l'évêque	Pourri		5	1	1														
8	Bon Rupt	Saint-Léger-Vauban	Sain		2	1															
	Bon Rupt	Saint-Léger-Vauban	Intermédiaire		1	3															
	Bon Rupt	Saint-Léger-Vauban	Pourri		5	5															
9	Dardin	Montbard	Sain		2																
	Dardin	Montbard	Intermédiaire		1																
	Dardin	Montbard	Pourri		5																
10	Beaudesson	Broye	Sain																		
	Beaudesson	Broye	Intermédiaire		1			1													
	Beaudesson	Broye	Pourri																		

Figure 44 : Extrait de l'inventaire du bois mort au sol par placette

On applique la méthode de la « ligne d'intersection » (Harmon et Sexton, 1996). Deux transects perpendiculaires de 50 m seront établis depuis le centre de la placette. Sur chacun de ceux-ci, on note le diamètre de chaque pièce de bois mort rencontrée, ainsi que son état de décomposition selon les 3 classes : sain, intermédiaire ou pourri. Pour déterminer le stade de décomposition, on utilise la « méthode de la machette » comme recommandé par le GIEC (2003). Le volume par hectare de bois mort au sol est calculé pour chacun des stades de décomposition défini ci-dessus grâce à la formule suivante :

$$\text{Volume (m}^3/\text{ha)} = \frac{11 \times (d_1^2 + d_2^2 + \dots + d_n^2)}{8L}$$

avec :

- d_i est le diamètre de la pièce de bois mort i
- n est le nombre total de pièces de bois mort rencontrées au sol sur le transect
- L est la longueur du transect (ici deux fois 50 m soit 100 m)

On en déduit alors les stocks de carbone par hectare :

Stocks de carbone (tC/ha) (par classe de décomposition) = 0,475 * infradensité * FRD * Volume

Avec : infradensité = 0,43 (infradensité du douglas, IGN, d'après Dupouey, 2002)

FRD (Facteur de réduction de la densité) :

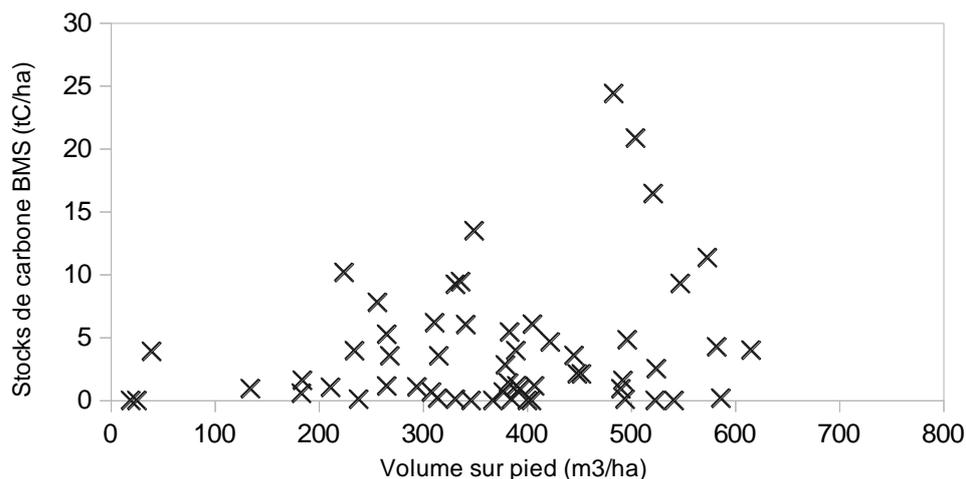
Classe de décomposition	Facteur de réduction de la densité (FRD)	Source
Sain	0.93	Harmon et al., 2011 ; bois mort au sol résineux ; classe 1
Intermédiaire	0.70	Harmon et al., 2011 ; bois mort au sol résineux ; classe 3
Pourri	0.40	Harmon et al., 2011 ; bois mort au sol résineux ; classe 4

Les stocks de carbone totaux BMS sont obtenus ensuite en sommant les stocks de carbone des 3 classes de décomposition.

2.3.1.3. Résultats

L'analyse des résultats montre une importante variabilité du stock de carbone BMS : 19 placettes sur 57 comportent moins de 1 tC/ha, alors que 3 placettes se démarquent avec plus de 15 tC/ha. Le maximum atteint est de 24 tC/ha. La valeur moyenne est de 4 tC/ha. A titre de comparaison, on estime que la valeur moyenne BMS et bois mort sur pied en forêt métropolitaine est de 7 tC/ha (MAA et IGN, 2021).

Le graphique suivant montre les stocks de carbone BMS mesurés dans cette étude en fonction des volumes de bois sur pied.



Il n'a malheureusement pas été possible d'étudier plus en détail le lien entre les stocks de carbone BMS et d'autres caractéristiques des placettes comme leur structure ou leur âge. Les données récoltées ici pourront être mobilisée dans de futurs travaux visant à étudier ce lien.

2.3.2. ARCHI

On observe dans les graphiques ci-dessous que le pourcentage d'arbres sains varie en fonction de l'indice de vigilance BioClimSol dans chaque scénario, 0°C, +1°C et 2°C. Sur un échantillon d'une centaine de placettes, ce résultat renforce la validité du modèle BioClimSol pour le Douglas tel que développé par l'IDF.

On note cependant une note moyenne s'établissant aux alentours de 50% d'arbres sains pour les peuplements se situant à des indices de vigilance BioClimSol de 2 à 5 (figure 29). Ceci semble indiquer un état général des peuplements de Douglas en Bourgogne relativement dégradé bien que pas encore « dépérissant » au sens du DSF.

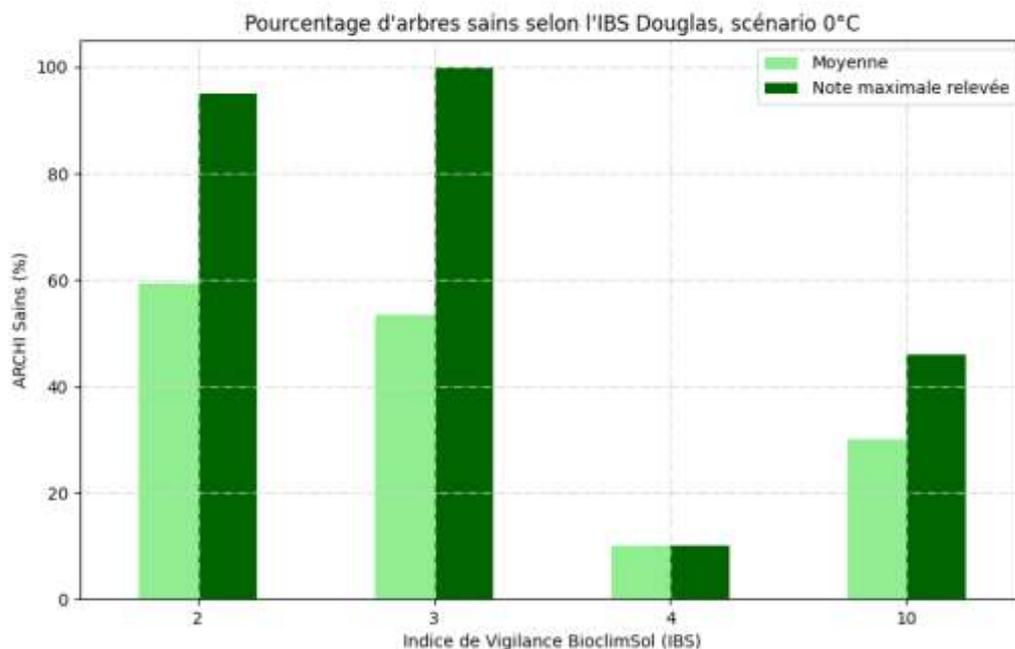


Figure 45: Pourcentage moyen et maxima d'arbres "Sains" selon l'indice de vigilance BioClimSol, scénario climatique 0°C

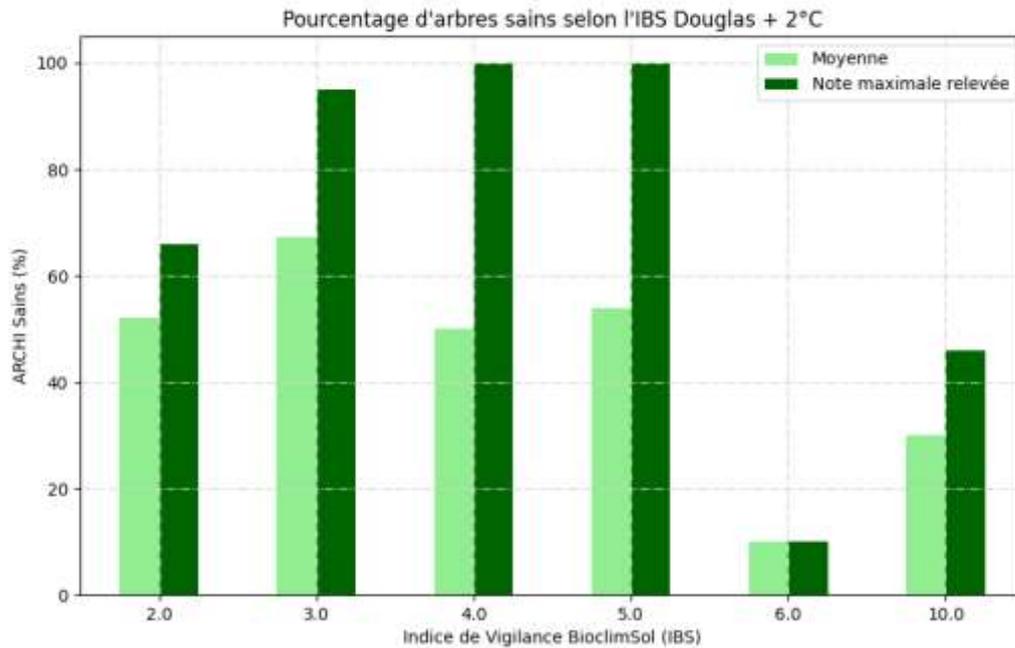


Figure 46 : Pourcentage moyen et note maximale d'arbres "Sains" en fonction de l'indice de vigilance BioClimSol, scénario climatique +2°C

2.3.3. IBP

2.3.3.1. Influence d'un IBP fort sur la résilience des peuplements

La figure 28 présente les moyennes et les maxima des notes IBP pour chaque itinéraire sylvicole étudié.

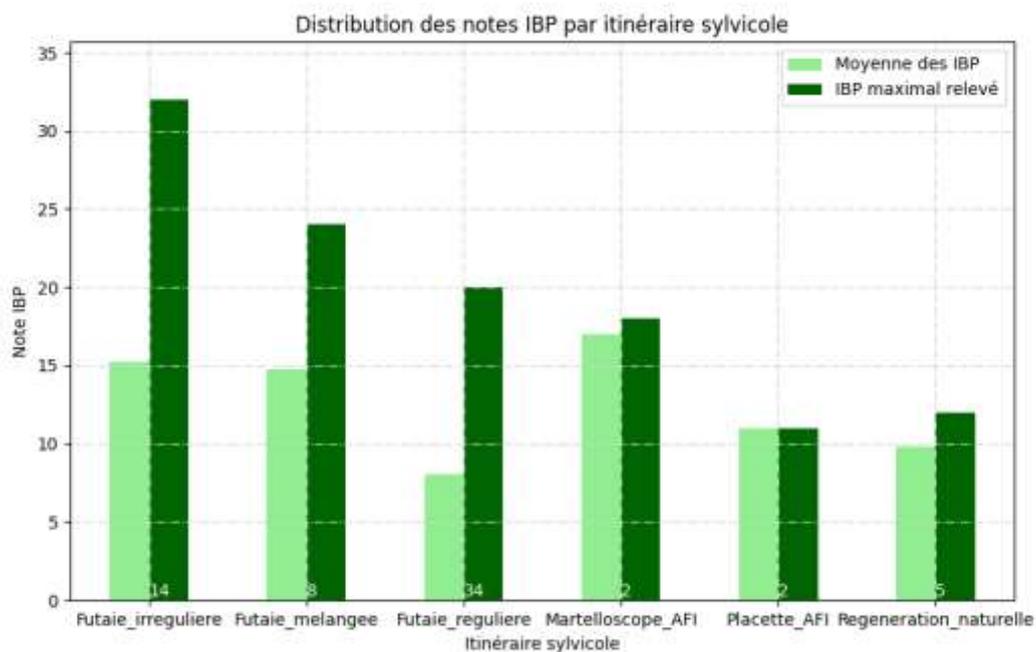
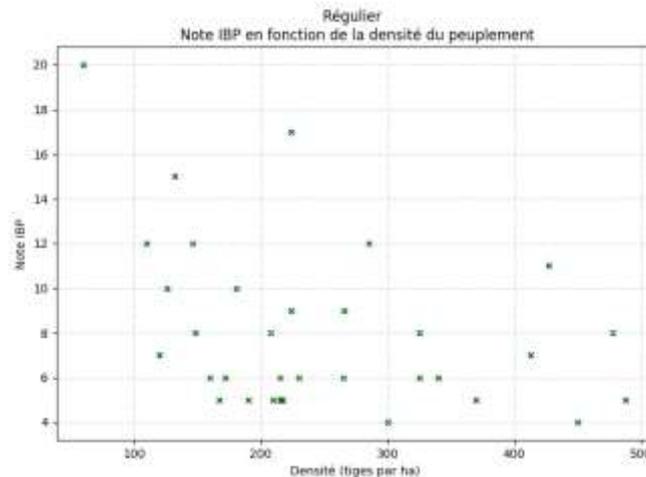


Figure 47 : Moyennes des notes IBP en fonction de l'itinéraire sylvicole

Sur le réseau de placettes installé, on constate que les notes d'IBP varient selon l'itinéraire sylvicole pratiqué. En moyenne, la note IBP est de 15 en futaie irrégulière ou en peuplement mélangé, alors qu'elle est de 7 en futaie régulière.

Cet indice est significativement plus fort sur des placettes en futaie irrégulière et en peuplement mélangé qu'en futaie régulière.

Dans le cas de peuplements réguliers, on observe une légère tendance à une diminution de la note IBP avec la densité. Plus la densité est élevée, plus la note IBP sera faible.



On observe une amélioration conséquente de la note IBP dans les peuplements dont la structure est irrégularisée ainsi que dans les peuplements issus de mélanges à la plantation.

Les raisons de l'augmentation de la capacité d'accueil de la biodiversité sont variées :

- | L'étagement de la végétation ;
- | la diversité d'essences, souvent avec des essences autochtones ;
- | une quantité plus importante de bois mort au sol de grandes dimensions.

Un IBP important est un marqueur d'une résilience possible face aux attaques de ravageurs (diversité des essences), face aux tempêtes (diversité des classes d'âges et donc de hauteurs).

2.3.3.2. Pistes d'amélioration de la capacité d'accueil potentielle de la forêt

Dans la sylviculture courante, des gestes simples peuvent être recommandés :

- | travailler au profit des essences minoritaires dans le peuplement ;
- | éclaircir par le haut, ce qui prolonge la vie productive du peuplement en place ;
- | réaliser des cloisonnements d'exploitation, qui éviteront le tassement du sol ;
- | conserver les branches (houppiers) après une coupe et ne pas exporter de biomasse ;
- | conserver les gros bois mort ;
- | conserver des arbres sur pied porteurs d'habitats pour la faune (souvent arbres de faible valeur marchande) ;
- | conserver un certain nombre de bois morts sur pied de gros diamètre (1/ha) ;
- | maintenir des ouvertures d'espaces (clairières) au sein du peuplement (surface terrière basse) ;
- | aménager ou restaurer des mares ou points d'eau, au sein d'une parcelle.

Quelques recommandations sylvicoles

Lors du marquage des coupes, favoriser les essences minoritaires (alisiers, merisiers, érables...) pour leur valeur économique, patrimoniale, leurs fruits et leur capacité d'adaptation au changement climatique.

En plantation, installer deux ou trois essences nobles dont la vitesse de croissance est similaire à celle de l'essence objective pour réduire la complexité de gestion. L'introduction de quelques plants de fruitiers et feuillus divers est encouragée. S'il n'envahit pas la cime des arbres, conserver le lierre dont les fleurs, feuilles et fruits présents en hiver servent à nourrir les cervidés, oiseaux et hyménoptères. L'objectif est de produire du bois d'œuvre de qualité le plus rapidement possible et à moindre coût.

La résilience des peuplements mélangés est meilleure que les peuplements mono-spécifiques après une forte perturbation (incendie ou tempête). La diversification des essences permet également de diminuer l'impact de la mévente de certaines espèces au cours du temps, et à l'inverse, de répondre aux opportunités de marché.

La présence de milieux humides est un facteur important dans la note IBP. Préserver les mares forestières et ripisylves en ne les traversant pas avec des engins et en n'y entreposant pas de rémanents permet de conserver ces zones de refuge potentielles pour de nombreuses espèces. Maintenir une proportion de feuillus dans les peuplements résineux et conserver les arbres servant de nid permet une augmentation de la capacité d'accueil de la forêt.

De même, une bonne manière de faire monter la note IBP est de conserver les bois morts au sol. Que ce soient les bois de grosses dimension ou les rémanents issus de l'exploitation, ces bois en décomposition permettent d'améliorer le fonctionnement de tout l'écosystème forestier.

Les lisières et milieux ouverts sont également à conserver dans une certaine proportion. Ils accueillent de nombreux prédateurs des parasites forestiers.

Tâche 3

Adapter et renouveler les peuplements pour favoriser leur résilience



3. TÂCHE 3 : Adapter et renouveler les peuplements pour favoriser leur résilience

3.1. Analyse des échecs et réussites des plantations réalisées ces dernières années

Auteurs

Bruno BORDE, Lucas SCHNAPPER (CNPF Bourgogne Franche Comté)

3.1.1. Contexte

La plantation est une phase difficile de la vie d'un peuplement forestier. Les plants quittent la pépinière (milieu très favorable à leur croissance) pour la parcelle forestière, milieu beaucoup plus hostile. Ces jeunes plants peuvent subir des stress divers. Mais au-delà de la qualité des pratiques culturales (travaux de préparation du sol, qualité des plants et plantation, entretien...) des contraintes climatiques contribuent également de plus en plus à des échecs de reprise des plantations forestières comme l'illustre le graphique des réussites de plantation forestière en France, toutes essences confondues.

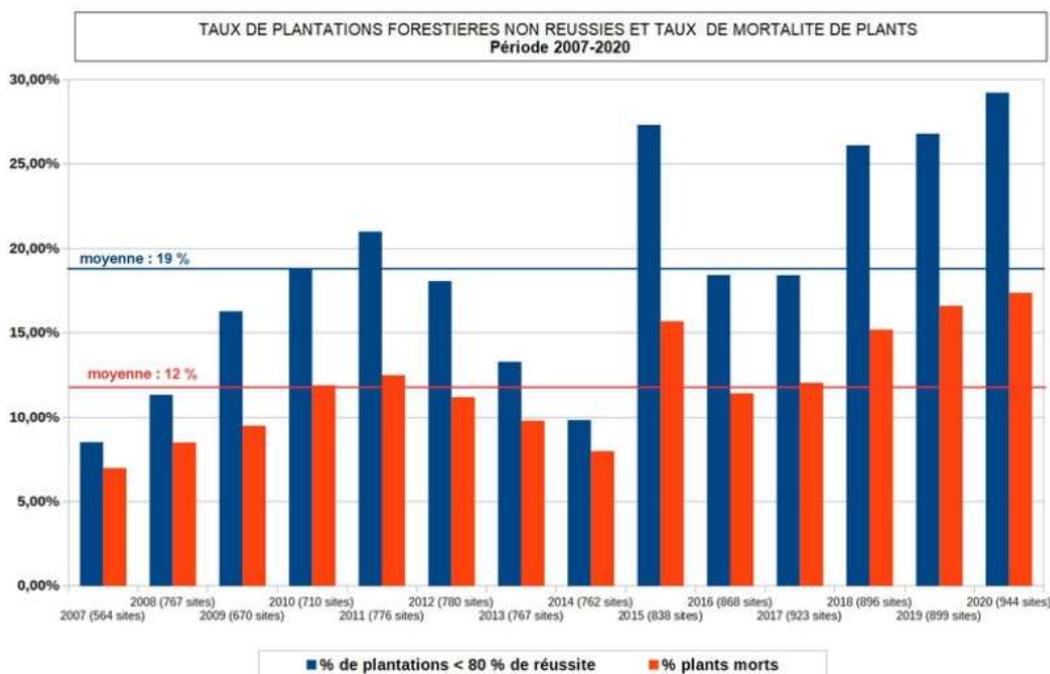


Figure 48 : Taux de plantations forestières non réussies et taux de mortalité de plants, 2007 à 2020 (Source DSF)

Sur la période 2007-2020, selon ces deux indicateurs, l'année 2020, avec 29 % de plantations non réussies et 17% de plants morts, présente le taux d'échec le plus élevé devant l'année 2015 (27%). Avec les années 2018 (26%) et 2019 (près de 27%), elle forme une série inédite de trois années successives de mauvaise reprise des plantations forestières. (Source : DSF)

Depuis le début de son suivi annuel de la réussite des plantations en France, à savoir depuis 2007, le Département santé des forêts (DSF) révèle que les années 2018, 2019 et 2020 sont une série inédite de trois années successives de mauvaises réussites des plantations forestières. L'évaluation 2020 a été faite sur la base de l'observation phytosanitaire par les correspondants observateurs du DSF de 944 plantations de l'hiver 2019-2020 représentant 45 essences différentes. 29 % des plantations n'ont pas réussi ! Le mélèze d'Europe, les chênes sessile et rouge et le douglas sont les essences qui ont le moins bien réussi.

3.1.2. Recueil des informations de 20 plantations

3.1.2.1. Caractéristiques des parcelles retenues

En collaboration étroite avec les propriétaires, gestionnaires et reboiseurs, les plantations de douglas réalisées depuis 2015 ont été recensées pour la Bourgogne et notamment pour le département de la Saône et Loire, où les conditions climatiques de l'été 2015, 2018, 2019 et 2020 ont été à l'origine de nombreux échecs.

Un plan d'échantillonnage (tableau ci-dessous) a permis d'étudier plus précisément certaines parcelles en y recueillant des informations techniques plus complètes. Outre les conditions climatiques, les conditions stationnelles (caractéristiques pédologiques, exposition, topographie) ont également été recherchées.

PEI Douglas - Analyse echec et reussite PLANTATION					
Localisation	Topographie			Sol (20 premier cm)	
Commune (71)	Pente %	Altitude	Exposition (degré)	Texture	Charge en éléments grossiers (%)
LE ROUSSET	8	430	20	LS	0
LE ROUSSET	8	430	20	LS	0
TOULON SUR ARROUX	10	340	270	SL	10
VILLERS EN MORVAN	20	445	245	LS	5
TRAMAYE	18	470	120	LS	5
BERGESSERAIN	25	386	80	LS	0
CHEVAGNY SUR GUY	20%	340	40	SL	5
ST LEGER SS BEUVRAY	30	479	220	LS	0
St MARD DE VAUX	2	475	/	LS	0
St LAURENT ANDENAY	12	427	220	LA	0
MONTAGNY SUR GROSNE	13	420	20	SL	5
SAINT CECILE	30	399	340	LS	5
BURNAND	4	378	20	LS	0
PIERRECLOS	13	489	120	SL	0
TRAMAYES	30	635	360	LS	0
BERGESSERIN	18	463	100	LS	3
MATOUR	23	513	340	LS	0
MATOUR	20	497	25	LS	0
ST MARTIN DE SALENCY	27	428	86	SL	3



Figure 49 : Dégâts sécheresse sur plantation de douglas de 4 ans- Commune de Bergesserin (71) (Photo B. Borde)

3.1.2.2. Conditions climatiques sur la période 2015-2020 en Saône et Loire

Cette période présente le plus fort taux d'échec des plantations toutes essences confondues au niveau national (source DSF). Pour le département de la Saône et Loire, la période 2015 à 2020 a été caractérisée par un ensemble d'années de chaleur et de sécheresse persistantes durant l'été, débutant dès le printemps pour certaines années comme 2016 ou bien se poursuivant sur le début d'automne comme pour l'année 2018. Le fort stress hydrique des sols en fin d'été durant cette période a engendré des taux de mortalité parmi les plus élevés jamais observés.

En 2015, le déficit hydrique fut marqué sur une longue période allant de d'avril à août.

La saison 2016, grâce à un printemps très arrosé mais avec un mois d'août très sec, fut un peu meilleure que 2015 en terme de réussite des plantations forestières observées, mais elle se situe en dessous de la moyenne 2007-2016. Le déficit hydrique fut marqué de juillet à septembre.

2017 est la 5ème année la plus chaude depuis 1900 (+0,8°C par rapport à la normale 1981-2010). C'est une année avec de nombreux records de températures, la moyenne des températures maximales de la deuxième décade bat des records sur 72 ans à Mâcon (71). Déficit hydrique marqué sur une longue période de mi-mars à octobre.

2018 fut également une année avec un déficit hydrique marqué exceptionnellement long, d'abord en avril puis de juillet à octobre.

2019 se caractérise par un printemps et un été à la pluviométrie inégale dans le département où la partie Est du département fut bien plus arrosée que le Nord-Ouest. Des records d'ensoleillement ont été battus comme à Mâcon sur la période de janvier à avril 2019, sur 70 ans de mesures, avec 664 h 30 de soleil, dépassant 2011 (642 h). Sur la période 2007-2019, l'année 2019 est au niveau national la deuxième année la moins « réussie » en termes de reprise de plantations toutes essences confondues (26,93 % de plantations non réussies) derrière 2015.

Durant cette période la Saône-et-Loire a particulièrement souffert d'un niveau d'humidité sec à très sec (cf carte page suivante) qui est en grande partie à l'origine des échecs de reprise des plantations. En effet la mortalité principale des plants est d'origine abiotique ou indéterminée dans 87 % des cas. La cause abiotique est souvent complexe ou indéterminée mais c'est la sécheresse et/ou les températures qui sont impliquées dans la plupart des cas avec selon les années :

- | un déficit pluviométrique durant la période de végétation ;
- | un excédent thermique pouvant atteindre 1,0 °C * en moyenne sur le département ;
- | un nombre de jours de chaleur (> 25°C) supérieur de + 40 % à la normale (1980/2010) ;
- | un nombre de jours de fortes chaleurs (> 30°C) supérieur de + 100 % à la normale (1980/2010).

La sécheresse a donc été bien souvent responsable des échecs de reprise des plantations de douglas. On distingue plusieurs types de sécheresses (source Météo-France) :

- | la sécheresse météorologique correspond à un déficit prolongé de précipitations ;
- | la sécheresse agricole se caractérise par un déficit en eau des sols superficiels (entre 1 et 2 m de profondeur), suffisant pour altérer le bon développement de la végétation. Elle dépend des précipitations et de l'évapotranspiration des plantes. Cette notion tient compte de l'évaporation des sols et de la transpiration des plantes (l'eau puisée par les racines est évaporée au niveau des feuilles). La sécheresse agricole est donc sensible aux précipitations, à l'humidité et à la température de l'air, au vent mais aussi à la nature des plantes et des sols ;
- | la sécheresse hydrologique se manifeste enfin lorsque les lacs, rivières ou nappes souterraines montrent des niveaux anormalement bas. Elle dépend des précipitations mais

aussi de l'état du sol influant sur le ruissellement et l'infiltration. Le réseau hydrographique détermine les temps de réponse aux déficits de précipitations observés sur différentes périodes.

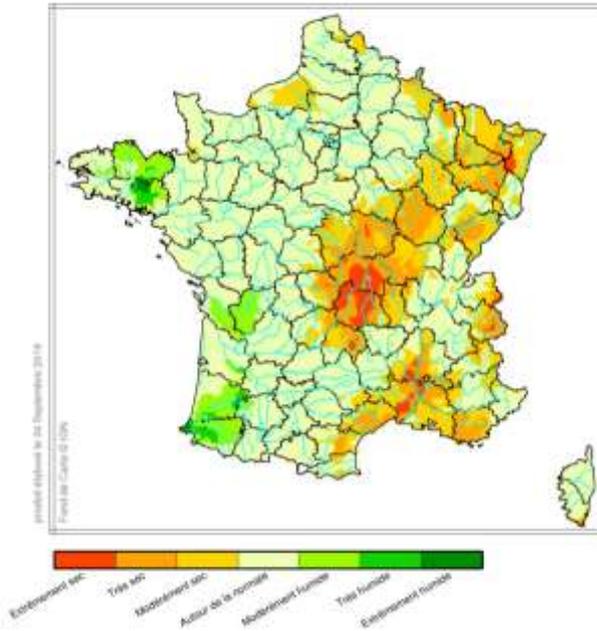


Figure 50 : Indicateur du niveau d'humidité des sols sur 3 mois de juin à aout 2019

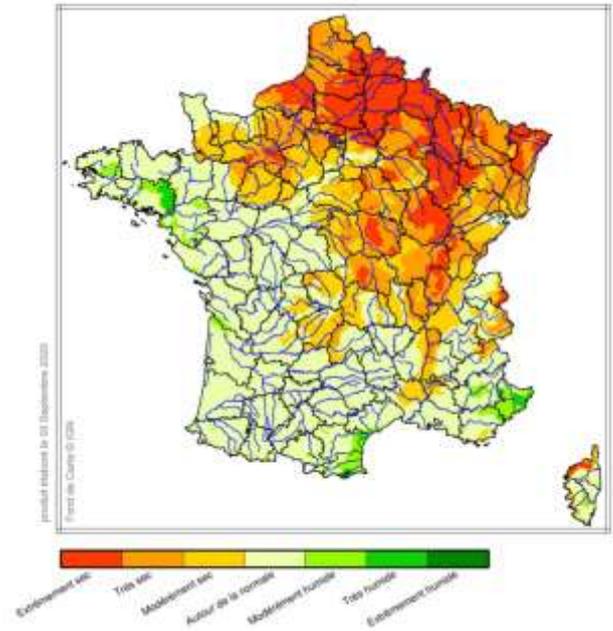


Figure 51 : Indicateur du niveau d'humidité des sols sur 3 mois de juin à aout 2020

3.1.2.3. Descriptifs des plantations analysées et analyse de la base DSF

PEI Douglas - Analyse echec et reussite PLANTATION													
Localisation	Plantation					Type de plants				Nombre de plants plantés	Estimation des dégâts		Observations
Commune (71)	Surface en ha	Période de plantation	Année de plantation	Gestion des rémanents	Préparation de sol	Type de plants	Age des plants	Hauteur des plants	Variété		Taux de mortalité (%)	Date/période d'évaluation des dégâts	
LE ROUSSET	5	Mars	2020	Laissés sur le sol	Potet	Godet 400	2	20/50	VG006	6600	40	sept-20	Mi-juillet : Constat de bonne reprise, plants verts et vigoureux. Septembre : Mortalité (rougissement) de 40%. Plants godet moins enracinés que racines nues, plus facile à arracher.
LE ROUSSET	5	Mars	2020	Andainage	Sous solage	RN	2	30/60	VG005	6600	5	sept-20	Mi-juillet : Constat de bonne reprise, plants verts et vigoureux. Septembre : Mortalité (rougissement) de 5%. Plants racines nues bien enracinés plus difficile à arracher que plants godet.
TOULON SUR ARROUX	5	Mars	2019	Broyage	Aucune	RN	2	30/60	VG006	5800	80	sept-19	Sol superficiel, RU très faible, Premier echec de 100% en 2018
VILLERS EN MORVAN	2	Mars	2019	Andainage	Aucune	RN	2	30/60	VG006	2300	90	sept-19	Sol superficiel à faible RU avec exposition sud-ouest
TRAMAYE	2	Mars	2019	Andainage	Aucune	RN	2	40/60	VG006	2200	55	sept-19	Septembre 2019 : Mortalité de 55% due à la secheresse avec rougissement et perte totale des aiguilles. 20 % des plants vivants présente des symptômes de coloration et de perte d'aiguilles.
BERGESSERAIN	3,5	Mars	2015	Andainage	Aucune	RN	2	40/60	VG006	3775	35	sept-15	Nombreux rougissements sur plants vivants
CHEVAGNY SUR GUY	3,5	Octobre	2015	Broyage	Aucune	RN	2	30/60	VG005	3850	32	sept-16	Plantation d'Automne, Mortalités en 2016 concentrés sur les zones les plus superficielles à faible RU
ST LEGER SS BEUVRAY	3,1	Avril	2015	Andainage	Aucune	RN	2	50/60	VG006	3400	35	sept-18	
St MARD DE VAUX	2,4	Avril	2015	Andainage	Aucune	RN	2	30/60	VG006	2950	83	sept-15	Juin 2015 : 100% des plants avec rougissement.
St LAURENT ANDENAY	3	Avril	2015	Broyage	Aucune	RN	3	60/80	VG006	3280	50	sept-15	14% des plants vivant ont des sequelles secheresse, 84 % des plants rouge au 12 juin, grands plants US
MONTAGNY SUR GROSE	5	Avril	2015	Laissés sur le sol	Potet	RN	2	30/60	VG006	6500	71	oct-15	29 % de mortalité secheresse. 13 % des plants vivant ont des sequelles secheresse (rameaux sec, aiguilles jaunes), Au moi de juin 40% des plants était atteints par le rougissement
SAINTE CECILE	2	Avril	2018	Andainage	Aucune	RN	2	30/60	VG006	2660	66	sept-18	Mortalité suite rougissement secheresse. Fin mai 2018 : Rougissement sur 35% dont 11% mort
BURNAND	1,9	Avril	2018	Andainage	Aucune	Godet 200	1	20/30	VG006	3040	9	sept-18	Godet 200 cm3. plant de petite taille dominés par les rejets feuillus, difficulté de retrouver les plants. 40% abrutis par le chevreuil, 9% de mortalité cause secheresse
PIERRECLOS	7	Avril	2017	Andainage	Potet	Godet 200	1	20/30	VG006	9100	4	sept-17	Differentes expositions (collines) avec peu d'incidence sur la mortalité
TRAMAYES	2	Avril	2019	Andainage	Aucune	RN	2	30/60	VG005	2600	33	sept-19	Printemps 2019 : 47% rougissant cause secheresse, Septembre 2019 : 33% mort secheresse et 17% atteint (rameaux mort, déficit foliaire)
BERGESSERIN	2	Mai	2019	Andainage	Aucune	Godet 400	2	30/40	/	2500	41	sept-19	Printemps 2019 : 100% plants verts et indemnes, Fin septembre 2019 : 41% des plants secs et 25% avec symptômes dus à la secheresse (perte aiguille, coloration).
MATOUR	1,3	Mai	2020	Laissés sur le sol	Potet	Godet 300	1	20/30	/	1430	19	sept-20	Présence hylobe
MATOUR	1,3	Mai	2020	Laissés sur le sol	Potet	RN	2	30/60	/	1500	11	sept-20	Juin 2020 : symptôme secheresse sur 60% des plants (rougissement) septembre 2020 : 11% mort et 4% avec symptôme secheresse (coloration, perte aiguille)
ST MARTIN DE SALENCY	4	Avril	2020	Laissés sur le sol	Potet	RN	2	30/60	VG006	5900	40	sept-20	Juin 2020 : Rougissement sur 34% des plants Septembre 2020 : 40% mort et 26% symptôme secheresse (perte foliaire, coloration aiguilles, rameaux sec

Pour les plantations analysées, les travaux de nettoyage du terrain ont consisté en une mise en andain des rémanents (60 % des plantations) ou un broyage (15 %). Les autres plantations n'ont pas bénéficié de nettoyage, les rémanents étant conservés et éparpillés au sol. La technique des potets travaillés a été utilisée pour 37 % des plantations.

Symptômes des mortalités observées

Les fortes contraintes hydriques, comme celles qui ont accompagné les canicules durant la période, soumettent les plants à d'importants ajustements fonctionnels et physiologiques durant la phase, déjà difficile, de reprise. Ces contraintes affectent la survie des plants durant cette phase, mais aussi durant les premières années de végétation. Elles limitent également la croissance des plants en hauteur.

Sur les plantations de 2015 et 2017, déjà affectées par des mortalités à la reprise, de nouveaux dépérissements de plants ont été observés en 2019 et 2020.

Les différents stress hydriques supportés par les plants sont à l'origine de rougissements et dessèchements partiels ou totaux liés à la rupture de l'approvisionnement en eau des tissus.

Dans les plantations échantillonnées, le taux de mortalité des plants de douglas atteint 42 % en fin de première saison de végétation. Les agents biotiques sont impliqués dans 13 % des cas de mortalité, à parité entre les insectes et les autres animaux. Parmi les insectes, l'hylobe représente 90 % des cas de mortalité. La principale cause de la mortalité est abiotique ou indéterminée dans plus de 85 % des cas. La cause abiotique est souvent complexe ou indéterminée mais c'est la sécheresse et/ou les températures qui sont impliquées dans la plupart des cas.

Les observations réalisées montrent que ces stress d'origine abiotiques peuvent intervenir à différentes périodes lors de la première année de végétation, on distingue notamment :

| Le rougissement printanier du douglas

Les symptômes observés sont les suivants : le feuillage présente un aspect desséché, et conserve, dans un premier temps, sa couleur verte, puis vire au jaune, puis au roux. Le dessèchement se produit depuis les extrémités vers le centre et la base de l'arbre ; d'ailleurs, la progression au niveau des aiguilles affiche une évolution similaire, elles se dessèchent souvent par l'apex, leur base restant verte. Souvent quelques branches vertes subsistent à la base des individus touchés ; parfois, l'arbre n'est même atteint que sur un côté. Les arbres ne bénéficiant d'aucun ombrage, sont les plus touchés. Les causes de ce rougissement printanier sont très corrélés aux conditions climatiques de la fin de l'hiver, et notamment celles des mois de février et mars avec souvent une insolation importante, une quasi-absence de précipitations durant une vingtaine de journées pendant le mois de mars, des températures quelquefois élevées dans la journée et un fort gel nocturne, un sol parfois gelé qui rend l'eau indisponible pour les arbres. Dans ces conditions, les jeunes douglas, à l'enracinement peu développé et superficiel alors que la partie aérienne est déjà importante, ne peuvent compenser leur évapotranspiration et se dessèchent. Ce rougissement est irréversible pour certains plants alors que d'autres arrivent tout de même à démarrer (cf photo 3), ceci dépendant des conditions de météo lors du débourrement.



Figure 52 : Débourrement après rougissement printanier (Photo B. Borde)

| L'échec de reprise

En raison d'un sol trop sec, la reprise du plant c'est-à-dire la connexion racinaire de ce dernier avec son nouvel élément, ne pourra se faire en raison de la mortalité des racines fines.

| Stress hydrique estival sur un jeune plant

Pour un jeune plant qui a réussi la phase de reprise au printemps, le premier effet du manque d'eau et des fortes chaleurs durant l'été induit un stress hydrique qui se manifeste par une réduction de la croissance et conduit à un ralentissement de la pousse des rameaux et des racines fines. En effet, les stomates se ferment pour limiter la transpiration, ce qui bloque les échanges avec l'atmosphère et donc l'absorption de CO₂, la photosynthèse et par suite la croissance. Si le déficit hydrique persiste, apparaissent alors des phénomènes de cavitation et d'embolie des vaisseaux qui perturbent le fonctionnement de l'ensemble du système conducteur et entraînent le dessèchement des aiguilles, elles passent d'une couleur vert terne au jaune puis à une coloration rouille.

Toutes les sécheresses n'ont pas le même impact selon leur intensité, leur durée mais également de la période à laquelle elles se produisent. L'impact sur une jeune plantation est d'autant plus important qu'elles sont précoces. Dans le cas des plantations observées, les sécheresses estivales et automnales de 2015 et 2016 ont eu légèrement moins d'impact que la sécheresse de printemps et

d'été de 2018 et 2019. Dans le même ordre d'idée, le déficit hydrique hivernal qui s'est maintenu jusqu'au printemps 2017 a probablement accentué les dommages durant la période estivale.

Les facteurs déclenchant les dépérissements observés sur ces plantations sont dans la grande majorité des cas des périodes de sécheresse-canicule induisant un important stress hydrique. Quelques éléments peuvent parfois aggraver ou accélérer le phénomène de mortalité tels que des sols à faible RU due à une faible épaisseur (30 cm), les situations exposées au soleil et parfois l'absence de travail préparatoire à la plantation (potet, sous-solage etc), induisant un système racinaire traçant et coudé par le « coup de pioche » lors de la plantation. Les observations réalisées ont permis de mettre en avant toute la sensibilité du douglas aux stress hydriques notables, notamment en contexte stationnel contraint, de basses altitudes et avec une faible RU au niveau du sol.

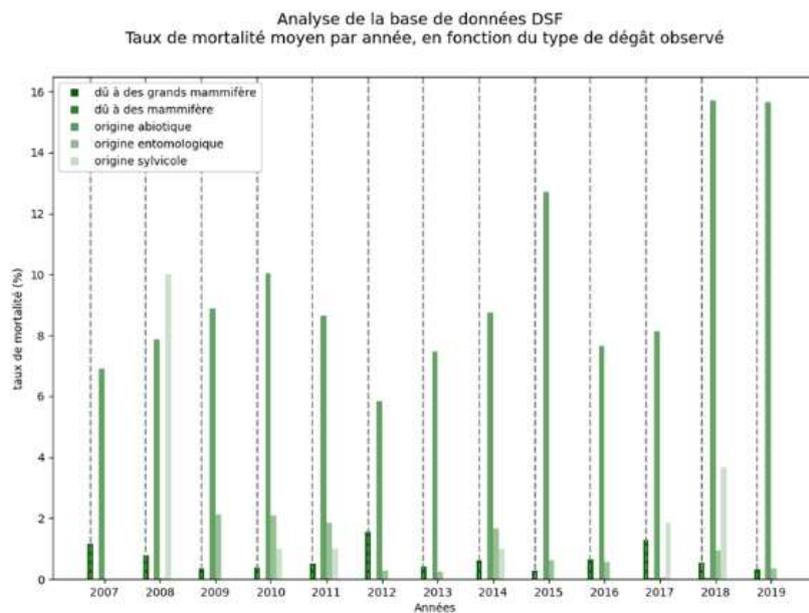
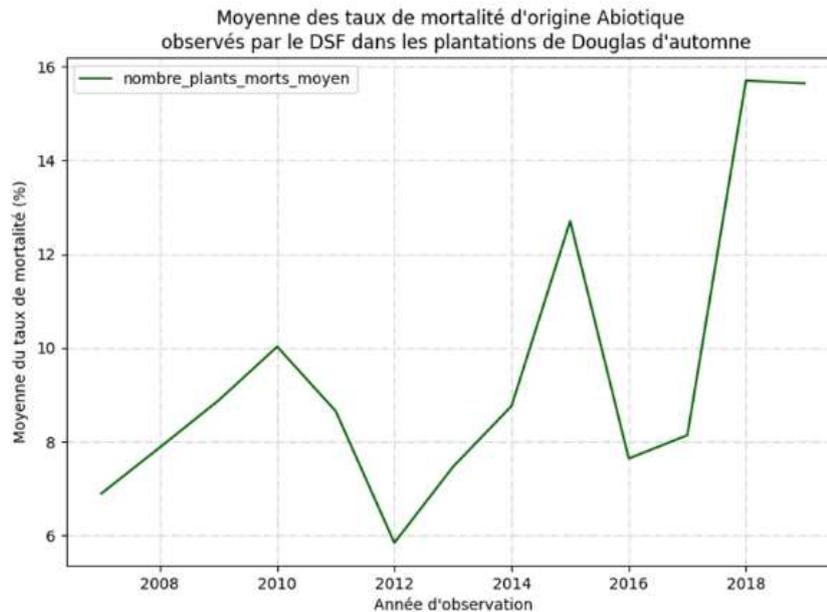
Attention cependant aux confusions de symptômes, les effets de la sécheresse et des fortes températures se traduisent visuellement par des changements de couleur (jaunissement, rougissement ou brunissement), des dessèchements et des chutes de feuilles ou d'aiguilles.

Mais ces symptômes ne sont pas spécifiques et ils peuvent être provoqués par quantité d'autres problèmes phytosanitaires. Ils peuvent résulter d'attaques au niveau des organes foliaires par des pathogènes variés (rouille suisse, rhabdocline, rhizosphaera, siroccocusoïdium, cécidomie) ou par de multiples ravageurs (hylobes, charançon, chermès) dont les conséquences sont habituellement moins graves que ne le sont les problèmes d'origine climatique. Mais ils peuvent aussi résulter de problèmes phytosanitaires qui interviennent au niveau des branches et du tronc (dégâts de grêle, de gel...) ou du système racinaire (armillaire, fomès). Il importe donc de ne pas attribuer tous les symptômes visibles à la crise climatique et de faire des diagnostics précis de l'état sanitaire des peuplements.

Base de données DSF

En 2018 et 2019, pour les dégâts abiotiques, on atteint un taux de mortalité moyen de 16 % sur les plantations de Douglas en Bourgogne. Pour une moyenne habituellement autour de 8 % au cours des années précédentes.

On observe une augmentation forte du taux de mortalité sur les plantations d'automne au cours des années 2018 et 2019. Par ailleurs, l'année 2015, particulièrement chaude, se démarque avec un taux de mortalité moyen élevé (13 %).



Le suivi « plantations de l'année » apporte, à partir de l'observation de plus de 1 700 plantations pour les années 2015 et 2016, des éléments concernant les principaux facteurs de réussite ou d'échec des plantations de l'année.

Il est à rappeler que ce suivi concerne uniquement la première année de végétation et que les années suivantes, les plants restent encore soumis à des aléas climatiques, anthropiques et/ou biotiques pouvant causer de nouvelles causes de mortalité.

3.1.3. Analyse et recommandations

A partir de l'analyse des échecs et réussites de ces plantations, des données issues de la base du Département Santé des Forêt et suite aux observations de terrain, nous pouvons identifier quelques facteurs (voire combinaisons de facteurs) susceptibles de limiter les échecs.

3.1.3.1. Etoffer le diagnostic initial avant l'installation de nouveaux peuplements

Des fortes contraintes hydriques et thermiques, comme celles qui ont accompagné les sécheresses et canicules durant la période, soumettent les plants de douglas à d'importantes contraintes de croissance et affectent leur survie durant les premières années. Les conditions stationnelles non adaptées (sol superficiel ou lourd, exposition chaude, basse altitude, pluviométrie insuffisante) sont le facteur principal qui contribue à la vulnérabilité du douglas aux dommages abiotiques et à la mortalité.

Une analyse fine de la station est plus que jamais nécessaire afin d'éviter un projet de reboisement en douglas fortement voué à l'échec compte tenu des évolutions climatiques d'ores et déjà constatées et attendues en Bourgogne. Cette analyse doit notamment prendre en compte et exclure les facteurs qui sont prédisposants à des mortalités :

- | les sols trop filtrants et trop superficiels ;
- | les stations avec des RU limitées (faible épaisseur de sols, charge en cailloux importante) ;
- | les versants chauds et secs à faible RU au-dessous de 500 m ;
- | les pluviométries insuffisantes durant la période de végétation ;
- | les basses altitudes comprises entre 200 et 500 m.

Il est aujourd'hui indispensable de réaliser un bilan des fertilités hydrique et minérale du sol, couplé à une analyse de la dégradation possible des bilans hydriques dans les 50 ans à venir à partir de différents scénarios d'évolution du climat, notamment en réalisant un diagnostic avec l'outil BIOCLIMSOL.

Atténuer l'exposition à l'aléa en privilégiant des conditions stationnelles optimum
pour le douglas

3.1.3.2. Choisir des provenances ou des essences de substitution au douglas

Il est courant de rencontrer des configurations stationnelles de parcelles de douglas qui ont généré par le passé une production qu'aucune autre essence ne peut atteindre. Le réchauffement climatique évolue plus rapidement que la capacité d'adaptation naturelle de certaines essences comme le douglas. Lors du renouvellement d'un peuplement, un diagnostic de la station (sol / climat / topographie) et de l'état des arbres en place le cas échéant doit être mené.

Si ce diagnostic révèle une vulnérabilité du douglas face à l'évolution climatique, différentes solutions peuvent être étudiées :

- | implanter d'autres essences que le douglas, mieux adaptées au climat futur ;
- | utiliser des provenances de douglas plus adaptées au réchauffement climatique (provenance Californie) ;
- | installer le douglas en mélange avec d'autres essences moins sensibles au déficit hydrique. Cette diversification d'essences permettra de réduire le risque sanitaire et la mortalité vis-à-vis des changements climatiques.

3.1.3.3. Adapter les travaux de plantation et de suivi ultérieur

La mortalité est abiotique ou indéterminée dans beaucoup de cas, ce sont des dégâts dus en grande partie à la sécheresse et à la chaleur mais la cause n'est pas toujours clairement identifiée et la mortalité est parfois due à l'action combinée d'une sécheresse printanière et/ou estivale et/ou d'un problème à la plantation (qualité médiocre des plants et/ou de plantation ou d'entretien...).

Ces conditions climatiques difficiles impliquent donc une extrême attention lors des travaux de reboisement afin de ne pas amplifier un contexte de reprise déjà difficile en raison du climat.

• Type de plantation

Pour des plantations en plein, on évitera des surfaces de plus de 4 ou 5 ha d'un seul tenant. Lorsque c'est possible on maintiendra sur pied des bandes boisées brise-vent de 10 à 20 mètres de large. Ces bandes seront espacées de 100 à 150 m et seront orientées de façon à limiter les effets néfastes des vents desséchants. La disparition de l'ambiance forestière provoque l'accentuation des contrastes thermiques, c'est pourquoi une plantation dans le recrû (schéma ci-dessous) permettra le maintien de cette ambiance et favorisera l'installation des plants. Cette végétation ligneuse gainant le jeune arbre a plusieurs effets positifs : elle le protège (vent, gibier), empêche le développement trop important des branches latérales et améliore sa forme.

De plus, les ligneux limitent l'implantation des graminées et exercent une concurrence moindre vis-à-vis de l'eau. Cette méthode nécessite cependant un bon potentiel d'apparition du recrû ligneux et d'attendre pendant 1 à 4 ans selon sa vitesse d'installation et selon l'essence objectif.

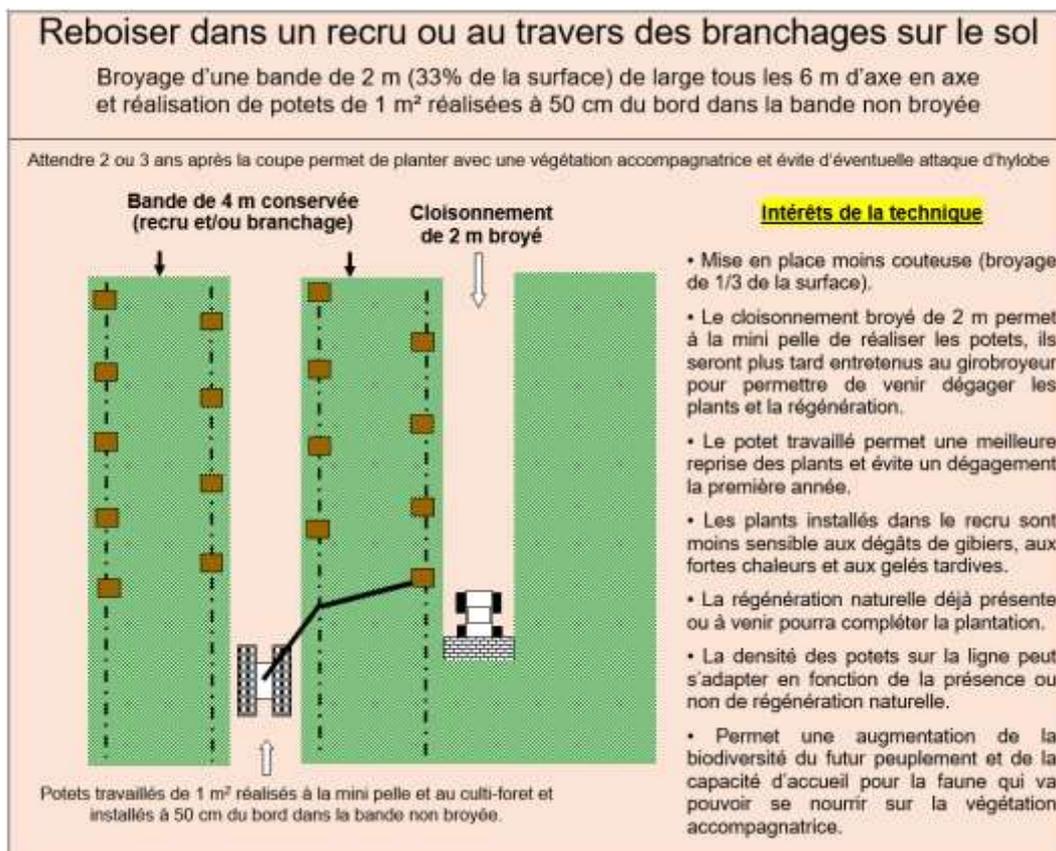


Figure 53 : Schéma de plantation dans un recrû (B. Borde)



Figure 54 : Plantation de douglas en mélange avec cèdre, pin maritime dans un recru (Photo B. Borde)

Conserver la végétation et l'ambiance forestière existante ou l'attendre le cas échéant est bénéfique à la reprise des plants et à leur survie en cas de forte chaleur

- **Travaux préparatoires à la plantation**

On cherchera à préserver la fertilité des sols par des préparations adaptées, en évitant le dessouchage, le décapage et même parfois l'andainage. Les observations réalisées sur les plantations qui ont fait l'objet de l'analyse montrent qu'un travail du sol préalable à la plantation permet une meilleure plantation et un meilleur ancrage des plants grâce à un système racinaire qui pourra mieux s'implanter en profondeur, et ainsi avoir une moindre sensibilité au stress hydrique. Nous avons pu observer que les sols ayant subi une préparation drastique avant plantation (dessouchage et andainage des rémanents) présentent en général une richesse trophique plus faible que les autres et des mortalités pouvant être plus importantes. La réalisation d'un travail localisé du sol au moyen d'un outil adapté comme le culti-foret monté sur une mini pelle permet le travail du sol en bande ou en potets ou placeaux de plusieurs m² et ceci aussi bien dans un recru, au travers des rémanents éparpillés au sol ou sur un terrain propre.

- **Période de plantation**

En fonction des caractéristiques du climat en début de saison de végétation, la période de plantation peut avoir un effet sur la reprise et la survie des plants. Il est malheureusement impossible de prévoir celui-ci à l'avance. Lors des printemps secs et venteux, planter plus tardivement en saison, fin avril début mai, permet de diminuer les conséquences du rougissement physiologique. Inversement, introduire des plants tôt au printemps s'il est pluvieux permettra à ces derniers de mieux supporter une sécheresse en début d'été.

La qualité des plants et de la plantation participe à une meilleure reprise lors de conditions climatiques difficiles

• **Type de plants**

Les types de plants peuvent être spécifiques selon les essences utilisées, par exemple le pin maritime et le cèdre se plantent exclusivement en godets. Les plants en racines nues restent majoritaires chez le douglas.

Les plants à racines nues sont arrachés du sol de la pépinière et leurs systèmes racinaires s'en trouvent donc plus ou moins amputés. Moyennant quelques précautions de manutention et de durée avant la transplantation, leur reprise et leur croissance ne posent pas de problème particulier dans notre région.

Les plants élevés en conteneurs ou en motte ne subissent pas de traumatisme racinaire à la plantation. Leur période de plantation peut être allongée. Le coût plus élevé pour le prix du plant, du transport et de la manutention sur le chantier peut être un handicap. Cette méthode de production de plant est à réserver à des plants très jeunes (1 an maximum) vu le faible volume de substrat mis à leur disposition. Si la reprise semble parfois améliorée, l'influence sur le développement ultérieur n'est pas prouvée. **Les plants en motte ou godet doivent impérativement être installés sur un terrain préparé (potet).**

3.1.3.4. Analyse économique

Exemple des coûts (en €HT) pour trois méthodes de plantation du douglas

Plantation en plein avec élimination systématique de la concurrence à 1600 plants/ha	Plantation dans le recrû à 800 plants/ha	Plantation de 3 essences (douglas, cèdre, pin maritime) mélangées par bouquets à 1300 plants/ha
• Broyage en plein : 1100 €/ha ou • Andainage : 700 €/ha • Sous-solage : 300 €/ha ou • Potet : 1100 €/ha	• Broyage des cloisonnements : 250 €/ha • Potets: 800 €/ha	• Broyage en plein : 1100 €/ha ou • Andainage : 700 €/ha • Sous-solage : 300 €/ha ou • Potet : 1100 €/ha
• Fourniture des plants : 960 €/ha (0,6€ x 1600 plants)	• Fourniture des plants : 480 €/ha (0,6€ x 800 plants)	• Fourniture des plants : 860 €/ha Douglas : 0,6€ x 430 plants Pin maritime : 0,4€ x 430 plants Cèdre : 1€ x 430 plants
• Mise en place des plants : 1600 €/ha	• Mise en place des plants : 520 €/ha	• Mise en place des plants : 850 €/ha
Moyenne : 4 310 €/ha	Moyenne : 2 050 €/ha	Moyenne : 3 210 €/ha

3.1.4. Conclusion

Le contexte climatique est difficile à appréhender tant il est différent d'une année de végétation sur l'autre. Avec le recul qui s'impose après les événements climatiques depuis 2015, nous observons que le douglas est parfois en limite de son aire de culture sur des zones qui ne l'étaient pas il y a encore quelques décennies. Son implantation classique devient alors particulièrement risquée. Les facteurs climatiques, stationnels ou anthropiques déterminent les conditions de reprise des plants lors de l'année d'installation. Les forestiers ne maîtrisant pas le climat et les conditions météorologiques, le travail de ces derniers en bonne intelligence avec la nature est primordial. Des plantations effectuées au moment opportun selon la saison de végétation, dans des stations adaptées aux douglas et mises en terre et avec des plants et une plantation de qualité sont des facteurs essentiels, susceptibles d'accroître fortement les capacités de reprise des jeunes arbres.

3.2. Analyse des échecs et réussites de régénérations naturelles

Auteurs

Bruno BORDE, Lucas SCHNAPPER (CNPF Bourgogne-Franche-Comté), Victor GAMAY (Stagiaire)

3.2.1. Contexte

A l'heure où les peuplements de douglas arrivent à maturité, la question du renouvellement se pose et la régénération naturelle apparaît comme une alternative intéressante à la coupe rase et la plantation. Ce mode de renouvellement lent et moins exposé aux évènements climatiques peut apporter une solution à certains problèmes tels que les échecs de reprise en plantation, les attaques d'hylobes et de cervidés....

Dans le cadre du projet PEI, les réussites et échecs de régénérations naturelles engagées ces dernières années pour dix peuplements de douglas, ont été analysés en fonction de l'itinéraire sylvicole appliqué, des caractéristiques dendrométriques du peuplement semencier et des conditions climatiques. L'objectif est d'étudier plusieurs situations de régénération afin d'en déterminer les éléments de réussite, recueillir des informations techniques plus complètes et définir les travaux à planifier.

3.2.2. Recueil des informations

3.2.2.1. Caractéristiques des parcelles retenues

En collaboration étroite avec les propriétaires et gestionnaires, un plan d'échantillonnage de peuplements (tableau ci-dessous) a permis d'étudier plus précisément 12 peuplements pour lesquelles les orientations de gestion en régénération naturelle ont été engagées ces dernières années. Outre les conditions climatiques et les conditions stationnelles (caractéristiques pédologiques, exposition, topographie) les informations techniques passées les plus complètes ont été recherchées.

Analyse des échecs et réussites de régénérations naturelles					
Commune	Topographie			Sol (20 premier cm)	
	Pente %	Altitude	Exposition (degré)	Texture	Éléments grossiers (%)
VAUCLAIX (58)	30	400	180	Ls	5
CERVON (58)	10	243	40	Ls	0
RIGNY (71)	5	328	25	La	2
MARLY (71)	9	361	280	Las	0
CIRY LE NOBLE (71)	5	311	40	Lm	0
BLISME (58)	14	360	240	Ls	0
MONTREUILLO (58)	11	360	90	Ls	0
ST HILAIRE (58)	23	502	220	Ls	0
VAUCLAIX (58)	8	366	300	Ls	5
BLISME (58)	14	324	125	Ls	3
ANOST (71)	10	700	140	Sl	0

3.2.2.2. Méthode et protocole

La méthodologie mise en place a consisté à l'implantation de placettes circulaires de 1257 m² afin de réaliser un inventaire statistique de la futaie et identifier ses caractéristiques (Ht dom, G, volume Bo). A chaque placette fut associées 8 sous placettes de 1,5 m de rayon pour comptabiliser la régénération et qualifier cette régénération selon les classes de hauteur suivante : 0/25 cm 25/50 cm 50/100 cm et + de 100 cm. La régénération a été qualifiée sur l'espace de la parcelle, en îlots, en plein, épars, grandes plages. Un diagnostic pédologique et un relevé des espèces végétales présentes ont également été réalisés.



Figure 55 : Relevé des données sur des placettes circulaires (Photo B.Borde)

3.2.2.3. Analyse des peuplements retenus

Analyse des échecs et réussites de régénérations naturelles										
Commune	Peuplement					Régénération				Observations
	Age	Hauteur dom	Densité/ha	G/ha	Couvert de la futaie	Taux de recouvrement	Densité semis/ha	Classe ht dominante	Concurrence au sol	
VAUCLAIX (58)	44	33	255	31,7	5/10	0	0	/	/	Essai travail du sol mini- pelle
CERVON (58)	47	34	200	32	6/10	0	0	/	Ronce	Essai travail du sol broyeur
RIGNY (71)	48	36	205	33	8/10	0	0	/	/	Essai travail du sol rateau plaisance
MARLY (71)	49	35	210	35	7/10	0	0	/	Ronce	Coupe ensèmentement
CIRY LE NOBLE (71)	50	32	172	31,4	6/10	60	13000	> 1 m	Ronce	Régénération lente
BLISME (58)	51	39	143	37,5	6/10	65	5000	0/0,25 m	Ronce	Eclaircie forte
MONTREUILLON (58)	52	38	151	23,9	4/10	80	20000	> 1 m	Ronce	Coupe d'ensemencement en 2019 et secondaire en 2021
ST HILAIRE (58)	53	39	127	28	4/10	90	20000	0,5/1 m	/	Coupe secondaire en 2019
VAUCLAIX (58)	53	36	160	28	5/10	70	15000	/	Ronce	Coupe secondaire en 2020
BLISME (58)	55	40	88	21,3	4/10	80	22000	> 1 m	/	Coupe secondaire en 2019
ANOST (71)	60	39	105	20	4/10	80	25000	0,5/1 m	/	Coupe définitive en 2023

Malgré le faible nombre de peuplements analysés et l'absence de validité statistique, nous pouvons identifier à partir de l'étude de ces peuplements quelques facteurs dendrométriques susceptibles de favoriser la réussite d'une régénération naturelle.

Nous observons que la présence de régénération naturelle est souvent liée à une combinaison de facteurs qui sont parfois dépendants les uns des autres mais qui sont souvent réunis dans les cas de réussite de régénération :

- | l'âge du peuplement, la fertilité des graines et ses capacités de germination deviennent plus importante à partir de 50 ans ;
- | La densité du peuplement doit être inférieure à 180 tiges par ha environ ;
- | La surface terrière traduit le capital de bois présent dans le peuplement et doit être inférieure à 30m²/ha ;
- | La hauteur dominante doit être de plus de 30 mètres. Les douglas installés sur des stations limites (précipitations, sols), de qualités médiocres ou instables, ne sont pas propices à un renouvellement naturel ni à une production de bois d'œuvre de qualité.



Figure 56 : Age et données dendrométriques des peuplements analysés

Sur les parcelles observées nous remarquons que la proportion de peuplement avec présence de régénération naturelle augmente avec l'âge et diminue avec la densité. Les peuplements avec de la régénération ont une surface terrière comprise entre 20 et 30 m²/ha.

Ces résultats préliminaires sur un échantillon non représentatif statistiquement demandent à être validés par des études et suivis complémentaires. Ces résultats correspondent cependant aux observations de terrain effectuées jusqu'alors.

3.2.3. Analyse et recommandations

3.2.3.1. Principaux facteurs de réussite d'une régénération naturelle

- Facteurs stationnels et conditions pédoclimatiques

Les observations montrent qu'une exposition au nord-est semble plus favorable en raison d'un bilan hydrique bénéfique pour la germination des graines. La pente est également un facteur important car elle induit un meilleur éclairage au sol. Un sol léger et profond, limono-sableux sans nappes d'eau et sans argile semble préférable pour une bonne réception des graines. Une pluviométrie d'au moins 800 mm/ an est nécessaire pour une bonne germination et une installation des semis. Les vents dominants d'ouest dispersent les graines vers l'est, c'est un facteur à prendre en compte lors des coupes.

Beaucoup de contraintes peuvent nuire à la germination des graines et notamment des sols lessivés ou hydromorphes, un excès d'eau en hiver, le déficit hydrique en été, le tassement du sol par les engins durant les différentes exploitations, un humus épais donc un sol qui dégrade mal la matière organique ou qui n'a pas assez de lumière au sol. Les stations de qualité moyenne, pas suffisamment arrosées, seront défavorables à un renouvellement naturel. Par ailleurs, si la ronce est déjà installée dans un peuplement fermé, il sera très compliqué de faire venir de la régénération naturelle. Dans ce cas, il vaudra mieux privilégier la plantation.

Pour assurer un sol réceptif aux semences, il est possible de réaliser un léger nettoyage/travail du sol avant le mois de septembre, avant la libération des graines. D'après les essais mise en place, nous observons qu'un travail du sol réalisé avec une pelle mécanique munie d'un râteau spécifique semble être le mieux adapté pour cette opération.



Figure 57 : Travail du sol pour favoriser l'apparition de la régénération naturelle – Commune de Rigny (71) (Photo B. Borde)

- Peuplement

Le douglas est une essence monoïque (présence sur le même individu d'organes reproducteurs mâles et femelles), dont la fructification est possible à partir de 15 ans, habituelle dès 35/40 ans et optimale au-delà de 50 ans. Les bonnes fructifications n'ont lieu que tous les 4 à 7 ans et dépendent, pour une bonne part, des conditions climatiques pendant le cycle de reproduction qui s'étale sur 2 ans.

Il conviendra de doser savamment l'arrivée de la lumière au sol. Cette dernière va conditionner la germination des graines et le développement de la végétation concurrente.

On constate que l'éclairage latéral et diffus est efficace pour la germination et la pousse des semis, l'éclairage brutal fait exploser la végétation concurrente, un couvert fermé empêche la germination. Les observations nous ont permis de vérifier qu'il faut **attendre avec patience et sérénité** l'apparition de semis car la germination peut s'étaler sur plusieurs années. Si on peut agir pour la provoquer, sa venue n'est toutefois jamais garantie.

Pour acquérir de la régénération naturelle, les suivis montrent qu'il est parfois préférable de réaliser plusieurs coupes progressives prélevant 25/30% du volume à rotation courte de 4 à 5 ans, permettant d'atteindre au finale une surface terrière après coupe de 30 m²/ha qu'une seule coupe d'ensemencement prélevant 50% du volume. En effet, si cette coupe est réalisée une année où la fructification est mauvaise ou si le printemps est trop sec, les semis ne seront pas au rendez-vous, à la différence de la végétation concurrente qui saura bénéficier de l'espace.

L'intensité des coupes sera adaptée aux stations (végétation concurrente susceptible ou non de se développer rapidement) et au capital sur pied. Il s'agit d'effectuer un apport de lumière progressif, les semis pouvant ainsi prendre une certaine avance sur la végétation concurrente. Les dégagements sont alors moins nombreux et le coût moindre.

La coupe secondaire, réalisée 3 à 4 ans après l'ensemencement, a vocation à ensemençer les zones où les semis sont encore absents, elle ne sera donc pas nécessaire si 80% de la surface est régénérée.



Figure 58 : Peuplement en cours de régénération, avant coupe secondaire – Commune d'Anost (71) (Photo B. Borde)

La coupe définitive peut être réalisée dès lors que la surface ensemençée atteint 70/80% et avant que les semis ne soient trop hauts (< 1,50 m).

L'analyse des parcelles a montré que l'exploitation des peuplements présentant une régénération acquise et bien-venante de hauteur totale inférieure à 1,5 m n'a pas engendré de difficulté particulière avec des consignes d'exploitation adaptées comme l'abattage en dehors des taches des plus hauts semis et pas de circulation des engins sur le parterre de la coupe en dehors des cloisonnements. L'évolution de la mécanisation permet d'assurer une plus grande maîtrise de l'exploitation des gros

et très gros bois avec notamment la possibilité de porter les arbres de 75 cm de diamètre et moins jusqu'aux cloisonnements afin d'abattre et ébrancher ceux-ci en minimisant les dégâts.

Travaux dans la régénération

1 à 3 ans après la coupe définitive, il faut desserrer les semis et nettoyer les zones où la ronce s'est installée. Cette première opération de nettoyage/dépressage/mise à distance est en général réalisée avec une débroussailluse sur une régénération de 50 cm à 1 m de hauteur. L'objectif est de laisser un plant naturel tous les 2 m environ, afin de diminuer la densité à 2 000/2 500 semis/ha. Lorsqu'elles sont présentes, d'autres essences seront privilégiées lors des travaux afin de favoriser le mélange du futur peuplement.

Une seconde intervention est réalisée 3 à 4 ans plus tard, l'objectif est de ramener la densité à 1500/2000 tiges/ha. Les plants font alors 2 à 4 mètres de hauteur. A ce stade, il est possible de mettre en place des cloisonnements sylvicoles. Ces derniers seront également utilisés pour l'introduction par plantation d'une autre essence ou regarnir des vides.

Une troisième intervention en dépressage est parfois nécessaire si le peuplement est encore trop dense, l'objectif étant d'obtenir moins de 1 500 tiges/ha avant la première éclaircie qui sera réalisée vers l'âge de 20 ans. Ces opérations de dépressage visent à permettre le développement progressif des tiges conservées et à améliorer leur stabilité tout en profitant du bénéfice de la densité pour la forme.

Il a été observé que les arbres maintenus très serrés poussent essentiellement en hauteur, leur stabilité est mauvaise du fait de leur croissance filiforme et de leur système racinaire peu développé. Les risques de dégâts deviennent alors importants dans le cas de neiges lourdes de fin d'hiver ou début de printemps.



Figure 59 : Travaux de dépressage dans une régénération naturelle – Commune de St Hilaire (58) (Photo B. Borde)

3.2.3.2. Analyse économique

Coût HT/ha pour un itinéraire régénération naturelle de DOUGLAS		
Interventions	Systématiques	Optionnelles (suivant le contexte)
Travail du sol à l'année N-2 à N-5		800 €
Mise en place de cloisonnement pour l'exploitation de la coupe définitive à l'année N-1		300 €
Surcoût exploitation préservant la régénération naturelle en coupe définitive à l'année N	250 €	
Complément plantation regarnis à l'année N+1 (200 plants/ha)		260 €
Nettoyage/dépressage N+2	500 €	
Entretien des cloisonnements		100 €
Nettoyage/dépressage N+6	500 €	
Entretien des cloisonnements		100 €
Nettoyage/dépressage N+10	500 €	
Entretien des cloisonnements		100 €

Le coût d'une régénération naturelle de douglas réussie est en moyenne inférieur de 30 % par rapport à une plantation. La forte densité de semis par rapport à une plantation permet de supporter une pression de gibier plus forte. Dans le jeune âge, les semis naturels sont mieux adaptés aux conditions climatiques extrêmes que des plants.

3.2.4. Conclusion

Sous réserve que le peuplement soit de bonne qualité, la régénération peut se révéler une alternative intéressante à la plantation si l'on parvient à en maîtriser la conduite et les coûts. Si le renouvellement des peuplements adultes de douglas par régénération naturelle ne supplante absolument pas la plantation à partir de plants sélectionnés ayant bénéficié des derniers progrès génétiques, elle en constitue néanmoins une alternative et un complément intéressants. Certaines situations pourraient même justifier de les associer : compléments dans des régénérations discontinues, diversification des origines génétiques, atténuation des pertes causées par l'hylobie ou le gibier...

Les techniques et l'approche de leurs coûts permettant de tirer parti des semis se doivent d'être connues et progressivement maîtrisées par les gestionnaires de peuplements de douglas adultes. Étudiées depuis quelques années dans plusieurs régions, ces techniques s'affinent peu à peu.

3.3. Mise en place de plantations de douglas en mélange avec d'autres espèces, test de comportement de certaines variétés en mélange, recherche d'espèces de substitution au douglas

Auteurs

Bruno BORDE, Lucas SCHNAPPER (CNPF Bourgogne-Franche-Comté)

3.3.1. Contexte et objectifs

Les forêts de Bourgogne et notamment celles de douglas, traversent depuis quelques années une période soumise à des difficultés. Il fait de plus en plus chaud et sec en été, ce qui a des impacts sur les peuplements. Ces derniers montrent alors des signes de faiblesse, parfois conséquents. En cause, des conditions climatiques propices au dépérissement des arbres et au développement d'insectes ravageurs, mais aussi l'inadaptation de l'essence forestière au regard des conditions de stations.

Les prochaines décennies vont probablement accentuer les difficultés et les forestiers vont devoir intégrer rapidement d'indispensables évolutions dans la gestion de leur forêt, notamment au moment de la plantation.

Penser « résilience » dès la plantation

Un certain nombre d'essences semblent présenter une meilleure résistance aux conditions climatiques que nous éprouvons depuis quelques années. L'association à la plantation d'une ou plusieurs d'entre-elles avec le douglas permettra, entre autres, de mieux répartir les risques en cas de défaillance de l'une ou l'autre, d'utiliser les ressources de manière complémentaire (consommation en eau différente en quantité ou en saisonnalité, prospection à différents niveaux dans le sol), ou encore de se protéger mutuellement un peu mieux face aux insectes, maladies, sécheresse.

L'installation d'un mélange à la plantation, avec l'éducation combinée de plusieurs essences, est donc une idée très séduisante. Mais la pratique montre que ces mélanges sont parfois difficiles à maintenir. L'installation et le suivi, en comparaison à une plantation mono-spécifique, génère quelques contraintes qu'il est nécessaire de bien appréhender.

Malgré l'intérêt, aujourd'hui évident, de planter plusieurs espèces en mélange sur une même parcelle, très peu d'expériences et d'essais anciens existent pour le douglas et aucun itinéraire technique n'est véritablement validé. Aujourd'hui, devant la nécessité impérieuse de constituer des plantations mélangées, de nombreuses questions techniques se posent tant au niveau du choix des espèces à associer au douglas, des proportions de chaque espèce, des modalités et schéma d'installation du mélange, de la gestion sylvicole de ces plantations et des surcoûts induit par ces mélanges.

La constitution d'un réseau de 20 plantations en mélange a pour objet d'apporter des premières réponses à ces questions. Ce réseau a été établi avec les objectifs principaux suivants :

- | échantillonner et explorer au maximum la diversité des contextes écologiques (climat, conditions stationnelles) des principales aires de production actuelles du douglas en bourgogne, tout en anticipant leur évolution ;

- | expérimenter des itinéraires sylvicoles de mélange à base de douglas (choix des essences à associer, proportion, modalité) en installant différents dispositifs de mélange à la plantation ;
- | connaître les facteurs environnementaux qui définissent la survie, la vitalité et la croissance des essences installées et de leurs provenances par grands gradients environnementaux ;
- | contribuer aux recommandations d'essences et d'itinéraires sylvicoles pour les praticiens et établir une infrastructure à long terme pour la recherche appliquée.

C'est l'objectif de cette tâche 3.3 du PEI, qui a pour but de fournir un réseau expérimental de 20 plantations avec un protocole simple mais rigoureux de mise en place et pour lequel les futurs expérimentateurs pourront profiter d'un socle solide d'éléments exploitables sur une durée d'observation de 30 à 50 ans. Ce réseau servira à vérifier et/ou conforter des connaissances issues d'autres programmes.



Figure 60 : Mélange à la plantation de douglas, mélèze, érable, chêne (Photo B. Borde)

3.3.2. Choix des sites et installation des plantations expérimentales

Différents critères de sélection des sites ont été établis, notamment l'homogénéité de la parcelle à planter en termes de pente, d'exposition et de station ainsi qu'un accès facile à la parcelle. La motivation du propriétaire est également un élément important car un essai de ce type est installé pour de nombreuses années. La reprise et la croissance de certaines essences comparées ne sont pas garanties puisqu'elles sont l'objet de l'expérimentation. Le propriétaire doit donc être particulièrement motivé pour mettre à disposition ses terrains et contribuer à l'avancement des connaissances et à leur diffusion sans contrepartie aux risques auxquels il s'expose. Il doit également accepter les visites régulières pour les mesures et pour la vulgarisation. Les travaux de plantation et d'entretiens sont à sa charge dans le cadre de la gestion normale, même si cela

occasionne des précautions particulières qui seront compensées par un appui des techniciens et ingénieurs du CNPF. Une convention non contraignante est rédigée pour bien fixer les objectifs de l'essai et les engagements respectifs du propriétaire et du CNPF. La majorité des propriétaires associés à ce travail est issue du CETEF de Bourgogne groupe Douglas et de la Société Forestière de la Caisse des Dépôt et Consignations, partenaire du PEI.

3.3.2.1. Description des sites

Pour le choix des sites, une attention particulière a été portée quant à la sensibilité du douglas sur les différents gradients écologiques de la Bourgogne (voir carte page suivante). Le réseau de dispositifs a été installé de manière à explorer au maximum la diversité des contextes écologiques (climat, conditions stationnelles) des aires de production actuelles, tout en anticipant leur évolution.

Thématique	Communes	Dept	Région naturelles IFN
Essai plantation en mélange			
	SUIN	71	Clunisois
	St BONNET DE JOUX	71	Charolais Brionnais
	TOULON SUR ARROUX	71	Charolais Brionnais
	LA TAGNIERE	71	Plateau Autunois
	GUEUGNON	71	Charolais Brionnais
	GUEUGNON	71	Charolais Brionnais
	LA GRANDE VERRIERE	71	Morvan
	CHEVAGNY SUR GUY	71	Clunisois
	ST VALLIER	71	Charolais Brionnais
	MOLPHEY	21	Morvan
	VILLERS EN MORVAN	21	Morvan
	LA BUSSIÈRE SUR OUCHE	21	Montagne Bourguignonne
	LA BUSSIÈRE SUR OUCHE	21	Montagne Bourguignonne
	NOLAY	21	Sologne Bourbonnaise
	NOLAY	21	Sologne Bourbonnaise
	SAINT BONNOT	58	Plateau nivernais
	MONTSAUCHE	58	Morvan
	ST FRANCHY	58	Bazois
	ARLEUF	58	Morvan
	SAILLY	58	Clunisois

Légende

◆ Essai plantation

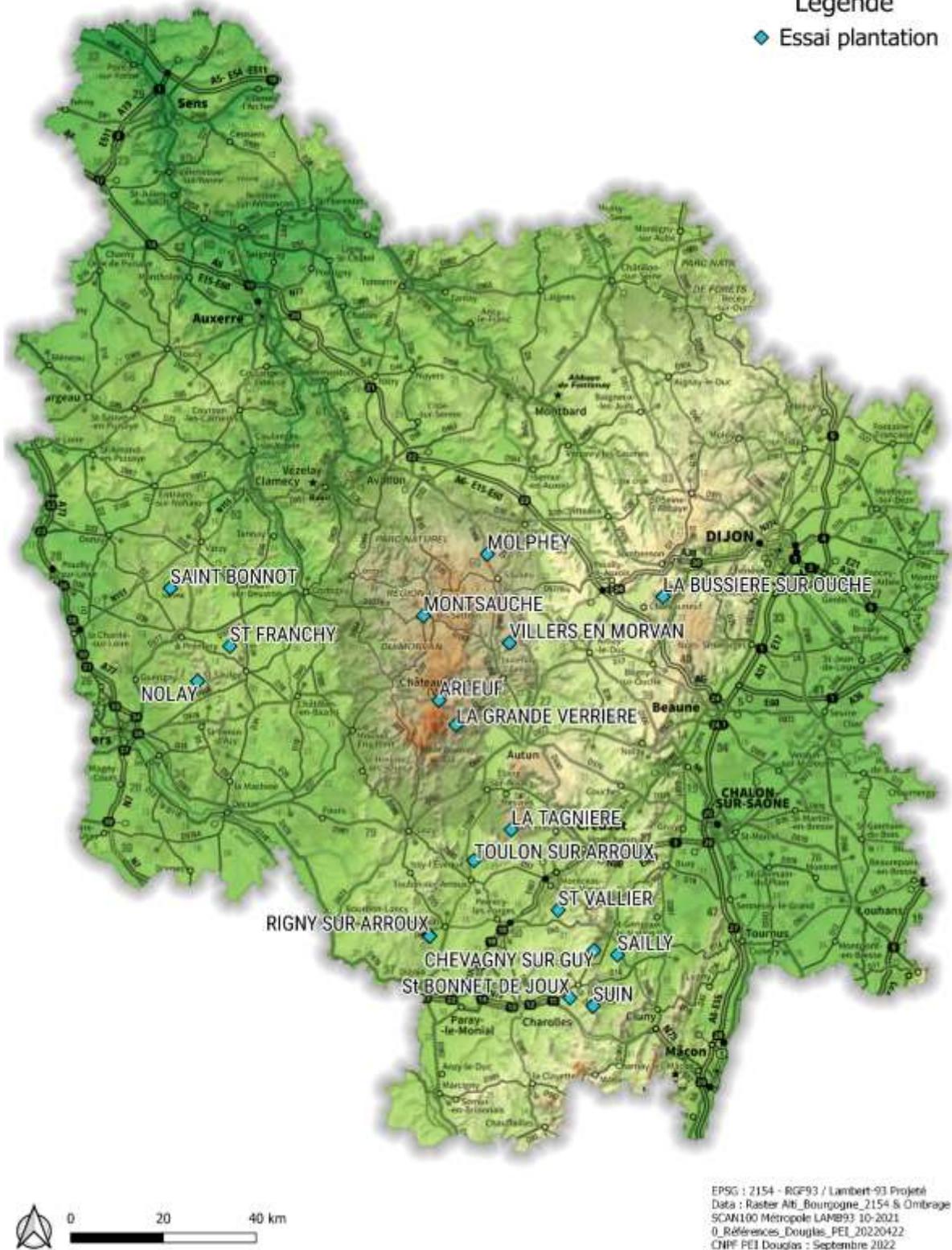


Figure 61 : Carte de localisation des essais plantation en mélange

3.3.2.2. Gradient stationnel

Les plantations ont été réalisées sur un panel d'altitude assez étendu afin d'explorer au mieux le gradient altitudinale de la Bourgogne. L'altitude des peuplements sélectionnés varie de 266 m (Saint Bonnot 58) pour la plantation la plus basse à 652 m pour la plantation la plus haute dans le Morvan (Arleuf 58) voir figure 29.

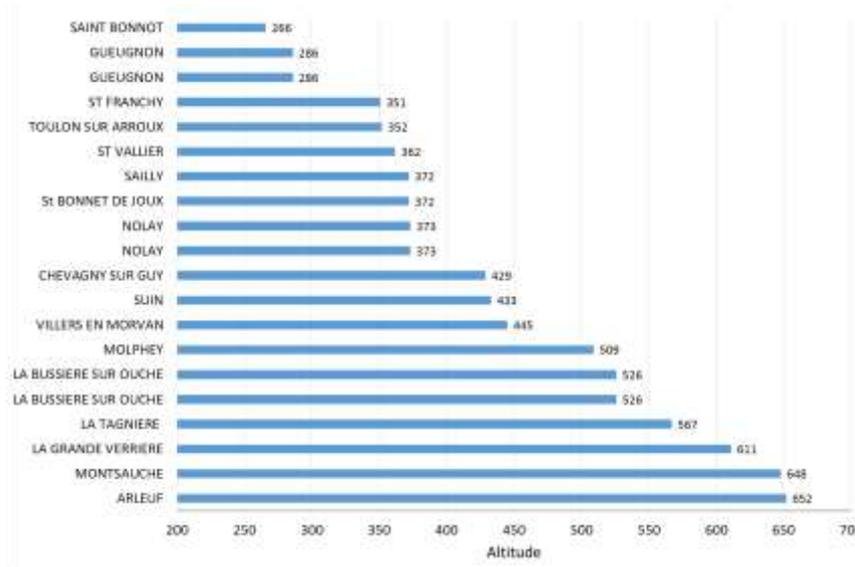


Figure 62 : Répartition des altitudes des plantations installées

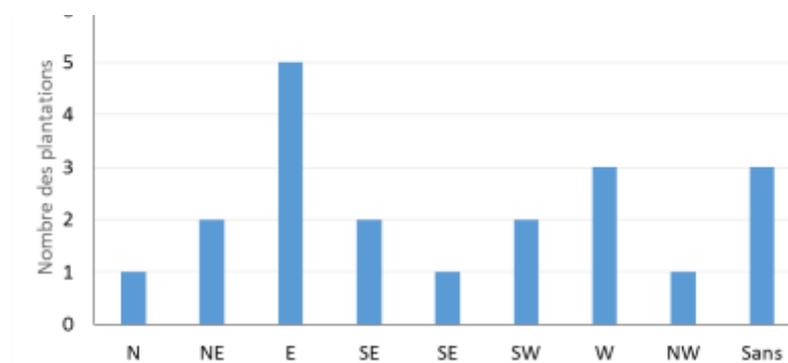


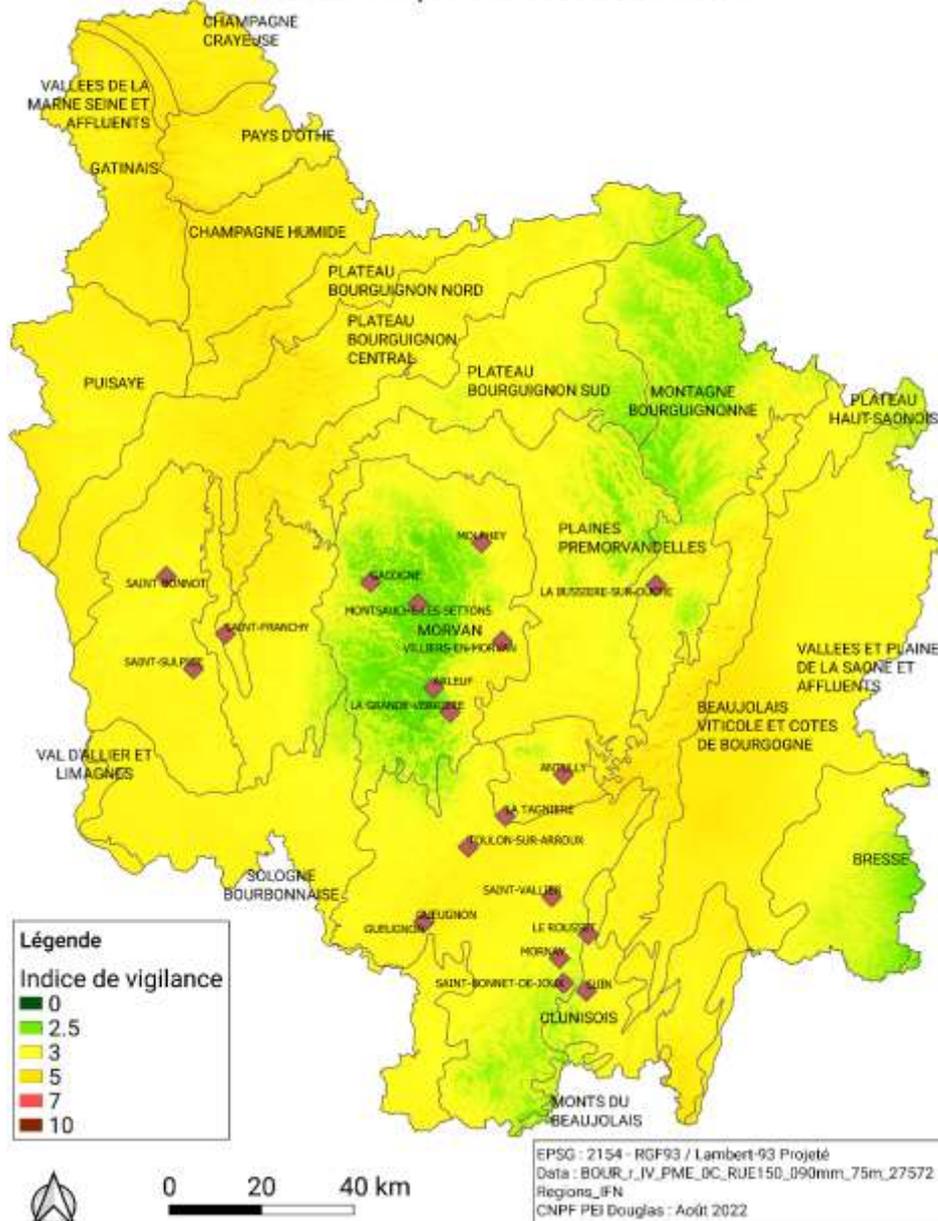
Figure 63 : Répartition de l'exposition des plantations

Un diagnostic stationnel des sites pré-choisis a été réalisé pour vérifier qu'il n'y a pas de facteur limitant remettant en cause l'installation d'un essai (hydromorphie ou zone compacte proche de la surface, sol superficiel ...). L'homogénéité d'un site étant primordiale, des sondages à la tarière pédologique ont systématiquement été réalisés.

Ont été choisis de préférence des sites d'une surface d'au moins 2 fois celle de l'essai de manière à disposer d'une certaine souplesse dans le choix de l'emplacement de l'essai mais aussi pour pouvoir laisser une zone tampon entre les peuplements voisins d'une distance au moins égale à leur hauteur estimée en fin d'essai.

Les sites ont été choisis de manière à couvrir un panel de situations variées dans lesquelles le douglas est présent et dont les enjeux face aux changements climatiques sont importants. Trois

Carte d'indice de vigilance BioClimSol pour le Douglas en Bourgogne
Réseau d'essais de plantation en mélange
Scénario climatique : 0°C - RUE150 = 90mm



3.3.2.3. Fourniture du matériel végétal

Dans le cadre de la constitution de ce réseau de plantations mélangées, associant et comparant différentes espèces et/ou provenances, le choix du matériel végétal revêt une importance primordiale.

Le choix des espèces a été réalisé essentiellement à partir des listes d'essences potentielles établies pour la région mais également quelques essences moins connues afin de tester leur potentielle adaptation. Dans tous les cas, il a été tenu compte des exigences autécologiques connues des essences, qui doivent être compatibles avec les caractéristiques stationnelles générales du site retenu.

Dans un contexte de pénurie de plants et de nouvelles essences peu ou pas utilisées à ce jour en Bourgogne, les relations et partenariat avec les pépiniéristes de toute la France ont été importantes pour obtenir les variétés et provenance souhaitées. 5 pépiniéristes ont été retenus pour la fourniture des plants pour l'ensemble des 20 essais. Tous les éléments justificatifs de l'identité des matériels utilisés ont été soigneusement archivés : catégorie réglementaire (couleur d'étiquette, provenance : verger à graine, cultivar), origine précise pour le matériel non réglementé.

Les types de plants retenus ont été majoritairement des plants en godet, les plants racines nues ont été choisis seulement lorsque la fourniture de godet n'a pas été possible.

La réception des plants s'est faite avec soin en présence du technicien CNPF (vérification de la conformité des espèces et des qualités avec la commande).

27 000 plants de 19 essences forestières répartis sur 22 hectares ont été installés
dans le cadre de ces plantations expérimentales.



Figure 64 : Réception des plants (Photo B. Borde)

Bilan des plants financés par le FEADER dans le cadre du Projet :

Communes des essais	Essences et proportions	Nombre de plants financé par le FEADER
Toulon-sur-Arroux (71)	Douglas Luzette (12,5 %) Douglas Californie (12,5 %) Sapin Bornmuller (25 %) Cèdre de l'Atlas (25 %) Pin maritime (25 %)	1840
La-Bussière-sur-Ouche (21)	Douglas Luzette (33 %) Cèdre de l'Atlas (66 %)	1649
Nolay (58)	Douglas Californie (16,5 %) Pin maritime (16,5 %) chêne sessile (33 %) Noisetier de Byzance (33 %)	1669
St Bonnot (58)	Chêne sessile (20 %) Douglas Californie (20 %) Sapin Bornmuller (10 %) Cèdre de l'Atlas (20 %) Pin maritime (20%) Noisetier de Byzance(10 %)	1984
Arleuf (58)	Douglas (régénération) Séquoia toujours vert (50 %) Séquoia géant (50 %)	Financement propriétaire
Nolay (58)	Douglas Californie (16,5 %) Cèdre de l'atlas (16,5 %) Chêne sessile (33 %) Chêne pubescent (33 %)	1669
Sailly (71)	Douglas Luzette (66 %) robinier (33 %)	Financement propriétaire
Chevagny-sur-Guy (71)	Douglas Luzette (12,5 %) Douglas Californie (12,5 %) Sapin Bornmuller (25 %) Cèdre de l'Atlas (25 %) Pin maritime (25 %)	1960
La Grande-Verrière (71)	Douglas Luzette (12,5 %) Douglas Californie (12,5 %) Cyprès de l'Arizona (25 %) Cèdre de l'Atlas (25 %) Séquoia sempervirens (25 %)	1332
Gueugnon (71)	Douglas Luzette (16,5 %) Douglas Californie (12,5 %) Cyprès de l'Arizona (25 %) Cèdre de l'Atlas (25 %) Pin maritime (25 %)	1332
St Bonnet-de-Joux (71)	Douglas Luzette (33 %) Cèdre de l'Atlas (33 %) Chêne rouge (33 %)	Financement propriétaire
Montsauche-les-Settons (58)	Douglas Luzette (12,5 %) Douglas Californie (12,5 %) Cyprès de l'Arizona (25 %) Cèdre de l'Atlas (25 %) Séquoia sempervirens (25 %)	1332
St-Franchy (58)	Douglas Luzette (12,5 %) Douglas Californie (12,5 %) Cyprès de l'Arizona (25 %) Sapin de Céphalonie (25 %) Chêne pubescent (25 %)	1332
La Tagnière (71)	Douglas Luzette (12,5 %) Douglas Californie (12,5 %) Sapin Bornmuller (25 %) Cèdre de l'Atlas (25 %) Noisetier de Byzance(25 %)	1960
St-Vallier (71)	Douglas Luzette (12,5 %) Douglas Californie (12,5 %) Sapin Bornmuller (25 %) Cèdre de l'Atlas (25 %) Pin maritime (25 %)	1960
La-Bussière-sur-Ouche (21)	Douglas Luzette (33 %) Cèdre de l'Atlas (33 %) Noisetier de Byzance (33 %)	1773
Villiers-en-Morvan (21)	Douglas Luzette (12,5 %) Douglas Californie (12,5 %) Sapin Bornmuller (25 %) Cèdre de l'Atlas (25 %) Pin maritime (25 %)	1860
Molphey (21)	Douglas Luzette (12,5 %) Douglas Californie (12,5 %) Sapin Bornmuller (25 %) Cèdre de l'Atlas (25 %) Pin maritime (25 %)	1960
Suin (71)	Douglas Luzette (50 %) Chataignier (50 %)	Financement propriétaire
Gueugnon (71)	Sophora du Japon Noisetier de Byzance Tulipier de Virginie Févier à 3 épines Eucalyptus Gunnii	1665
		27277

3.3.2.4. Préparation des plantations

Une attention particulière a été portée à la préparation des terrains et des sols pour disposer d'un chantier soigné et homogène afin que l'accès aux plants soit simple et les risques de mortalité autant que possible réduits. Une préparation du terrain a été réalisée sur l'ensemble des sites selon diverses modalités : Broyage en plein, broyage en bande avec conservation du recrû, andainage, éparpillement des rémanents conservés au sol. Une préparation du sol a été réalisée sur 3/4 des essais avec les modalités suivantes : Sous solage, Culti-Forest sur mini pelle, potets travaillés.

Le choix de la densité a été identique sur l'ensemble des sites, à savoir 1300 plants/ha (3m x 2,5 m). Un piquetage des essais de plantation sur l'ensemble du site a été indispensable pour guider les planteurs, des codes couleurs ont été utilisés pour matérialiser les zones où les planteurs devaient changer d'espèce. Les risques de dégâts de gibier étant souvent important sur le secteur, une protection TRICO a été appliquée sur la plupart des sites.

Communes des essais	Préparation du terrain	Préparation du sol
Toulon-sur-Arroux (71)lan	Broyage en plein	Sous-solage
La-Bussière-sur-Ouche (21)	Broyage en plein	Sous-solage
Nolay (58)	Broyage bande	Culti-Forest sur ligne
St Bonnot (58)	Andain	Aucune
Arleuf (58)	Andain	Aucune
Nolay (58)	Broyage bande	Culti-Forest sur ligne
Sailly (71)	Andain	Aucune
Chevagny-sur-Guy (71)	Broyage	Sous-solage
La Grande-Verrière (71)	Broyage en plein	Aucune
Gueugnon (71)	Broyage en plein	Culti-Forest sur ligne
St Bonnet-de-Joux (71)	Aucune	Potet
Montsauche-les-Settons (58)	Aucune	Potet
St-Franchy (58)	Broyage en plein	Culti-Forest sur ligne
La Tagniere (71)	Broyage en plein	Potet
St-Vallier (71)	Broyage bande	Potet
La-Bussière-sur-Ouche (21)	Broyage en plein	Sous-solage
Villiers-en-Morvan (21)	Andain	Sous-solage
Molphey (21)	Broyage bande	Potet
Suin (71)	Andain	Aucune
Gueugnon (71)	Broyage en plein	Culti-Forest sur ligne



Figure 65 : Préparation du sol au Culti-Forest St Vallier (71) (Photo B. Borde)

3.3.2.5. Caractéristiques des dispositifs

| Surface

Les 20 dispositifs de plantation en mélange ont été réalisés sur une surface comprise en 1 ha et 1,5 ha. Pour ce type d'essai à la plantation, une surface inférieure aurait rendu les données futures plus difficilement exploitables. Les plantations ont été matérialisées par des piquets durables d'au moins 1,20 m plantés à chaque angle de parcelle puis au départ des lignes de plantation avec un code couleur par essence.

| Durée de suivi envisagée

L'objectif futur est de réaliser un suivi prolongé, éventuellement sur une révolution complète afin d'appliquer un scénario sylvicole jusqu'à la densité finale de 200 tiges/ha.

| Temps d'installation

Variable d'un site à l'autre, le temps moyen d'installation d'un essai a été d'environ 8 jours, comprenant les opérations préliminaires (protocole, recherche du site, relations avec le propriétaire et le gestionnaire, recherche et commandes des plants, préparation de l'essai, relevé de terrain, cartographie), l'installation (piquetage, réception des plants et regroupement, livraison des plants sur les chantiers, matérialisation de l'essai, appui à la plantation et respect des consignes) et le suivi après plantation (contrôle de reprise, première mesure et saisies, compte-rendu).



Figure 66 : Piquetage d'un essai à la plantation – Molphey (21) (Photo B. Borde)

3.3.2.6. Description de l'essai et compte rendu d'installation

La description de l'essai est réalisée lors de l'installation et tous les éléments sont consignés dans le dossier de l'expérimentation transmis aux responsables départementaux du CNPF. Ce document devra être transmis aux expérimentateurs successifs car ce dossier constitue la mémoire de l'essai. Les données de chacun des essais ont été répertoriées dans la base de données ILEX des expérimentations du CNPF.

Chacun des 20 essais a fait l'objet d'un compte-rendu complet détaillant les points suivants :

- | situation de l'essai et renseignement généraux ;
- | données climatiques et stationnelles et données pédologiques ;
- | diagnostic climatique BIOCLIMSOL ;
- | objectifs du suivi et intérêt du dispositif ;
- | descriptif de la plantation ;
- | peuplement antécédent ;
- | travaux préparatoires ;
- | essences et matériels végétaux retenus ;
- | travaux de plantation et dispositifs de mélange ;
- | bilan économique ;
- | résultats et observations ;
- | choix des essences au regard des facteurs limitants climatiques ;
- | modalités de mélange et taux de reprise ;
- | plan du dispositif.



*Livraison des plants sur la parcelle
 St-Franchy (58) (Photo B. Borde)*



*Préparation des caisses de plants mélangés
 St Vallier (71) (Photo B. Borde)*



*Contrôle plantation et respect des consignes
 St-Franchy (58) (Photo B. Borde)*



*Mesure taux de reprise
 Molyhey (21) (Photo B. Borde)*

Figure 67 : Exemple d'un compte-rendu d'installation de plantation expérimentale

Réseau de référence « Douglas et changement climatique » Essai plantation en mélange et essences alternatives

Renseignements généraux - Localisation

Commune de situation de la parcelle	Molphey (21)	N° parcelle Cad. : N° PSG :	D 0226 J 21-0461-3
Coord. Géog WGS 84 :	Latitude : 47,3262 Longitude : 4,1985	Surface :	1,5 ha
Propriétaire :	CNP Assurances	Gestionnaire :	Société Forestière de la Caisse des dépôts



Données climatiques et stationnel

Valeurs moyennes sur la période 1981-2010
issues du modèle NorCIS©CNPF construit à partir des données Météo-France et AgroParisTech

- Moyenne des températures annuelles (TMAN) : 10,3 °C
- Moyenne des températures maximales juin-août (TX0608) : 23,9 °C
- Moyenne des températures minimales de janvier (TN01) : -0,8 °C
- Température minimale absolue (TNABS) : -18,1 °C
- Précipitations annuelles : 1000 mm
- Précipitations avril-octobre : 563 mm
- ETP (Turc) annuelle : 701 mm
- P-ETP (Turc) juin-août : -142 mm
- P-ETP (Turc) mai-septembre : -137 mm
- Altitude : 509 m
- Exposition : 150 degrés
- Pente : 7 %
- Confinement : 7 %
- Position topographique : Milieu de versant
- TPI : 0,56
- Alimentation en eau : pertes ≈ apports
- Affleurement rocheux : 0 %
- Terrasse : non

Données Pédologiques

Horizon	Épaisseur	Texture	% éléments grossiers	Effervescence	Hydromorphie
1	25 cm	Limons sableux (LS)	0	non	0
2	35 cm	Limons moyens sableux (LmS)	5	non	0

- Compacité : Meuble, peu compact
- Cause anét tarière : Éléments grossiers
- Forme d'humus : Dysmoder
- pH à 20 cm : 5,00 (valeur non mesurée)
- Réservoir utile en eau : 89 mm

Commentaires :

Diagnostic climatique BIOCLIMSOL

L'indice de vigilance IBS varie de 0 à 10, il traduit la probabilité d'observer un phénomène de dépérissement, plus il est élevé, plus la probabilité d'observer du dépérissement est élevée.

0 à 3 : **Vigilance Modérée**

4 à 6 : **Vigilance Elevée**

7 à 10 : **Vigilance Maximale**

	Essences avec IBS		
	Actuel	+1°C	+2°C
Chêne pubescent	1	1	2
Châtaignier (montagne continentale)	1	2	4
Chêne sessile	2	3	4
Douglas vert	3	5	4
Châtaignier (plaine océanique)	2	4	5
Hêtre commun	3	4	5
Chêne pédonculé	3	5	8
Pin sylvestre	3	5	6
Cèdre de l'Atlas	6	6	6
Sapin pectiné	6	7	9

Objectifs du suivi et intérêt du dispositif

Reboisement suite à coupe sanitaire d'un peuplement d'épicéa commun. Objectif de constituer une futaie résineuse mélangée plus résiliente aux futurs aléas climatiques.

Diagnostic climatique Bioclimsol de la station. Test du douglas Californien (VG-006) en comparaison avec la provenance Luzette (VG-002), test du cèdre de l'Atlas, sapin de Bornmuller et Pin Maritime.

Effet du mélange à la plantation sur la résilience du Douglas face au changement climatique et test de la modalité de mélange par bouquet de 9 plants.

Descriptif de la plantation

Peuplement antécédent :

Peuplement adulte d'épicéas communs scolytés, récolte définitive pour raison sanitaire en 2019.

Travaux préparatoires :

Février 2021 : Broyage de la végétation et des souches sur 2 m réalisé tous les 6,5 m d'axe en axe. Réalisation de potets travaillés dans le recru au Cultiforet.

Essences retenues pour le dispositif :

Douglas VG-002 Luzette GR350/400 1+0 (Pép. Robin)
Douglas VG-006 Calif. GR350/400 1+0 (Pép. Robin)
Cèdre de l'Atlas CAT900 M400 1+0G (Pép. Lemonnier)
Pin maritime PPAVG011 Beychac VF3 (FORELITE)
Sapins de Bornmuller Bolu-Kokez godets 350 (Pép. Robin)

La qualité et l'origine des plants étant une priorité, le choix de plants sélectionnés («étiquette Verte») et de plants en godet a donc été retenu.

Travaux de plantation et dispositif de mélange :

Plantation à la densité de 1330 tiges/ha (3 m entre les lignes et 2,5 m sur la ligne)

Plantation par bouquets de 9 plants (3 plants consécutifs sur 3 lignes pour une même essence)

Plantation en mélange avec une proportion 25% douglas, 25% cèdre, 25% sapin de Bornmuller, 25% Pin Maritime en mélangeant 2 essences sur chaque bande de 3 lignes. On alterne une bande pins maritimes/douglas avec une bande Cèdres/sapins.



Bilan économique

	Plantation à la densité de 1330 tiges/ha	Coût HT/ha
Février 2021	Broyage de la végétation (Broyeur lourds) sur 2 m tous les 6,5 m axe en axe	660 €
Février 2021	Potets travaillés au cultiforet sur les lignes de plantation (0,48€/u)	638 €
avril 2021	Plantation manuelle à 0,50 € par plant	665 €
	Fourniture de 245 douglas VG-002 GR350 à 0,99 € par plant	242 €
	Fourniture de 245 douglas VG-006 GR200 à 0,46 € par plant	112 €
	Fourniture de 490 cèdres CAT-900 GR430 à 1,54 € par plant	754 €
	Fourniture de 490 Sapins VG-006 GR350 à 2,10 € par plant	1029 €
	Fourniture de 490 Pins maritimes VG-011 GR200 à 0,35 € par plant	171 €
	Traitement hylobe	330 €
Automne 2021	Dégagement sur la ligne de plantation	*450 €
	* Estimation	5 051 €/ha

Résultats et observations

Le suivi du dispositif consiste à étudier le développement et la conduite du douglas en mélange, observer la dynamique de croissance et la concurrence entre les essences, suivre l'évolution sanitaire notamment face aux changements climatiques et réaliser un suivi technique et économique.

Perspectives d'un reboisement en mélange

Atouts	Faiblesses
<ul style="list-style-type: none"> Répartition des risques de stabilité et phytosanitaires Diversité et possibilité d'irrégulariser à long terme Meilleurs humus et exploration du sol (eau) Meilleure activité biologique des sols : fane améliorante, éclairage au sol varié... Peuplement diversifié : atouts environnementaux, faunistiques et paysagers 	<ul style="list-style-type: none"> Mélanges à préconiser uniquement sur stations compatibles avec toutes les essences Installation légèrement plus compliquée Obligation de baser les dégagements sur l'espèce la moins vigoureuse Surveillance régulière et intervention (dépressage) pour suivre l'évolution de la compétition entre les essences et maintenir le mélange

Choix des essences au regard des facteurs limitants climatiques (climessences)

Douglas (*Pseudotsuga menziesii*) : Résistance juvénile moyenne aux fortes sécheresses, résistance adulte aux fortes sécheresses a priori moyennes, dépend des provenances utilisées, de la station (exposition et profondeur du sol) et de la sylviculture. Des dépérissements ont été constatés lors des sécheresses de ces dernières années sur sol à faible réserve en eau. Adaptation aux climats déficitaires en eau a priori moyenne et dépendant des provenances, Californie mieux adaptées mais de croissance plus faible au départ. Peu sensible aux gels précoces mais pourrait le devenir en cas de réchauffement climatique entraînant un aoûtement tardif (surtout provenances du sud de l'aire).

Cèdre de l'Atlas (*Cedrus atlantica*) : Jeunes plants sensibles aux fortes sécheresses en phase d'installation du fait d'une mauvaise régulation stomatique (observations lors de la sécheresse de 2003). Adulte supportant les fortes sécheresses s'il a pu installer son enracinement puissant suffisamment profondément. Craint les vents hivernaux desséchants. Existence de symptômes de coulure de résine dans des cédraies de basse altitude (moins de 500 m) et/ou sol à faible réserve en eau. Bien adapté aux climats à étés secs (2 à 4 mois secs). Supporte les fortes chaleurs (jusqu'à 41°C). Craint les grands froids prolongés (au-dessous de -25°C). Sensible aux gelées de printemps,

Sapin de Bornmuller (*Abies bornmuelleriana*) : Bonne résistance juvénile aux fortes sécheresses si enracinement correct. Supporte davantage la sécheresse à l'état adulte qu'*A. nordmanniana*, mais moins que *A. cephalonica*. Résistance aux fortes chaleurs (canicules) et bonne résistance aux grands froids et aux gels précoces. L'un des sapins les moins touchés par les gelées de printemps, il débourre encore plus tard qu'*Abies nordmanniana*. Essence à utiliser en diversification dans un mélange, la sensibilité aux scolytes de cet abies n'étant pas connue.

Pin maritime (*Pinus pinaster*) : Résistant à la sécheresse à l'état jeune, avec de très bons taux de reprise. Adulte, supporte bien la sécheresse estivale (jusqu'à 4 mois), aucun problème au cours des dernières années sèches et chaudes. Bonne résistance aux fortes chaleurs (canicules). Les provenances landaises supportent jusqu'à -20°C, le houppier reste fragile au givre et à la neige lourde.

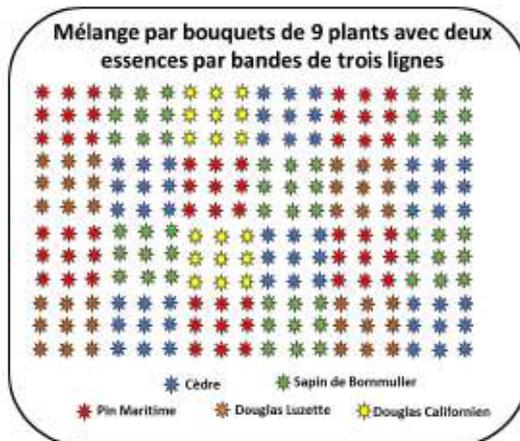
Modalité de mélange et taux de reprise

La modalité de mélange testée avec des bouquets de 9 plants a été retenue afin de mélanger au mieux les essences sur la surface, tout en tenant compte d'une vitesse de croissance différente des essences.

L'association, sur les lignes, d'essences «poussantes» (pin maritime et douglas) et d'essences plus lentes (Cèdres et Sapins) permettra, entre autres, de mieux répartir les risques en cas de défaillance de l'une ou l'autre des variétés ainsi que d'utiliser les ressources de manière complémentaire.

La mise en place des plants avec cette modalité de mélange n'a pas présenté de contrainte particulière aux planteurs. Un jalonnage de la plantation avec un code couleur est cependant nécessaire.

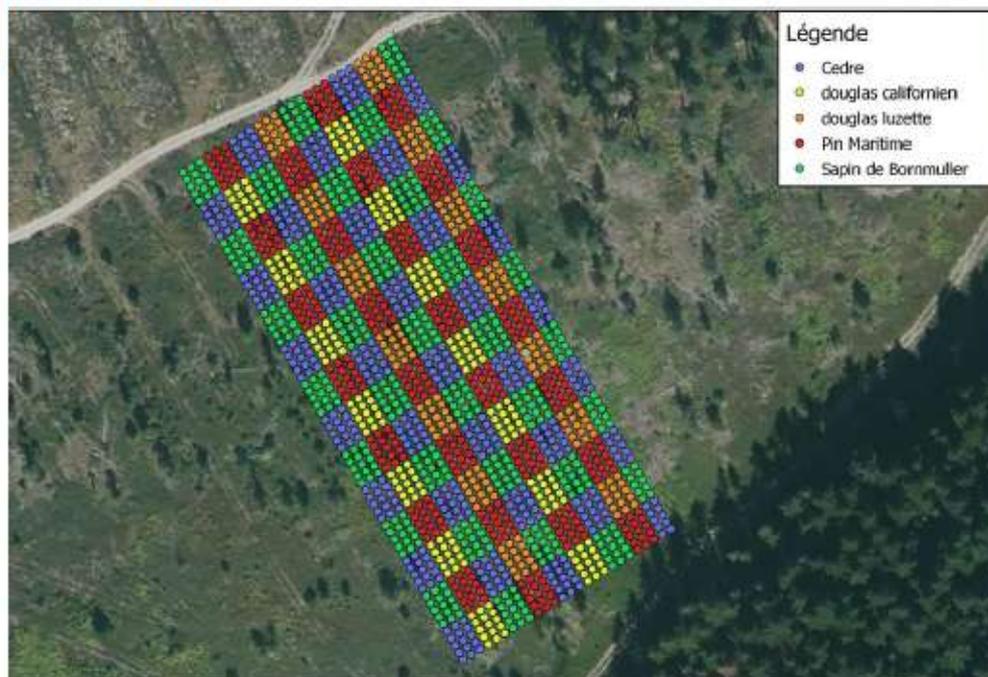
Un taux de reprise a été réalisé en début d'été de la première année de végétation. Des observations seront réalisées sur une période d'au moins 10 ans. Elles permettront d'étudier l'adaptabilité des différentes essences testées aux climats observés sur le territoire de la Bourgogne et d'observer le comportement de ces essences en mélange avec le douglas.



Suivi reprise 100 plants par essences (10/08/2021) - Protocole DSF

ESSENCE	Douglas VG 002 Luzette	Douglas VG 006 Californie	Cèdre de l'Atlas	Pin Maritime	Sapin Bornmuller
% plants vivants	86%	78%	81%	89%	94%

Plan du dispositif



14 mars 2022

Bruno BORDE
bruno.borde@cnpf.fr
06.12.01.45.00

Lucas SCHNAPPER
Lucas.schnapper@cnpf.fr
07.64.37.01.44

Réseau de référence

Centre National de
la Propriété Forestière



3.3.2.7. Implantation cartographique des mélanges sous QGIS

Une application développée sous Qgis a permis de réaliser un plan précis de chacun des dispositifs de mélange. On utilise la « boîte à outils de traitement » pour effectuer une carte d'implantation arbre par arbre sur la parcelle à planter. Un extrait du traitement python utilisé est présenté en figure 31. Les données d'entrée sont le [polygone de la parcelle](#) à planter et la [ligne de base de l'implantation](#), sur laquelle on se base pour réaliser la plantation (polyligne). Les traitements utilisés sont « [réseau de lignes décalées](#) », et « [points le long d'une géométrie](#) ».

On découpe les lignes selon l'emprise du polygone de la parcelle. Les paramètres à renseigner sont la distance entre les lignes de plantation (en mètre) dans le réseau de lignes décalées, et la distance entre les plants dans « points le long d'une géométrie ».

Attention à utiliser une projection conique conforme « Lambert 93 » dont l'unité de distance est en mètres et non en degrés.

L'algorithme renvoie en sortie la couche « arbres » qui localise la position de chaque arbre à planter sur la parcelle.

```

32     # Réseau de lignes décalées (parallèles)
33     alg_params = {
34         'COUNT': 250,
35         'INPUT': parameters['Lignedebasedelimplantation'],
36         'JOIN_STYLE': 0,
37         'MITER_LIMIT': 2,
38         'OFFSET': 3,
39         'SEGMENTS': 8,
40         'OUTPUT': QgsProcessing.TEMPORARY_OUTPUT
41     }
42     outputs['RseauDeLignesDcalesParallles'] = processing.run('native:arrayoffsetlines', alg_params, context=context, feedback=feedback)
43     feedback.setCurrentStep(1)
44     if feedback.isCanceled():
45         return {}
46
47     # Couper
48     alg_params = {
49         'INPUT': outputs['RseauDeLignesDcalesParallles']['OUTPUT'],
50         'OVERLAY': parameters['Parcelleplantation'],
51         'OUTPUT': QgsProcessing.TEMPORARY_OUTPUT
52     }
53     outputs['Couper'] = processing.run('native:clip', alg_params, context=context, feedback=feedback)
54
55     feedback.setCurrentStep(2)
56     if feedback.isCanceled():
57         return {}

```

Figure 68 : Extrait du traitement permettant de cartographier l'implantation des arbres sur la parcelle

Afin de définir le schéma de mélange, on applique sur cette couche une requête de calcul via la « calculatrice de champs » (langage SQL). Ce second traitement se base sur les distances entre les points et l'instance de ligne (numéro de la ligne) et crée un nouveau champ « essence » dans la couche d'implantation. La requête dépend du schéma d'implantation choisi, du type de mélange ainsi que des essences utilisées dans l'essai. En Figure 69 est présenté un exemple de requête, pour une plantation en mélange par îlots.

```

1 CASE
2   WHEN ("distance"/2.5)%10<5 THEN
3     CASE
4       WHEN ("instance") %12<3 THEN 'douglas luzette'
5       WHEN ("instance") %12<6 THEN 'Sapin de Bornmuller'
6       WHEN ("instance") %12<9 THEN 'Pin Maritime'
7       ELSE 'Cedre'
8     END
9   WHEN ("distance"/2.5)%10<10 THEN
10    CASE
11     WHEN ("instance") %12<3 THEN 'Pin Maritime'
12     WHEN ("instance") %12<6 THEN 'Cedre'
13     WHEN ("instance") %12<9 THEN 'douglas californien'
14     ELSE 'Sapin de Bornmuller'
15    END
16 END

```

Figure 69 : Exemple d'algorithme de définition du mélange - exemple par îlots de 15 plants

On obtient une carte détaillée de l'essai, selon le type de mélange et les limites définies de la parcelle. En utilisant le script ci-dessus, on obtient l'exemple de l'essai de Molphey, visible en Figure 70.

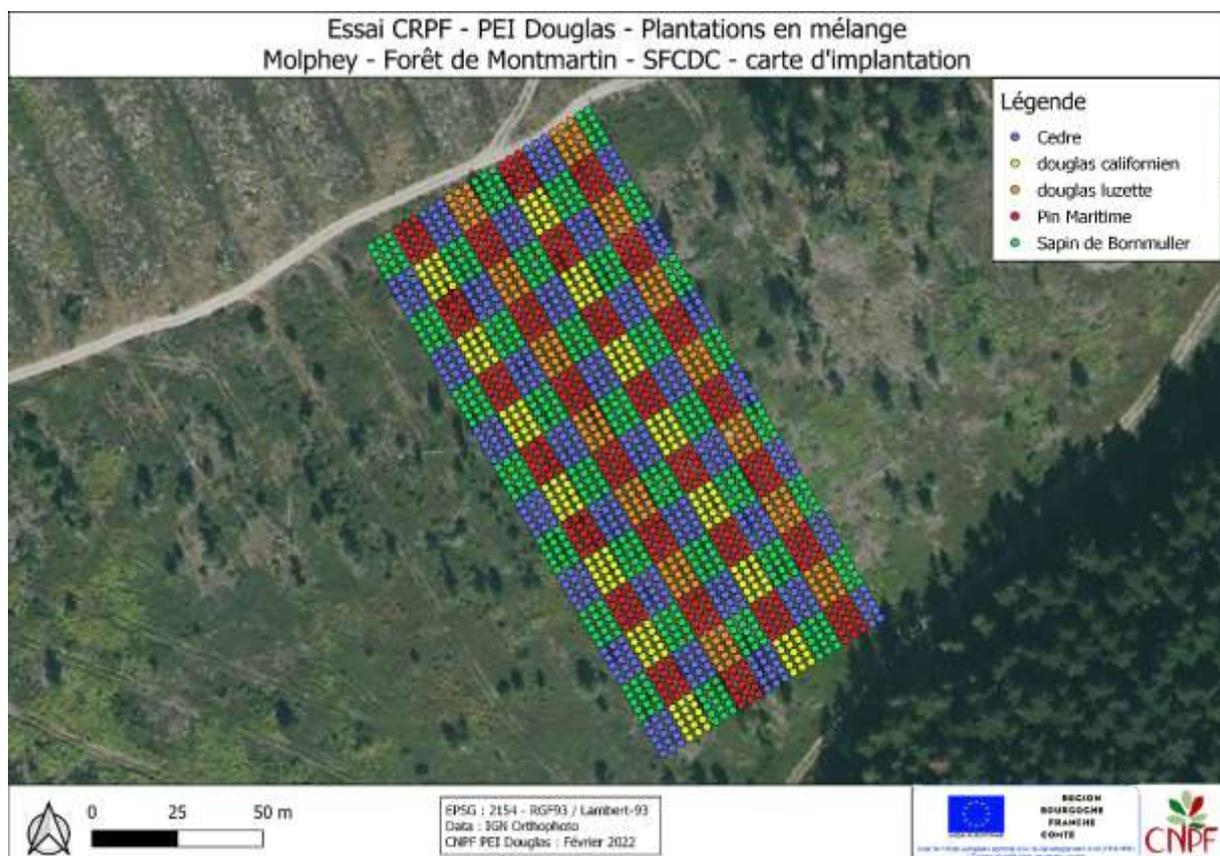


Figure 70 : Carte d'implantation en mélange, par îlots de 15 plants, avec 4 essences et 2 provenances de Douglas différentes.

3.3.3. Choix des essences et des origines testées en association avec le douglas ou comme espèce de substitution

Le choix des essences forestières constitue un élément central de décision dans l'élaboration d'un projet de plantation mélangée. Il engage le forestier sur le long terme. Cet enjeu est aujourd'hui crucial dans un contexte de changement climatique et l'incertitude qui pèse sur les évolutions possibles du climat et les réponses des peuplements forestiers.

Les essences objectives à associer au douglas doivent résister au climat actuel et être adaptées à un climat futur imparfaitement connu.

Les outils BIOCLIMSOL et CLIMESSENCE ont été utilisés pour guider le choix des essences à associer au douglas dans un contexte de changement climatique. Ces outils sont à ce jour les plus élaborés qu'ils soient. Développés à partir d'une analyse de données spécifiques autécologiques et d'une projection des données de modélisation des aires de compatibilité pour le climat actuel et pour différents scénarios climatique futurs, ils permettent d'orienter ou de conforter une décision dans la recherche d'essence à associer au douglas en mélange ou dans le cas de substitution pour cause de dépérissement.

Le choix des essences à associer au douglas ne doit jamais se faire en fonction d'une mode, d'un goût personnel ou de la disponibilité en plants, mais bien sur la base d'une réflexion raisonnée.

Les essences listées dans le tableau ci-dessous ont été testées dans les plantations mélangées ou comme essence de substitution au douglas

Nom vernaculaire	Genre	Espèce	Code MFR ou provenance
Cèdre de l'Atlas	CEDRUS	<i>atlantica</i>	CAT900
Châtaignier	CASTANEA	<i>sativa</i>	CSA 102 bassin parisien
Chêne pubescent	QUERCUS	<i>pubescens</i>	QPU 360 & QPU 341 Languedoc
Chêne sessile	QUERCUS	<i>petraea</i>	QPE 204 Nord-Est Greseux
Chêne rouge	QUERCUS	<i>rubra</i>	Qru902
Cyprès de l'Arizona	CUPRESSUS	<i>arizonica</i>	-
Douglas	PSEUDOTSUGA	<i>menziesii</i>	VG 002 – VG 006
Eucalyptus	EUCALYPTUS	<i>Gunnii</i>	New Zealand
Févier à trois épines	GLEDITSCHIA	<i>triacanthos</i>	-
Noisetier de Byzance	CORYLUS	<i>colurna</i>	-
Pin maritime	PINUS	<i>pinaster</i>	PPA/VG011 - Beychac VF003
Robinier faux acacia	ROBINIA	<i>pseudoacacia</i>	Roumanie K2 Carei
Sapin de Bornmüller	ABIES	<i>Bornmuellariana</i>	Turquie - Bolu Kokez
Sapin de Céphalonie	ABIES	<i>cephalonica</i>	-
Sequoia géant	SEQUOIA	<i>gigantea</i>	-
Sequoia toujours vert	SEQUOIA	<i>sempervirens</i>	Californie 097 et Multiclonal
Sophora du Japon	SOPHORA	<i>japonica</i>	-
Tulipier de Virginie	LIRIODENDRON	<i>tulipifera</i>	-

3.3.3.1. Essences à fort intérêt de production et potentiellement mieux résistantes que le douglas aux changements climatiques (Données CLIMESSENCE)

Le pin maritime (*Pinus pinaster*) : Résistant à la sécheresse à l'état jeune, avec de très bons taux de reprise. Supporte bien la sécheresse estivale (jusqu'à 4 mois) à l'âge adulte, aucun problème au cours des dernières années sèches et chaudes. Bonne résistance aux fortes chaleurs (canicules). Les provenances landaises supportent des températures jusqu'à -20° C, le houppier reste fragile au givre et à la neige lourde. Les provenances recommandées en Bourgogne sont issues des vergers VF3 avec une meilleure résistance au froid : PPA-VG-018 Beychac-II, PPA-VG-015 Saint-Sardos, PPA-VG-011 Beychac.

Cèdre de l'Atlas (*Cedrus atlantica*) : Jeunes plants sensibles aux fortes sécheresses en phase d'installation du fait d'une mauvaise régulation stomatique (observations lors de la sécheresse de 2003). Adulte supportant les fortes sécheresses s'il a pu installer son enracinement puissant suffisamment profondément. Craint les vents hivernaux desséchants. Existence de symptômes de coulure de résine dans des cédraies de basse altitude (moins de 500 m) et/ou sol à faible réserve en eau. Bien adapté aux climats à étés secs (2 à 4 mois secs). Supporte les fortes chaleurs (jusqu'à 41°C). Craint les grands froids prolongés (inférieurs à -25° C). Sensible aux gelées de printemps. L'installation des jeunes plants dans un recrû ou avec une végétation d'accompagnement est favorable au cèdre. La région de provenance CAT900 France est recommandée. Le cèdre apparaît en classe de vigilance 7 (maximale) dans BioClimSol car le modèle du cèdre a été construit en Ardèche, département avec de forts écarts thermiques entre la nuit et le jour (chaleurs avec l'influence méditerranéenne) qui est sujette à générer des nécroses sur le cèdre.

Sapin de Bornmuller (*Abies bornmuelleriana*) : Bonne résistance juvénile aux fortes sécheresses si enracinement correct. Supporte davantage la sécheresse à l'état adulte qu'*Abies nordmanniana*, mais moins que *Abies cephalonica*. Résistant aux fortes chaleurs (canicules), aux grands froids et aux gels précoces. L'un des sapins les moins touchés par les gelées de printemps, il débouffe encore plus tard qu'*Abies nordmanniana*. Essence à utiliser en diversification dans un mélange, la sensibilité aux scolytes de cet abies n'étant pas connue.

Le châtaignier (*Castanea sativa*) : Adapté en contexte de changements climatiques car il affectionne les climats chauds et tolère la sécheresse. Indice de vigilance modéré au regard de l'évolution climatique (indice 1 à 2 sur 10) car a priori peu sensible aux sécheresses à l'âge adulte, les jeunes plants peuvent cependant y être plus sensibles. Risque de dépérissement élevé lorsque le déficit hydrique estival dépasse 220 mm. Sensible aux gelées tardives à l'état jeune, il est donc à proscrire dans les « trous à gelées ».

Chêne rouge d'Amérique (*Quercus rubra*) : Résistant aux fortes sécheresses dans son aire naturelle, les avis sont variables en Europe occidentale. A priori mieux adapté aux climats secs (déficitaires en eau) que les chênes sessile et pédonculé. Supporte les canicules dans son aire naturelle continentale, jusqu'à 38°C, résiste aux grands froids (-40° C). Supporte bien les gels précoces mais sensible aux gelées tardives surtout à l'état jeune. Sensible au gibier et à la concurrence, nécessite une sylviculture dynamique. Peut être installé en mélange avec le douglas. La région de provenance recommandée en Bourgogne est QRU902 Nord-Est.

Le robinier faux acacia (*Robinia pseudoacacia*) : Supporte assez bien les épisodes chauds et secs. L'extension de l'espèce en régions semi-arides témoigne de sa tolérance à l'égard des déficits pluviométriques réguliers. Résistance aux fortes chaleurs (canicules) a priori bonne, supporte jusqu'à 40°C. Sensible aux gels précoces (aoûtement tardif) et aux gelées de printemps pour les provenances

des pays de l'Est (débourrement plus précoce). A favoriser lorsqu'il est présent, notamment en bordure de massif, éviter ou maîtriser son introduction eu égard à ses facultés de propagation importante.

Chêne pubescent (*Quercus pubescens*) : Adapté aux sécheresses estivales, bien adapté aux climats secs, mieux que les chênes sessile et pédonculé, essence thermophile, peut perdre son feuillage lors de périodes caniculaires. Peut résister à des températures de l'ordre de -20° C, au-delà il est sujet à des gélivures. A priori peu sensible aux gelées précoces mais sensible aux gelées de printemps.

Chêne sessile (*Quercus petraea*) : Peut supporter un certain déficit hydrique en plaine (moins de 600 mm) si le sol est bien alimenté en eau. Supporte mieux les canicules (jusqu'à 45°C) que le chêne pédonculé cependant sa croissance peut être affectée durant 2 à 4 ans à la suite de canicules. Son débourrement précoce le rend également assez sensible aux gelées de printemps. Peut supporter jusqu'à -30° C mais le tronc peut être affecté par des gélivures.

3.3.3.2. Essences moins courantes et testées pour leur potentielle résistance aux changements climatiques

Séquoia toujours vert : Résistance juvénile aux fortes sécheresses a priori bonne, semble particulièrement résistant aux chaleurs sèches à l'état adulte comme l'atteste son comportement lors des sécheresses de 2003 et 2006. Résistance aux déficits hydriques compromise en dessous d'une pluviométrie moyenne de 650 mm/an sans compensation hygrométrique et précipitations occultes et / ou un substrat à réserve en eau suffisante et accessible. Cependant, de nombreux sujets sains sont recensés en région méditerranéenne. Bonnes capacités de récupération de croissance après une année sèche. A priori résistant aux fortes chaleurs (canicules). Redoute les froids prolongés inférieurs -15° C à l'état jeune mais peut supporter -19°C à l'état adulte (froids de 1985). Le froid peut cependant provoquer un rougissement de l'arbre entier avant un reverdissement au printemps suivant. Sa limite altitudinale en France se situerait à 1000 m et le climat du quart nord-est ne lui est semble-t-il peu favorable. Craint les gels précoces à l'état jeune et sensible aux gels tardifs

Cyprès de l'Arizona (*Cupressus arizonica*) : Climat général, dans l'aire naturelle de distribution, semi-aride avec précipitations moyennes annuelles comprises entre 250 à 300 mm, en été et au printemps (plus enneigement hivernal). Arbre très résistants à la sécheresse grâce à son enracinement profond et à sa bonne régulation stomatique. Essence thermophile résistante aux chaleurs sèches prolongées. Résistance aux grands froids jusqu'à - 20° C, a priori peu sensible au gel précoce en France, occasionnellement sensible au gel tardif.

Sapin de Céphalonie (*Abies cephalonica*) : Globalement bien adapté aux climats déficitaires en eau, très résistant à la sécheresse (il supporte jusqu'à 5 mois secs, c'est le plus performant des sapins) grâce à une fermeture précoce des stomates. Résistance adulte aux fortes sécheresses bonne mais des mortalités localement fortes dans le Sud-Est suite à la sécheresse de 2017, résistance juvénile moyenne. Très résistant aux fortes chaleurs (canicules). Craint les très grands froids prolongés surtout dans le jeune âge. Adulte, peut supporter jusqu'à -25° C ponctuellement mais mortalités enregistrées après deux semaines sous -10°C. Sensibilité aux gélivures au niveau du tronc. Résistance aux gels précoces, redoute les gelées tardives dans le jeune âge.

Eucalyptus de Gunn (Eucalyptus Gunnii) : Résistance aux fortes chaleurs (canicules). Très tolérants en cas de températures élevées et de périodes sèches estivales mais généralement, craint les sécheresses prolongées couplées à une faible hygrométrie. Les Eucalyptus s'adaptent à des niveaux de pluviosité faibles, de l'ordre de 600 mm/an. Eucalyptus gunnii semble un peu moins tolérant aux sécheresses et aux fortes chaleurs que l'hybride Eucalyptus gundal mais il est l'un des eucalyptus les plus tolérants au gel. Il supporte des gels de -15° C et jusqu'à -18°C ou -20°C s'ils sont de courte durée mais peuvent craindre les gels précoces si les pousses sont insuffisamment lignifiées. Néanmoins, ils sont sensibles à des froids trop intenses, notamment dans le jeune âge (jusqu'à 2 ou 3 ans).



Sophora du Japon (Sophora Japonica) : Arbre de pleine lumière de la famille des Fabacées. Il préfère les sols suffisamment profonds, argileux, fertiles, ni trop compacts, ni trop secs. Il supporte des températures de - 23°C à - 29°C . Il aime les expositions bien ensoleillées.

Noisetier de Byzance (Corylus colurna) : Arbre pouvant atteindre 25/30 m, parfaitement rustique. Une fois établi, Corylus colurna est tolérant à la chaleur, au froid et à la sécheresse. Il supporte aussi bien les étés chauds et secs ainsi que les hivers très rigoureux. Il peut tolérer un sol sec et alcalin et une exposition semi-ombragée et venteuse.

Tulipier de Virginie (Liriodendron tulipifera) : Sur les stations à faible réserve hydrique, il pourrait être fragilisé par une augmentation de la fréquence des sécheresses printanières ou estivales. Sensible aux gelées tardives et précoces durant le stade juvénile, sa résistance au froid augmente avec l'âge. En conditions de sols favorables, sa résistance à la sécheresse peut être accrue par le développement d'un système racinaire important. Supporte la chaleur et l'ensoleillement. Supporte des températures très basses en hiver mais il reste cependant sensible aux gelées tardives, surtout dans ses premières années. Demande une bonne humidité, il craint les sécheresses prolongées et nécessite une réserve utile du sol élevée ou un climat arrosé. Peu sensibles aux déficiences hydriques.

Févier à 3 épines (Gleditsia triacanthos) : Le févier développe un fort pivot et un système de racines très ramifié qui pénètre en profondeur jusqu'à 5 à 7 mètres. Bien qu'exigeant en eau pour présenter une grande croissance, il est très résistant à la sécheresse puisque l'on peut le trouver sur les terres « stériles » dans son aire d'origine.

3.3.3.3. Douglas de variété californie

Afin d'évaluer l'intérêt éventuel du mélange de variétés au comportement contrasté, la provenance de douglas Californie-VG 006 a été introduite en mélange avec la variété Luzette dans les essais de plantation en mélange. Les modalités d'introduction permettent de les identifier facilement sur le terrain, facilitant ainsi le suivi comparatif ultérieur.

3.3.4. Synthèse et analyse

3.3.4.1. Schémas des mélanges testés

Les schémas d'implantation ont été définis collectivement en relation avec les différents partenaires (CETEF, gestionnaires forestiers, propriétaires ...) et sur la base d'échanges avec des professionnels d'autres régions.

Il a été souhaité que les schémas d'implantation testés ne correspondent pas à des protocoles trop compliqués et donc onéreux, ce qui ne permettrait pas de multiplier les expérimentations et nuirait à la généralisation des résultats.

Les schémas d'implantation qui ont été définis et installés ont pris en compte les différentes caractéristiques des essences retenues, dont les principales sont :

- | la croissance juvénile ;
- | le rythme de croissance après quelques années ;
- | la capacité à tolérer l'ombre (caractère sciaphile) ou, au contraire, le besoin de recevoir la pleine lumière (héliophile) ;
- | la compétition interspécifique.

Pour définir le schéma d'installation du mélange, il est indispensable de connaître les caractéristiques de croissance des différentes essences pour que le mélange choisi aboutisse à une complémentarité optimale. Cela permet de réduire d'autant les interventions humaines (dégagements, tailles de formation...) et d'aboutir plus facilement à la réussite du mélange.

Les caractéristiques des essences associées au douglas ont donc défini les différentes modalités d'installation du mélange (cf schéma page suivante) et les proportions de chaque essence utilisée. Plus les essences associées ont une dynamique de croissance proche (à l'état juvénile puis lors de la phase de croissance) et une compétition interspécifique faible, plus le mélange a été intime (par plants ou en ligne). A contrario, si les rythmes de croissance sont différents et la compétition entre les essences élevée, un mélange par groupes de même espèce (bouquets de 9 à 25 plants, bandes...) a été privilégié.

Les essences testées en association avec le douglas ont été des feuillus, des résineux ou bien les deux (mixte). Le mélange d'essences héliophiles et sciaphiles a été réalisé pour certaine plantation, cela semblait intéressant pour la gestion de la lumière au sein du futur peuplement.

Au travers de la diversité des essais installés, trois grands types de mélange peuvent être définis :

| **Mélange par bouquets**

Constitué de groupes de plants de la même espèce dont le nombre peut varier selon les caractéristiques de croissance juvénile des essences associées (9 à 25 plants).

Les bouquets sont alternés par essence ou avec la possibilité de bouquets de deux essences par bandes alternées.

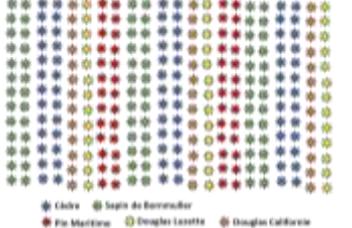
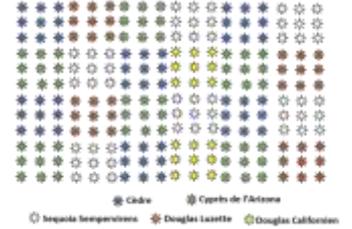
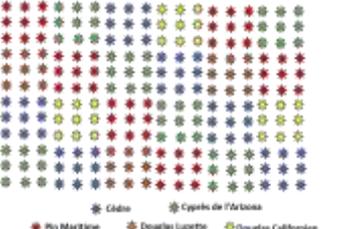
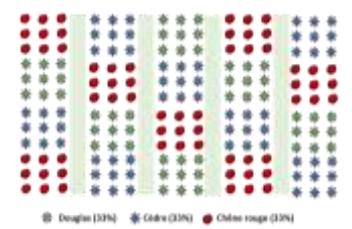
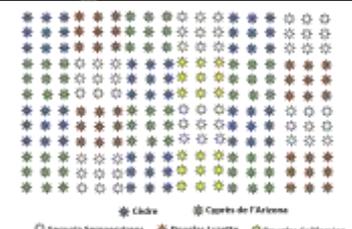
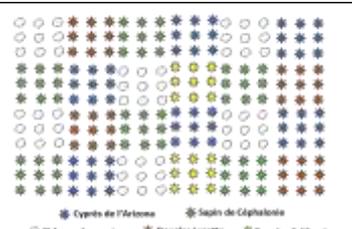
| **Mélange par lignes ou groupes de lignes (bandes)**

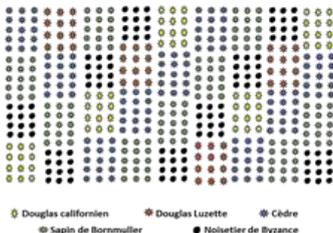
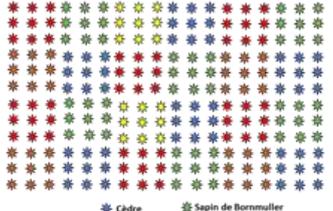
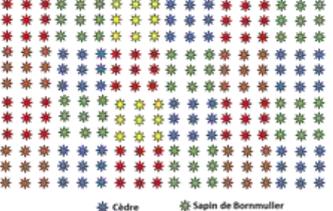
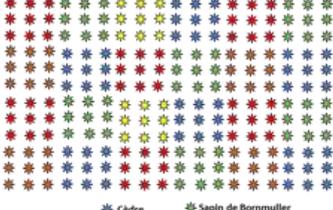
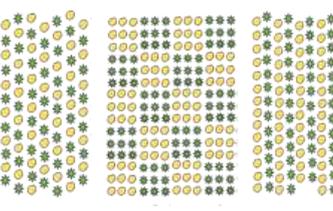
Constitué de lignes de plants de la même essence dont l'alternance du nombre de ligne peut varier selon les caractéristiques de croissance juvénile des essences associées (1 à 5 lignes).

| **Mélange par plants ou séquences de plants sur la ligne**

Constitué de plants d'essences alternées sur la ligne dont le nombre varie selon les caractéristiques des essences associés au douglas, plants par plants pour des essences associées qui ont une dynamique de croissance proche, par séquences de 3 à 5 plants pour des essences associées qui ont un rythme de croissance différent.

Communes	Essences et proportions	Modalité de mélange	Schéma	Caractéristique
Toulon-sur-Arroux (71)	Douglas Luzette (12,5 %) Douglas Californie (12,5 %) Sapin Bornmuller (25 %) Cèdre de l'Atlas (25 %) Pin maritime (25 %)	Par séquences de 5 plants avec deux essences par lignes et lignes alternées (sapin/cèdre et douglas/pin)		Reboisement après deux échecs consécutifs en douglas en 2018 et en 2019. Un travail du sol a été réalisé afin de tenter d'améliorer la reprise. Trois essences ont été associées au douglas et la variété californie a été introduite en mélange avec Luzette
La-Bussière-sur-Ouche (21)	Douglas Luzette (33 %) Cèdre de l'Atlas (66 %)	Par séquence sur la ligne et par lignes alternées (1 douglas, 2 cèdres)		Reboisement après un échec en douglas en 2018. Un travail du sol a été réalisé afin de tenter d'améliorer la reprise. Le cèdre est l'essence objective 2/3 avec un mélange de 1/3 en douglas provenance californie.
Nolay (58)	Douglas Californie (16,5 %) Pin maritime (16,5 %) Chêne sessile (33 %) Noisetier de Byzance (33 %)	Par séquence sur la ligne et par lignes alternées (sur deux lignes : 2 ch sessile, 2 noisetier; sur une troisième ligne 2 douglas, 2 pins)		Reboisement après récolte d'un peuplement d'épicéas décimés par les scolytes. Station non optimum pour le douglas (370 m d'altitude, IBS+2 de 4) incitant à un mélange avec des essences supposées plus résistantes au stress hydrique. Travail du sol sur la ligne au cultiforet pour un objectif de meilleure reprise
St Bonnot (58)	Chêne sessile (20 %) Douglas Californie (20 %) Sapin Bornmuller (10 %) Cèdre de l'Atlas (20 %) Pin maritime (20 %) Noisetier de Byzance (10 %)	Par séquences de plants sur la ligne (6 plants de chêne, 6 pins, 6 cèdres, 6 douglas, 3 sapins, 3 noisetiers)		Reboisement après récolte d'un peuplement d'épicéas décimés par les scolytes. Station défavorable pour le douglas (286 m d'altitude, IBS+2 de 5) incitant à le mélanger avec d'autres variétés supposées plus résistantes au stress hydrique. La variété douglas californie a été introduite en mélange avec Luzette
Arleuf (58)	Douglas (régénération) Séquoia toujours vert (50 %) Séquoia géant (50 %)	Par bandes de 4 lignes alternées (4 lignes séquoi toujours vert, 4 lignes séquoia géant)		Reboisement après récolte d'un peuplement adulte d'épicéas décimés par les scolytes. Station favorable pour le douglas (652 m d'altitude) mais souhait de tester d'autres essences.
Nolay (58)	Douglas Californie (16,5 %) Cèdre de l'Atlas (16,5 %) Chêne sessile (33 %) Chêne pubescent (33 %)	Par séquence sur la ligne et par lignes alternées (sur deux lignes : 2 ch sessile, 2 ch pubescent; sur une troisième ligne 2 douglas, 2 cèdres)		Reboisement après récolte d'un peuplement d'épicéas décimés par les scolytes. Station non optimum pour le douglas (370 m d'altitude, IBS+2 de 4) incitant à un mélange avec des essences supposées plus résistantes au stress hydrique. La variété douglas californie a été introduite 30/08/2022. Travail du sol sur la ligne au cultiforet pour un objectif de meilleure reprise
Sailly (71)	Douglas Luzette (50 %) Chataignier (50 %)	Par lignes alternées (2 lignes douglas 1 ligne robinier)		Reboisement après récolte d'un peuplement de douglas. Station défavorable pour le douglas (370 m d'altitude, IBS+2 de 5) incitant à un mélange avec une essence supposée plus résistante au stress hydrique. La variété douglas californie a été introduite en mélange avec Luzette Potet travaillé et conservation du recru pour un objectif de meilleure reprise

<p>Chevagny-sur-Guy (71)</p>	<p>Douglas Luzette (12,5 %) Douglas Californie (12,5 %) Sapin Bornmuller (25 %) Cèdre de l'Atlas (25 %) Pin maritime (25 %)</p>	<p>Par bandes de 2 lignes alternées (2 lignes sapin/2 lignes cèdre/2 lignes douglas (1 ligne luzette et 1 ligne californie)/2 lignes pin)</p>	 <p>● Chêne ● Sapin de Bornmuller ● Pin Maritime ● Douglas Luzette ● Douglas Californie</p>	<p>Boisement d'un terrain enrichi délaissé par l'agriculture Station non optimum pour le douglas (430 m d'altitude) incitant à un mélange avec trois variétés productives de résineux supposées plus résistantes au stress hydrique. La variété douglas californie a été introduite en mélange avec Luzette Sous solage perpendiculaire à la pente pour retenir l'eau des orages estivaux</p>
<p>La Grande-Verrière (71)</p>	<p>Douglas Luzette (12,5 %) Douglas Californie (12,5 %) Cypès de l'Arizona (25 %) Cèdre de l'Atlas (25 %) Séquoia sempervirens (25 %)</p>	<p>Par bouquets alternés de 9 plants (3 plants consécutifs sur 3 lignes pour une même essence)</p>	 <p>● Chêne ● Cypès de l'Arizona ● Séquoia sempervirens ● Douglas Luzette ● Douglas Californie</p>	<p>Reboisement après récolte d'un peuplement adulte d'épicéas décimés par les scolytes. Station favorable pour le douglas (680 m d'altitude, IBS+2 de 3) mais souhait de tester le comportement d'autres essences en mélange.</p>
<p>Gueugnon (71)</p>	<p>Douglas Luzette (16,5 %) Douglas Californie (12,5 %) Cypès de l'Arizona (25 %) Cèdre de l'Atlas (25 %) Pin maritime (25 %)</p>	<p>Par bouquets alternés de 9 plants (3 plants consécutifs sur 3 lignes pour une même essence)</p>	 <p>● Chêne ● Cypès de l'Arizona ● Pin Maritime ● Douglas Luzette ● Douglas Californie</p>	<p>Reboisement après récolte d'un peuplement adulte d'épicéas décimés par les scolytes. Station défavorable pour le douglas (286 m d'altitude) incitant à le mélanger avec trois essences résineuses supposées plus résistantes au stress hydrique. La variété douglas californie a été introduite en mélange avec Luzette Travail du sol au cultiforet pour un objectif de meilleure reprise</p>
<p>St Bonnet-de-Joux (71)</p>	<p>Douglas Luzette (33 %) Cèdre de l'Atlas (33 %) Chêne rouge (33 %)</p>	<p>Par bouquets alternés de 9 plants avec cloisonnement de 4 m</p>	 <p>● Douglas (33%) ● Cèdre (33%) ● Chêne rouge (33%) Cloisonnement de 4 m</p>	<p>Reboisement après récolte d'un peuplement adulte de 50 ans de belle qualité. Station non optimum pour le douglas (370 m d'altitude) incitant à un mélange avec deux variétés productives supposées plus résistantes au stress hydrique. Travail du sol par potet et conservation des branchage éparpillés pour un objectif de meilleure reprise</p>
<p>Montsauche-les-Settons (58)</p>	<p>Douglas Luzette (12,5 %) Douglas Californie (12,5 %) Cypès de l'Arizona (25 %) Cèdre de l'Atlas (25 %) Séquoia sempervirens (25 %)</p>	<p>Par bouquets alternés de 9 plants avec deux essences par bande de 3 lignes (cypès/cèdre et douglas/sequoias)</p>	 <p>● Chêne ● Cypès de l'Arizona ● Séquoia sempervirens ● Douglas Luzette ● Douglas Californie</p>	<p>Reboisement après récolte d'un peuplement d'épicéas décimés par les scolytes. Station favorable pour le douglas (650 m d'altitude) mais souhait de constituer un peuplement plus résilient aux futurs aléas climatiques. La variété douglas californie a été introduite en mélange avec Luzette Potet travaillé et conservation des rémanents éparpillés sur le sol pour un objectifs de meilleure reprise</p>
<p>St-Franchy (58)</p>	<p>Douglas Luzette (12,5 %) Douglas Californie (12,5 %) Cypès de l'Arizona (25 %) Sapin de Céphalonie (25 %) Chêne pubescent (25 %)</p>	<p>Par bouquets alternés de 9 plants (3 plants consécutifs sur 3 lignes pour une même essence)</p>	 <p>● Cypès de l'Arizona ● Sapin de Céphalonie ● Chêne pubescent ● Douglas Luzette ● Douglas Californie</p>	<p>Reboisement après récolte d'un peuplement d'épicéas décimés par les scolytes. Station non optimum pour le douglas (350 m d'altitude, IBS+2 de 4) incitant à un mélange avec des essences supposées plus résistantes au stress hydrique. La variété douglas californie a été introduite en mélange avec Luzette Travail du sol sur la ligne au cultiforet pour un objectif de meilleure reprise</p>

<p>La Tagniere (71)</p>	<p>Douglas Luzette (12,5 %) Douglas Californie (12,5 %) Sapin Bornmuller (25 %) Cèdre de l'Atlas (25 %) Noisetier de Byzance(25 %)</p>	<p>Par bouquets alternés de 15 plants (5 plants consécutifs sur 3 lignes pour une même essence)</p>	 <p>  </p>	<p>Boisement d'un terrain enrichi délaissé par l'agriculture Station incertaine pour le douglas dans le futur (570 m d'altitude) incitant à un mélange avec deux variétés productives de résineux supposées plus résistantes au stress hydrique et une essence feuillu inconnue pour test. La variété douglas californie a été introduite en mélange avec Luzette Potet travaillé pour un objectif de meilleure reprise</p>
<p>St-Vallier (71)</p>	<p>Douglas Luzette (12,5 %) Douglas Californie (12,5 %) Sapin Bornmuller (25 %) Cèdre de l'Atlas (25 %) Pin maritime (25 %)</p>	<p>Par bouquets alternés de 9 plants avec deux essences par bande de 3 lignes (sapin/cèdre et douglas/pin)</p>	 <p>  </p>	<p>Reboisement après récolte d'un peuplement adulte d'épicéas décimés par les scolytes. Station défavorable pour le douglas (360 m d'altitude) La variété douglas californie a été introduite en mélange avec Luzette Potet travaillé et conservation du recu pour un objectif de meilleure reprise</p>
<p>La-Bussière-sur-Ouche (21)</p>	<p>Douglas Luzette (33 %) Cèdre de l'Atlas (33 %) Noisetier de Byzance (33 %)</p>	<p>Par bouquets alternés de 25 plants (5 plants consécutifs sur 5 lignes pour une même essence)</p>	 <p>  </p>	<p>Reboisement après un échec en douglas en 2018 . Un travail du sol a été réalisé afin de tenter d'améliorer la reprise. Le cèdre et une essence feuillu plus résistante au stress hydrique ont été associé au douglas Mélange de la provenance Luzette et californie</p>
<p>Villiers-en-Morvan (21)</p>	<p>Douglas Luzette (12,5 %) Douglas Californie (12,5 %) Sapin Bornmuller (25 %) Cèdre de l'Atlas (25 %) Pin maritime (25 %)</p>	<p>Par bouquets alternés de 9 plants avec deux essences par bande de 3 lignes (sapin/cèdre et douglas/pin)</p>	 <p>  </p>	<p>Reboisement après un échec en douglas en 2019. Un travail du sol par sous solage a été réalisé afin de tenter d'améliorer la reprise. Station non optimum pour le douglas (440 m d'altitude) incitant à un mélange avec 3 variétés résineuses supposées plus résistantes au stress hydrique. Variété douglas californie introduite en mélange avec Luzette</p>
<p>Molphey (21)</p>	<p>Douglas Luzette (12,5 %) Douglas Californie (12,5 %) Sapin Bornmuller (25 %) Cèdre de l'Atlas (25 %) Pin maritime (25 %)</p>	<p>Par bouquets alternés de 9 plants avec deux essences par bande de 3 lignes (sapin/cèdre et douglas/pin)</p>	 <p>  </p>	<p>Reboisement après récolte d'un peuplement adulte d'épicéas décimés par les scolytes. Station non optimum pour le douglas dans le futur (510m d'altitude, IBS+2 de 4) incitant à un mélange avec 3 variétés résineuses supposées plus résistantes au stress hydrique La variété douglas californie a été introduite en mélange avec Luzette Potet travaillé et conservation du recu pour un objectif de meilleure reprise</p>
<p>Suin (71)</p>	<p>Douglas Luzette (50 %) Châtaignier (50 %)</p>	<p>Par séquences sur la ligne Par ligne alternée Par bouquets alternés de 9 plants</p>	 <p>  </p>	<p>Reboisement après récolte d'un peuplement adulte de 50 ans de belle qualité. Station non optimum pour le douglas (430 m d'altitude) incitant à un mélange à 50% avec le châtaignier supposés plus résistant au stress hydrique. Trois modalités de mélange testées, par séquence sur la ligne, par ligne, par bouquets de 9 plants</p>

3.3.4.2. Taux de reprise

Couplée à une attention toute particulière quant à la préparation, la plantation et la qualité des plants, la saison de végétation 2021 a globalement été bénéfique pour la végétation en général et pour la reprise des essais de plantation en particulier. Les quatre essais installés au printemps 2022 ont un peu plus souffert d'un début de printemps chaud avec un taux de reprise légèrement inférieur à 2021. Le taux de reprise moyen toute plantation confondue est de 79,8 %.

Taux de reprise - Essais plantations mélangées PEI																						
Commune de situation des essais	Date plantation	Date T% de reprise	Douglas V0602	Douglas V0606	Cèdre Atlas	Pin Maritime	Sapin Bornmuller	Sapin Céphalonie	Séquoia Géant	Séquoia sempervirens	Cyprès de l'Arizona	Châtaignier	Chêne Pubescent	Chêne sessile	Chêne Rouge	faux acacia	Noisetier Byzance	Sophora du japon	Février d'Amérique	Tuliper de Virginie	Escalptus gunnii	
1 PEI-Toulon	09-nov-20	01-juil-21	98	83	98	98	82											48				
2 PEI-La Tagniere	04-nov-20	17-juin-21	87	85	91		85											90				
3 PEI-Chevagny	22-oct-20	01-juil-21	95	86	93	93	96											85				
4 PEI-Suin	08-fév-21	10-oct-21	72									98										
5 PEI-St Vallier	12-avr-21	17-juin-21	99	94	94	99	100															
6 PEI-La Grande Verrière	14-déc-21	30-juin-22	92	86	91				78	72												
7 PEI-Gueugnon	26-nov-21	07-juil-22	94	87	90	76				84												
8 PEI-Gueugnon	26-nov-21	07-juil-22																95	85	81	97	87
9 PEI-St Bonnet de Joux	07-avr-22	08-juil-22	92		90										95							
10 PEI-Nolay	22-mars-21	27-juil-21		83	68								48	38								
11 PEI-Nolay	22-mars-21	27-juil-21	87			82								64				86				
12 PEI-Montsauche	15-déc-21	20-juil-22	94	90	94				70	67												
13 PEI-St Franchy	15-avr-22	21-juil-22	94	79				43		83			80									
14 PEI-Arleuf	10-avr-21	20-juil-22							71	90												
15 PEI-St Bonnot	11-déc-21	24-juin-21		46	79	70	46							65				47				
16 PEI-Sailly	10-mai-22	08-juil-22	88													96						
17 PEI-La-Bussière	11-nov-20	22-juil-21	85		66													70				
18 PEI-La-Bussière	11-nov-20	22-juil-21		31	61																	
19 PEI-Molphey	19-avr-21	10-août-21	86	78	81	89	94															
20 PEI-Villiers	20-nov-20	28-juil-21	69	75	59	65	60															
Moyenne :			89	77	83	84	80	43	71	79	77	98	64	56	95	96	74	85	81	97	87	

3.3.4.3. Difficultés induites par un mélange à la plantation

En comparaison à une plantation de douglas en plein, le mélange d'essences demande certaines précautions préalables. Ces difficultés ne sont pas rédhibitoires mais doivent être connues afin de garantir la réussite du projet.

- **Préalable à la plantation**

La multiplicité des essences nécessite de réserver les plants souhaités auprès des pépiniéristes suffisamment en amont car les **disponibilités** et les provenances peuvent être parfois être difficiles à obtenir. Le choix des essences à installer étant un choix raisonné, le changement de variété ne devra pas être réalisé en fonction de la disponibilité ou non en plants.

Il est fréquent de devoir travailler avec plusieurs pépiniéristes pour obtenir les essences et provenances souhaitées, ce qui implique une **logistique** plus importante au niveau de la livraison, réception et regroupement des plants par chantier.

Préalablement à la plantation, un **piquetage** du reboisement en mélange est indispensable, un code couleur permettra aux planteurs de mieux comprendre le dispositif de mélange et de faciliter le respect des consignes.

- **A la plantation**

La **présence d'une personne en soutien** (gestionnaire, propriétaire, maître d'œuvre) est obligatoire en début de chantier et parfois en cours de celui-ci afin d'expliquer les consignes du mélange et de les faire respecter.

Selon les modalités de mélange, le **rendement** des planteurs peut diminuer de 10 à 20 % ce qui peut parfois engendrer un surcoût de la plantation.

La pose d'un tuteur en bambou est nécessaire lorsque la croissance juvénile des essences n'est pas identique, ceci afin de retrouver plus facilement les plants moins vigoureux lors des dégagements.

• **Après la plantation**

En présence de plusieurs essences, la réalisation des taux de reprise par essence est plus longue et plus délicate.

Les décisions d'intervenir en **dégagements** après plantation doivent être basées sur l'essence la moins vigoureuse au risque de voir **perdre les plants sous la végétation concurrente**.

Une estimation des difficultés observées, en comparaison à une plantation monospécifique, a été réalisée pour chacune des plantations (tableau ci-dessous).

Communes	Nombre de variétés	Schéma de mélange	Difficultés observées en comparaison d'une plantation monospécifique				
			+ faible à nulle ++ modérée +++ importante				
			Piquetage (importance, temps, code couleur)	Explication et respect des consignes (compréhension, lecture de plans)	Organisation du chantier (distribution des plants, retour de ligne)	Mise en place des plants (organisation des planteurs, rendement)	Surcoût lié au mélange
Toulon-sur-Arroux (71)	5	Par séquences de 5 plants avec deux essences par lignes et lignes alternées (sapin/cèdre et douglas/pin)	++	+	++	+	+
La-Bussière-sur-Ouche (21)	2	Par séquence sur la ligne et par lignes alternées (1 douglas, 2 cèdres)	+++	+	+	+	+
Nolay (58)	4	Par séquence sur la ligne et par lignes alternées (sur deux lignes : 2 ch sessile, 2 noisetier; sur une troisième ligne 2 douglas, 2 pins)	++	+	+	++	++
St Bonnot (58)	6	Par séquences de plants sur la ligne (6 plants de chêne, 6 pins, 6 cèdres, 6 douglas, 3 sapins, 3 noisetiers)	+++	+++	+++	++	++
Arleuf (58)	3	Par bandes de 4 lignes alternées (4 lignes séquoia toujours vert, 4 lignes séquoia géant)	+	+	+	+	+
Nolay (58)	4	Par séquence sur la ligne et par lignes alternées (sur deux lignes : 2 ch sessile, 2 ch pubescent; sur une troisième ligne 2 douglas, 2	++	+	+	++	++
Sailly (71)	2	Par lignes alternées (2 lignes douglas 1 ligne robinier)	+	+	+	+	+
Chevagny-sur-Guy (71)	5	Par bandes de 2 lignes alternées (2 lignes sapin/2 lignes cèdre/2 lignes douglas (1 ligne luzette et 1 ligne californie)/2 lignes pin)	++	+	++	+	++
La Grande-Verrière (71)	5	Par bouquets alternés de 9 plants (3 plants consécutifs sur 3 lignes pour une même essence)	++	+	+++	++	+
Gueugnon (71)	5	Par bouquets alternés de 9 plants (3 plants consécutifs sur 3 lignes pour une même essence)	++	+	++	++	++
St Bonnet-de-Joux (71)	3	Par bouquets alternés de 9 plants avec cloisonnement de 4 m	++	+	++	++	++
Montsauche-les-Settons (58)	5	Par bouquets alternés de 9 plants avec deux essences par bande de 3 lignes (cypres/cèdre et douglas/sequoias)	++	++	++	+	+
St-Franchy (58)	5	Par bouquets alternés de 9 plants (3 plants consécutifs sur 3 lignes pour une même essence)	++	+++	++	++	++
La Tagniere (71)	5	Par bouquets alternés de 15 plants (5 plants consécutifs sur 3 lignes pour une même essence)	+++	+	+++	++	++
St-Vallier (71)	5	Par bouquets alternés de 9 plants avec deux essences par bande de 3 lignes (sapin/cèdre et douglas/pin)	++	+	++	+	++
La-Bussière-sur-Ouche (21)	3	Par bouquets alternés de 25 plants (5 plants consécutifs sur 5 lignes pour une même essence)	++	+	++	+	+
Villiers-en-Morvan (21)	5	Par bouquets alternés de 9 plants avec deux essences par bande de 3 lignes (sapin/cèdre et douglas/pin)	++	+	+	+	+
Molphey (21)	5	Par bouquets alternés de 9 plants avec deux essences par bande de 3 lignes (sapin/cèdre et douglas/pin)	++	+	++	+	++
Suin (71)	2	Par séquences sur la ligne Par ligne alternée	+++	++	++	++	++
Gueugnon (71)	5	Par parquets de 25 ares	+++	+	+	+	+

Figure 71 : Tableau de comparaison d'implantation des dispositifs



Figure 72 : Plantation mélangée de douglas, cèdre et chêne rouge par bouquets de 9 plants. Conservation sur le sol des rémanents éparpillés et réalisation de potets travaillés. St-Bonnet-de-Joux (71) (Photo B. Borde)

3.3.4.4. Données économiques

Les coûts HT observés des plantations (hors dégagement et hors maîtrise d'œuvre gestionnaire) varient de 2 440€/ha à 4 700 €/ha en fonction des travaux ou non de nettoyage du terrain et de préparation du sol. A modalité de préparation équivalente, le **coût** d'une plantation en mélange **varie essentiellement selon les essences** introduites avec le douglas, le coût de fourniture d'un plant pouvant varier du simple au décuple selon les espèces.

Communes	Nombre d'essences	Modalité de mélange	Densité/ha	Nettoyage	Préparation du sol	Protection	Coût HT à l'ha (Hors dégagement)
Toulon-sur-Arroux (71)	5	Par séquences de 5 plants avec deux essences par lignes et lignes alternées	1330	Broyage en plein	Sous-solage	Trico	3 114 €
La-Bussière-sur-Ouche (21)	2	Par séquence sur la ligne et par lignes alternées	1330	Broyage bande	Andain	Clôture déjà existante	3 372 €
Nolay (58)	4	Par séquence sur la ligne et par lignes alternées	1330	Broyage bande	Cultiforet sur ligne	Trico	4 162 €
St Bonnot (58)	6	Par séquences de plants sur la ligne	1330	Andain	Aucune	Aucune	3 681 €
Arleuf (58)	2	Par bandes de 4 lignes alternées	1330	Andain	Aucune	Aucune	2 740 €
Nolay (58)	4	Par séquence sur la ligne et par lignes alternées	1330	Broyage bande	Cultiforet sur ligne	Trico	4 443 €
Sailly (71)	2	Par lignes alternées	1330	Andain	Aucune	Trico	2 469 €
Chevagny-sur-Guy (71)	5	Par bandes de 2 lignes alternées	1330	Broyage	Sous-solage	Trico	4 420 €
La Grande-Verrière (71)	5	Par bouquets alternés de 9 plants	1330	Broyage en plein	Aucune	Hylobe	4 289 €
Gueugnon (71)	5	Par bouquets alternés de 9 plants	1330	Broyage en plein	Cultiforet sur ligne	Aucune	3 480 €
St Bonnet-de-Joux (71)	3	Par bouquets alternés de 9 plants	1330	Aucune	Potet travaillé	Trico et gaine sur feuillu	3 732 €
Montsauche-les-Settons (58)	5	Par bouquets alternés de 9 plants avec deux essences par bande	1330	Aucune	Potet travaillé	Aucune	4 295 €
St-Franchy (58)	5	Par bouquets alternés de 9 plants	1330	Broyage en plein	Cultiforet sur ligne	Trico	4 762 €
La Tagniere (71)	5	Par bouquets alternés de 15 plants	1330	Broyage en plein	Potet travaillé	Trico	3 772 €
St-Vallier (71)	5	Par bouquets alternés de 9 plants avec deux essences par bande	1330	Broyage bande	Potet travaillé	Trico	4 600 €
La-Bussière-sur-Ouche (21)	3	Par bouquets alternés de 25 plants	1330	Broyage bande	Andain	Clôture déjà existante	3 204 €
Villiers-en-Morvan (21)	5	Par bouquets alternés de 9 plants avec deux essences par bande	1330	Andain	Sous-solage	Aucune	3 109 €
Molphey (21)	5	Par bouquets alternés de 9 plants avec deux essences par bande	1330	Broyage bande	Potet travaillé	Trico	4 601 €
Suin (71)	2	Par séquences sur la ligne, par ligne alternée, par bouquets de 9 plants	1330	Andain	Aucune	Aucune	2 442 €
Gueugnon (71)	5	Par parquets de 25 ares	1330	Broyage en plein	Cultiforet sur ligne	Gaine	4 594 €

3.3.5. Transfert des connaissances



Les premières observations et les premiers résultats issus des travaux de constitution de ce réseau de plantation en mélange ont servi de support pour le transfert de connaissance auprès des sylviculteurs de douglas, des propriétaires forestiers, des gestionnaires forestiers et des professionnels de la filière (pépiniériste, entrepreneur de travaux forestiers, reboiseurs ...), principalement au travers des actions suivantes :

Journées de formation, d'information et de vulgarisation

Durant l'action PEI et depuis la mise en place de ces essais de plantations en mélange, ce sont environ 300 propriétaires forestiers et sylviculteurs qui ont visité au moins l'un des essais lors de l'une des rencontres de terrain suivantes :

- | réunions de vulgarisation du CNPF (septembre 2021 en Morvan, 22 octobre 2021 en Saône et Loire, novembre 2021 dans la Nièvre)
- | formation FOGFOR sur l'adaptation des forêts aux changements climatiques (automne 2022) ;
- | journée technique du CETEF de Bourgogne (5 septembre 2021) ;
- | tournées forestières de propriétaires et gestionnaires d'autres régions de France (Auvergne-Rhône-Alpes le 24 juin 2021, Limousin le 7 juin 2021) ;
- | journée technique lors du conseil de centre CNPF le 14 avril 2021.

Rédaction de supports techniques

Ce réseau de références techniques est un appui pour l'établissement d'itinéraires sylvicoles dans les futurs guides de sylviculture. Les placettes installées fournissent d'ores et déjà des données initiant la simulation d'itinéraire de mélange à la plantation et la rédaction de support technique de vulgarisation (brochure, plaquette) et de formation.

Supports de communication

Relayé par le site internet du CNPF et prochainement par un projet de réalisation d'une vidéo des groupes opérationnels ou via le réseau Educagri, la mise en place concrète sur le terrain de ce réseau

CNPF Centre National de la Propriété Forestière de Bourgogne-Franche-Comté

REGION BOURGOGNE FRANCHE-COMTE

Nous vous invitons à une réunion d'information sur le thème :

Avenir du Douglas face aux changements climatiques

Présentation des actions du Programme Européen d'Innovation

Rendez-vous le **22 octobre 2021**
à **9h30** précises à **Toulon sur Arroux (71)**
- voir plan au verso -
Prenez un repas libre de nos pour le plaisir de manger

Animateur : Bruno BORDIC (06 12 01 40 00) et Louis-Alexis LAGREAU (06 13 33 50 00)

Au programme sur le terrain :

- Les impacts du réchauffement climatique sur le Douglas
- Evaluation et analyse des risques pour un peuplement adulte
- Adapter la gestion et renouveler les peuplements pour favoriser la résilience

• Essai de comparaison des 9 provenances de Douglas

• Dispositif ITRAF de micro dendrométrie sur la croissance du Douglas

• Essai de reboisement Douglas en plantation mélange

La réunion se déroulera enfilamment sur le terrain, prévoir des chaussures de marche, des bottes et vêtements de pluie si nécessaire. Afin de prévenir des risques sanitaires liés à la covid 19, il est demandé à chacun de respecter la réglementation sanitaire en vigueur et les gestes barrières.

Fin de la réunion vers 16h

Centre National de la Propriété Forestière de Bourgogne-Franche-Comté
Contact : Bruno BORDIC, 7A rue de Rey Gaudin 71100 CHALON-SUR-SAONE
Tel : 06 12 01 40 00 - Courriel : bruno.bordic@cnpf.fr

d'essais est un support qui permet une communication visuelle, pertinente et convaincante sur les changements de pratiques à opérer dans le cadre de l'adaptation aux évolutions climatiques.

Base de données pour les futurs projets de recherche et développement

Les données du réseau sont disponibles sur la base ILEX du CNPF, elles pourront être utilisées pour d'autres études qui pourront s'appuyer sur les essais déjà installés et les compléter par d'autres axes de recherches et d'observations.



Extrait site internet du CNPF



Article dans la revue Forestier Privée



Plaquette de vulgarisation

3.3.6. Conclusion

La problématique du douglas et du changement climatique est aujourd'hui un thème d'actualité avec de nombreuses interrogations. La constitution d'un mélange à la plantation est une piste parmi les plus intéressantes lors d'un renouvellement de peuplement. Les questions sont cependant nombreuses et fréquentes et la constitution de ce réseau de plantation d'essais en mélange est un support de connaissance qui était attendu par les sylviculteurs de douglas. Ces expérimentations ont permis de proposer concrètement des itinéraires de plantation en mélange et d'apporter des premières réponses. D'autres interrogations demanderont un délai de réponse plus long à l'échelle de 10 à 20 ans d'où la nécessité d'avoir mis en place dès aujourd'hui ces premiers essais.

3.4. Expérimentation de nouvelles variétés de douglas

Performances des différentes variétés de douglas actuellement commercialisées dans les 6 dispositifs expérimentaux installés en Bourgogne.

La variété Californie-VG est-elle mieux adaptée aux changements climatiques que les autres ?

Auteurs

Sabine Girard (CNPF-IDF),
Gwenaël Philippe, Stéphane Matz et Nathan Fornes (INRAE-EFNO),
Rémy Gobin, Jean-Charles Bastien (INRAE Biofora),
Yves Rousselle, Didier François et Didier Bert (ONF-RDI)

Avec la participation de :

Bruno Borde, Lucas Schnapper, Romain Lachèze, Louis Adrien Lagneau, Francis Pauquai
(CNPF-CRPF Bourgogne-Franche-Comté), Christophe Vidal (CNPF-IDF)

Résumé

De 2009 à 2012, 6 dispositifs expérimentaux comparant les différentes variétés actuellement sur le marché ont été installés en Bourgogne dans différentes situations climatiques. La moitié se situe dans des conditions environnementales favorables à la production de douglas, dans le « cœur de l'aire » de l'espèce. Les autres sont localisés dans des zones plus sèches qui ont, pour certaines, produit de beaux douglas par le passé mais où des dépérissements ont été observés après l'été 2003, zone désormais située en marge du cœur de l'aire.

Les données récoltées ont été analysées par dispositif puis ensemble à 8/9 ans et 12 ans.

De 2009 à 2014, c'est-à-dire durant les premières années qui ont suivi les plantations, aucune contrainte climatique forte n'est venue perturber les performances des différentes variétés. Dans de telles conditions, les taux de survie ont été élevés. A partir de l'année 2015, les arbres ont en revanche été exposés à une sécheresse intense et à de fortes températures qui sont très certainement à l'origine de la hausse de la mortalité observée dans la majorité des dispositifs. Aucune variété ne s'en accommode mieux qu'une autre et le taux de mortalité apparait comme indépendant de la variété considérée.

La croissance en hauteur de la variété Californie-VG, présumée mieux adaptée à des conditions plus chaudes et sèches que celles du cœur de l'aire du douglas, se distingue de celle des autres variétés actuellement commercialisées. Elle est nettement plus faible dans les secteurs les plus favorables au douglas. Toutefois, le différentiel se réduit fortement lorsque l'environnement est plus chaud et sec comme en marge 1. Dans ce contexte, cette variété peut être intéressante en diversification. Il faut néanmoins s'assurer qu'elle ne présente pas de sensibilité particulière.

Concernant les autres variétés améliorées actuellement commercialisées, la variété Darrington présente systématiquement, la croissance la plus faible sur les 6 sites bourguignons. Quant aux autres, il n'est pas possible de les distinguer en termes de croissance à ce stade.

Introduction

Le Douglas est une essence importante pour la filière forêt-bois de la région Bourgogne dans la mesure où elle occupe environ 68 000 ha et représente plus du tiers du volume total récolté en bois d'œuvre résineux. Elle est par ailleurs la première espèce utilisée en reboisement.

Comme la plupart des espèces forestières, le douglas a souffert des conditions extrêmes de chaleur et de sécheresse de ces dernières années. L'année 2003, qui a associé vagues de chaleur et sécheresse a marqué durablement les forestiers. Mais les années 2014, 2015 et 2018, les plus chaudes jamais enregistrées en Europe, ont également fortement impacté les forêts.

Dans un tel contexte, la question du renouvellement des peuplements de douglas est un enjeu majeur pour maintenir la ressource bourguignonne.

Une des possibilités réside dans le choix du matériel végétal utilisé lors des reboisements.

Des études synthétisant les résultats d'un grand nombre de tests européens, montrent que provenances de l'État de Washington et du nord de l'Oregon, à l'origine des douglasaies françaises, présentent les taux de survie et de croissance les plus élevés (Isaac-Renton et al, 2014 et Boiffin et al, 2017). Toutefois, à long terme (au-delà de 2050), les modèles bioclimatiques suggèrent de remplacer les sources de semences actuellement utilisées par d'autres originaires de forêts plus méridionales. En analysant deux tests de provenances de Douglas soumis au climat méditerranéen français, Sergent (2011) et Lupi (2016) ont souligné le bon compromis "croissance-survie" offert par les provenances du nord de la Californie, suggérant que ce matériel pourrait représenter une alternative aux MFR actuels pour la seconde moitié du 21ème siècle.

Le présent rapport présente les résultats de six dispositifs expérimentaux, âgés de 8 et 12 ans, installés sur le territoire bourguignon. Ces dispositifs comparent différentes variétés de douglas, dont la variété « Californie-VG », créée pour une utilisation en zone méditerranéenne, qui pourrait pour cette raison être mieux adaptée que les autres à des conditions plus chaudes et sèches.

Après une présentation des variétés que nous avons testées, des sites et des dispositifs expérimentaux, nous détaillerons les résultats obtenus sur chacun d'entre eux avant de proposer une analyse globale et des premières conclusions.

3.4.1. Matériel et méthodes

3.4.1.1. Huit variétés améliorées génétiquement et un témoin :

Actuellement, 8 variétés françaises de douglas sont disponibles sur le marché. Elles sont récoltées en vergers à graines et issues du programme d'amélioration génétique développé en France dès le début des années 60.

Deux vergers sont admis en catégorie testée (étiquette bleue) : **Darrington-VG** (PME -VG-001) pour la tardiveté du débourrement et la forme (branchaison, fourchaison et rectitude du tronc), **La Luzette-VG** (PME-VG-002) pour la croissance juvénile et la tardiveté du débourrement. Les autres vergers sont en catégorie qualifiée (étiquette rose), en attendant une validation de leurs performances.

Tableau 1 : Caractéristiques des vergers à graines de Douglas français.

Nom des vergers	Installation	Nombre de clones	Surface (ha)	Origine des clones	Entrée en production	Catégorie réglementaire
Darrington (PME-VG-001)	1978 à 1990	70	16.9	USA-Washington	1987	Testée
La Luzette* (PME-VG-002)	1980	226	38.9	USA-Washington & Oregon ; France	1996	Testée
Washington (PME-VG-003)	1984 à 1987	276	7.2	USA-Washington		Qualifiée
Washington2* (PME-VG-005)	1983	135	9.0	USA-Washington		Qualifiée
France 1 (PME-VG-004)	1989	110	7.6	France (sélection en Limousin)		Qualifiée
France 2* (PME-VG-007)	1989	120	6.4	France (sélection en Ariège)		Qualifiée
France 3* (PME-VG-008)	1989	129	11.7	France (sélection dans les Vosges)		Qualifiée
Californie (PME-VG-006)	1985	116	5.5	USA-Californie		Qualifiée

Les vergers dont les noms sont suivis d'un astérisque (*) ont fait l'objet d'une éclaircie génétique. Un descriptif plus complet de ces vergers ainsi que des conseils d'utilisation sont disponibles sur les sites du Ministère de l'Agriculture (<https://agriculture.gouv.fr/graines-et-plants-forestiers-conseils-utilisation-des-ressources-genetiques-forestieres>).

a) **Darrington-VG** (PME -VG-001).

Les constituants du verger Darrington (codifié DARR dans la suite du document) sont originaires de la région de provenance américaine 403 (Darrington aire naturelle) qui présente, dans les tests de comparaison de provenances, une excellente plasticité et un bon compromis forme vigueur. Sa croissance moyenne est compensée par une bonne forme et une densité du bois relativement élevée. Le verger est entré en production en 1987. La variété est testée dans 5 des 6 dispositifs bourguignons.

b) **La Luzette-VG** (PME-VG-002)

Les composants du verger La Luzette (codifié LUZ dans la suite du document) sont originaires de nombreuses provenances américaines (Washington essentiellement) et françaises, ce qui garantit une large base génétique. Dans les tests de comparaison de provenances, les performances de La

Luzette sont assez proches de celles de Darrington-VG en termes de résistance aux gelées de printemps et de forme, mais le verger La Luzette est plus vigoureux, au moins dans le jeune âge. Le verger est entré en production en 1996.

Une éclaircie génétique, réalisée en 2007, améliore légèrement la forme sans perte sur la vigueur ni sur le débourrement. Deux dispositifs bourguignons évaluent la variété initiale avant éclaircie (codifiée LUZv1 dans ce rapport) : Sully/Les Battées et Sémelay. La variété résultant du verger éclairci (codifiée LUZ) est évaluée dans 5 des 6 dispositifs bourguignons ; elle n'est pas présente à Sully/ Les Battées.

A noter que 3 dispositifs (Autun, Dettey et Pressy) évaluent également les performances de plants issus du verger éclairci et mycorhizés par *Laccaria bicolor* (souche S238N).

c) **Washington-VG** (PME-VG-003)

Le verger Washington-VG (codifié WA dans la suite du document) est composé de 289 clones originaires de 97 provenances de l'ouest de l'État du Washington situées en basse altitude. Ces clones sont issus d'une sélection très intensive (5/1000) réalisée après 3 années de croissance en pépinière, portant sur la tardiveté du débourrement, l'absence de fourchaison et la vigueur.

d) **France1-VG, France2-VG et France3-VG** (PME-VG-004, -007 et -008)

Ces 3 vergers (codifiés FR21, FR2 et FR3 respectivement dans la suite du document) sont issus d'un même « fond » génétique à savoir 24 peuplements sélectionnés français situés en Saône-et-Loire, Rhône, Loire et Hérault. Les arbres « plus » ont été sélectionnés sur des caractères d'adaptation (tardiveté du débourrement), de vigueur et de forme (rectitude du tronc, angle d'insertion des branches), dans trois tests de descendance situés en Haute Vienne pour France1-VG, en Ariège pour France2-VG et dans les Vosges pour France3-VG.

e) **Washington2-VG** (PME-VG-005)

Le verger (codifié WA2 dans la suite du document) se compose de clones sélectionnés dans un test planté en Dordogne comparant 26 provenances originaires du versant ouest de la chaîne des Cascades dans l'État du Washington (États-Unis). Ces provenances étaient elles-mêmes structurées en 370 descendance maternelles. La sélection combinant la performance des descendance et des individus permet un gain sur la vigueur et sur la tardiveté de débourrement, sans perte sur la densité du bois.

f) **Californie-VG** (PME-VG-006)

Le verger Californie-VG (codifié CAL dans la suite du document) est composé de 116 clones issus de provenances de la zone sud de l'aire côtière de l'espèce. La variété qu'il produit était initialement destinée à une utilisation en région méditerranéenne. Ses constituants ont en effet été sélectionnés dans quatre tests de provenances situés dans le Var et les Hautes-Alpes, à des altitudes comprises entre 540 et 1200 m. La variété CAL est la seule présente dans l'ensemble des dispositifs bourguignons.

g) **Un témoin non amélioré américain**

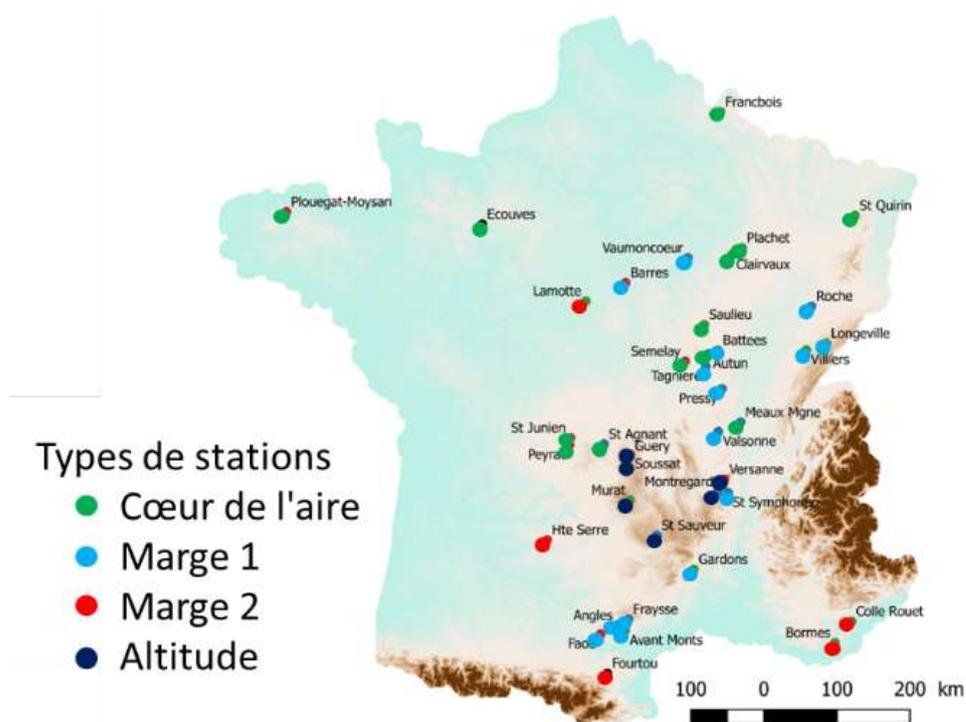
Le témoin de l'aire naturelle est originaire de la zone de récolte 403 de l'état du Washington. Il est constitué du mélange de plusieurs années de récoltes de manière à échantillonner le maximum de diversité génétique. Il est codifié SZ 403 dans le reste du document.

3.4.1.2. Six dispositifs expérimentaux installés en Bourgogne

a) Intégrés dans un réseau national

En 2008, des représentants d'Irstea, de l'INRA (aujourd'hui regroupés au sein d'INRAE), de l'ONF et du CNPF se sont groupés pour mettre en place un vaste réseau de tests d'évaluation des vergers à graines de Douglas de l'Etat. Ce programme, financé par le Ministère de l'Agriculture, vise notamment à préciser, dans une large gamme de milieux, les performances et la plasticité des huit variétés de Douglas actuellement homologuées en vue de fournir des conseils d'utilisation aux reboiseurs.

Figure 2 : Réseau national de tests d'évaluation des vergers à graines français de Douglas



Ce réseau s'est construit en plusieurs tranches de plantations qui se sont étalées de 2009 à 2016. Au total, 43 tests ont été installés en France et dans quatre zones climatiques (cf. Fig. 2).

- | 16 tests se situent dans le « cœur de l'aire » d'utilisation du Douglas (points verts sur la carte) : les conditions pédoclimatiques devraient y rester optimales sur une durée équivalente à une révolution au moins (50-70 ans). L'altitude des sites de tests est comprise entre 120 et 940 m. En Bourgogne, les dispositifs **d'Autun, Saulieu et Sémelay** se trouvent dans ce groupe. Six de ces tests ont été plantés sur substrat calcaire en vue d'apporter des réponses aux reboiseurs sur l'intérêt encore mal renseigné des variétés améliorées pour ces conditions pédologiques ;
- | 15 tests ont été installés en « Marge 1 » (points bleus sur la carte) c'est-à-dire dans des conditions climatiques qui conviennent actuellement aux MFR "classiques" de Douglas, mais qui pourraient ne plus convenir à une échéance inférieure à la durée d'une révolution. Les tests sont installés sur sol favorable à la culture du Douglas à une altitude comprise entre

140 et 890 m. En Bourgogne, les dispositifs **de Dettey, Pressy et Sully** se trouvent dans ce groupe ;

- | 6 tests se situent en « Marge 2 » (points rouges sur la carte) dans des conditions pédoclimatiques qui ne sont pas (ou plus) optimales aux MFR "classiques" de Douglas. Des tests ont été délibérément plantés dans ces environnements extrêmes pour évaluer la capacité de résistance des MFR issus de certains vergers, Californie notamment, en anticipation du changement climatique. Aucun dispositif de ce type n'a été installé en Bourgogne.
- | 6 tests se trouvent sur de sites d'altitude (entre 1 000 et 1 300 m) dans des environnements climatiques actuellement peu favorables à la culture du Douglas, mais qui pourraient le devenir à la 'faveur' du réchauffement climatique.

Des conditions pédoclimatiques représentatives de la douglosaie bourguignonne

Les six dispositifs bourguignons sont localisés sur la carte ci-dessous (Fig.3). Ils sont répartis du Clunisois au sud, au cœur du Morvan au Nord entre 300 m et 600 m d'altitude (cf. tab ci-après).

Figure 3: Localisation des six dispositifs comparant les différentes variétés de douglas en Bourgogne

A l'exception du site de Sully se trouvant sur substrat schisteux et gréseux, tous les autres sont implantés sur des roches mères granitiques. Les dispositifs sont installés sur des versants relativement pentus (de 12 à 25 %), à l'exception toutefois de ceux de Saulieu et Sully, situés sur plateau (cf. Tab.4).

Figure 4: Caractéristiques stationnelles des six dispositifs bourguignons



Communes	Dettey	Pressy sous Dondin	Sully	Autun	Semelay	Seaulieu
Département	Saône et Loire (71)				Nièvre (58)	Côte d'Or (21)
SylvoEcoRégion (IGN) ^o	B92 : - Bourbonnais et Charolais	G41 : Bordure Nord-Est du Massif central	C20 : - Plateaux calcaires du Nord-Est	G23 : - Morvan et Autunois		
Régions forestières (IGN)	Charolais et annexes	Clunisois	Plaine morvandelle	Plateau de l'Autunois	Morvan	Morvan
Substrat géologique	Granite	Granite	Schistes et Grès	Granite	Granite	Granite
pH [*]	4.5	4.5	5.4	5.2	4.8	4.7
Altitude	440 m	355 m	505 m	600 m	313 m	570 m
Topographie	Haut de versant		Milieu de versant			Plateau
Exposition	SW & SE	SSW	Aucune	NNW	SSE	Aucune
Pente	15% et 25 %	15%	1%	23%	12%	1%

* pH mesuré lors du diagnostic BioClimSol à 20 cm de profondeur

Pour caractériser de la même façon les différents dispositifs au plan climatique, un diagnostic BioClimSol^o a été réalisé sur chacun d'entre eux (Tab). Les variables présentées dans le tableau ci-dessous correspondent aux valeurs calculées par le modèle NorClimSol^o intégré à l'application et construit à partir des données Météo France et AgroParisTech sur la période 1981-2010. L'indice de vigilance quant à lui intègre à la fois les données climatiques du modèle et également des facteurs stationnels tel l'exposition, la pente, la position topographique et une estimation de la réserve en eau utilisable du sol, facteurs qui peuvent compenser ou au contraire aggraver le bilan hydrique du site.

Figure 5: Caractéristiques climatiques des six dispositifs bourguignons

Communes	Dettey	Pressy sous Dondin	Sully	Autun	Semelay	Seaulieu
T° moy annuelle ⁽¹⁾	10.7°C	10.7°C	9.9°C	10.2°C	11.4°C	9.9°C
Précipitations annuelles ⁽¹⁾	945 mm	928 mm	912 mm	1 100 mm	955 mm	1 059 mm
Précipitations d'Avril à Octobre ⁽¹⁾	546 mm	563 mm	516 mm	586 mm	562 mm	584 mm
Indice de vigilance climatique actuel ⁽¹⁾	3	3	3	2	3	2
Indice de vigilance climatique avec +1°C ⁽¹⁾	4	4	4	3	4	3
Zone climatique du réseau national	Marge 1			Cœur de l'aire		

Sources : ⁽¹⁾ le modèle NorClimSol^o intégré à l'application et construit à partir des données Météo France et AgroParisTech sur la période 1981-2010 et ⁽²⁾ l'application BioClimSol^o CNPF

Tous les dispositifs bénéficient de plus de 900 mm d'eau par an (précipitation annuelles moyennes sur la période 1981-2010). Celui de Sully est le moins arrosé avec 912 mm en moyenne par an tandis que celui d'Autun reçoit 1 100 mm. Les précipitation reçues d'avril à octobre varient de 516 à 586 mm entre sites soit un écart de 70 mm au maximum. Ces caractéristiques climatiques étaient jugées jusqu'à présent tout à fait compatibles avec l'installation et la production de douglas.

Les données climatiques présentées confirment la répartition en 2 groupes des dispositifs bourguignons : Dettey, Pressy et Sully en « marge 1 », Autun et Saulieu en « cœur de l'aire ». On remarque que le diagnostic BioCLimSol du site de Sémelay - initialement affecté au « cœur de l'aire » du douglas- semble plutôt le rapprocher des situations des sites bourguignons de marge 1. Il est vrai qu'il est installé à plus faible altitude que les autres et que la température moyenne annuelle est la plus élevée.

Organisation des dispositifs

Dans la cadre du réseau national, différents types de dispositifs ont été installés : des dispositifs « mono-arbres », à grandes parcelles unitaires, de « démonstration » ainsi que quelques variantes. Les différents types sont représentés en Bourgogne.

Les dispositifs mono-arbre permettent un bon contrôle des conditions stationnelles et fournissent des résultats très fiables dans le jeune âge. Ils ont cependant une durée de vie limitée car leur fiabilité décroît au fur et à mesure que la concurrence entre individus s'installe (vers 8/12 ans dans le cas du douglas selon les sites). Le site de **Semelay** est de ce type, il contient 96 blocs constitué d'un seul plant d'une variété donnée.

Les dispositifs en grandes parcelles unitaires, moins précis dans le jeune âge¹ que les mono-arbres, ils permettent en revanche un suivi plus long, a minima jusqu'après la première éclaircie soit une vingtaine d'années après plantation dans le cas du douglas. Les dispositifs sont divisés en 4 blocs dans lesquels toutes les variétés sont présentes sous la forme de parcelles unitaires de 60 plants (grandes parcelles unitaires). Les sites de **Saulieu** et de **Sully/ Les Battées** sont de ce type.

Les dispositifs de démonstration sont composés de grandes parcelles unitaires de 60 plants, parcelles qui ne sont pas répétées sur le site. Le dispositif de **Pressy** correspond à ce schéma. De tels dispositifs, d'une surface plus petite que les autres, sont installés et suivis plus facilement. Leur réplication dans le cadre du réseau national permet d'appréhender le comportement des variétés dans un grand nombre de conditions pédoclimatiques.

L'hétérogénéité des sites **d'Autun** et **Dettey** (liée à la forte pente pour le premier et à l'exposition et la pente pour le second) nous a conduits à modifier le schéma d'installation classique des tests de démonstration pour y introduire des blocs. Ils correspondent à des dispositifs en petites parcelles unitaires.

Le tableau ci-dessous récapitule les caractéristiques de chaque dispositif.

¹ D'après Philippe G & al, 2012

Figure 6 : Variétés testées dans les 6 dispositifs bourguignons et type d'expérimentation installé.

	Autun	Dettey	Pressy	Semelay	Seaulieu	Sully
Année de plantation	2009			2010	2011	2012
VFA testées	DARR	DARR	DARR	DARR	DARR	
	LUZ	LUZ	LUZ	LUZ	LUZ	
	LUZ_M	LUZ_M	LUZ_M			
				LUZv1		LUZv1
				WA	WA	
	WA2	WA2	WA2	WA2	WA2	
	FR1	FR1	FR1	FR1	FR1	
	FR2	FR2	FR2	FR2	FR2	
	FR3	FR3	FR3	FR3	FR3	
	CAL	CAL	CAL	CAL	CAL	CAL
	SZ 403	SZ 403	SZ 403	SZ 403	SZ 403	
Type de dispositif	Petites parcelles unitaires	Petites parcelles unitaires	Démonstration	Mono-arbre	Grandes parcelles unitaires	Grandes parcelles unitaires
	2 blocs x (7 variétés + témoin) x 30 plants	4 blocs x 2 expositions x (7 variétés + témoin) x 7 et 8 plants	1 bloc x (7 variétés + témoin) x 60 plants	96 blocs x (9 variétés+ témoin) x 1 plant	4 blocs x (8 variétés+ témoin) x 48 plants	4 blocs x (2 variétés en plein + mélange pied à pied des 2 variétés) x 42 plants
Nombre total de plants suivis individuellement	540	540	540	960	1 728	504

Origine des semences

Diverses précautions ont été prises pour s'assurer que les matériels évalués sur le terrain dans le cadre du réseau national soient réellement représentatifs des variétés. En 2007, avant la récolte des cônes, des comptages de fleurs mâles et/ou femelles ont été effectués dans tous les vergers pour quantifier la contribution de chaque clone. Lorsqu'elles étaient équilibrées, les lots de graines destinés aux futurs dispositifs sont un échantillon de la récolte commerciale. Dans le cas contraire, les graines provenaient de récoltes spécifiques organisées clone par clone pour homogénéiser la contribution de chacun.

Dans le cas du témoin de l'aire naturelle (SZ 403), les semences utilisées sont un mélange de plusieurs années de récolte, de manière à échantillonner le maximum de diversité génétiques.

Figure 7 : Année de récolte des graines utilisées pour produire les plants des 6 dispositifs bourguignons.

DARR	Darrington-VG (PME-VG-001), récolte expérimentale 2008
LUZ	Luzette -VG (PME-VG-002), récolte commerciale 2007
LUZv1	Luzette -VG (PME-VG-002), récolte commerciale 2004 avant éclaircie génétique du verger
FR1	France 1-VG (PME-VG-004), récolte expérimentale de 2007
FR2	France 2 -VG (PME-VG-007), récolte expérimentale de 2007
FR3	France 3-VG (PME-VG-008), récolte expérimentale de 2007
WA	Washington-VG (PME-VG-003), récolte expérimentale de 2008
WA2	Washington 2-VG (PME-VG-005), récolte commerciale 2007
CAL	Californie-VG (PME-VG-006), récolte expérimentale de 2007
SZ 403	Témoin : SZ 403 (mélange de plusieurs années de récolte)

Production des plants

Les semences ont été livrées à la pépinière d'Aix en Provence-Les Milles (ex-pépinière de l'Etat, aujourd'hui pépinière du PNRGF²) qui a assuré le semis et la production des plants.

Ces derniers ont été élevés en godets de type WM en 1 an, dans le cas des plantations réalisées en 2009 et 2010 (**Autun, Pressy, Dettey et Sémelay**), ou en 2 ans pour celles réalisées à **Saulieu et Sully**. Les tris des plants ont été réduits au strict minimum, de manière à conserver le maximum de diversité génétique et l'affectation des plants a été conduite de sorte que tous les tests renferment les mêmes matériels génétiques.

Seuls les plants des dispositifs d'Autun, Dettey et Pressy, âgés de 1 an, ont été mesurés juste après la plantation. Les hauteurs initiales des autres dispositifs ont été déduites a posteriori lors des mesures de la hauteur atteinte après la première saison de végétation (H1), ce qui peut induire des erreurs et exclure les plants disparus entre temps.

Les hauteurs initiales mesurées à Autun, Dettey et Pressy varient de 12 à 49 cm avec une moyenne de 25.5 cm ($\sigma = 8.4$).

Plantations

Aucun travail préparatoire du sol n'avait été réalisé avant la plantation. La gestion des rémanents a varié selon les sites (cf. Tab 8).

Tous les dispositifs ont été plantés au printemps et à la pioche, à la même densité de 1 100 plants/ha avec des écartements de 3 m x 3m.

Figure 8 : Caractéristiques des chantiers de plantation des 6 dispositifs bourguignons.

	Autun	Dettey	Pressy	Semelay	Seaulieu	Sully
Antécédent	Futaie régulière d'épicéa commun	Futaie régulière de douglas	Futaie régulière de douglas	Futaie régulière de douglas	Futaie régulière de sapin pectiné	Taillis sous futaie de chêne sessile
Gestion des rémanents	Andainage	Broyage en plein		dessouchage + andainage		Andainage des rémanents puis broyage des andains
Travaux préparatoires	Aucun					
Date de plantation	21-avr-09	24-avr-09	23-avr-09	25/26 mars 2010	28/29 mars 2011	11-avr-12
Technique de plantation	Pioche					
Densité	3 m x 3 m => 1 100 plants/ha					
Protection Gibier	3 piquets accacia en quinconce autour de chaque plants du dispositif			NON	Protections individuelles installées en octobre 2012	

² PNRGF : Pôle National des Ressources Génétiques Forestières

3.4.1.3. Variables et traitements statistiques effectués

a) Variables observées

Le tableau ci-dessous récapitule les variables observées sur les différents dispositifs qui ont fait l'objet d'une analyse dans ce rapport.

Pour rendre compte de ces variables et de leur variabilité, les résultats sont présentés sous la forme de la valeur moyenne arithmétique avec entre () l'écart type symbolisé par σ . Sur certains graphes, l'intervalle de confiance peut être présenté. Ces moyennes sont calculées par variété, par parcelle unitaire, bloc ou site selon les cas. Le nombre d'individus contribuant au calcul est également mentionné dans des étiquettes de type « n=x ».

Sur un site donné, les moyennes peuvent faire intervenir soit l'ensemble des individus appartenant à une même variété, ce qui permet d'avoir une vision réelle de la situation sur le terrain ; soit les individus qui n'ont pas subi de contraintes extérieures fortes durant leur croissance (forte attaque d'hylobes dans le jeune âge, frotis répétés de chevreuils, blessure lors de dégagement, etc), individus qualifiés d'« indemnes » ce qui permet d'appréhender d'une part la croissance maximale que peut avoir une variété sur un site donné et, d'autre part de réduire la variabilité des performances observées pour mettre en évidence plus facilement des effets génétiques.

Les protocoles de mesures de ces variables ne seront pas détaillés ici.

Figure 9 : Liste des variables collectées dans les 6 dispositifs bourguignons qui ont fait l'objet d'une analyse statistique rapportée dans ce rapport. Sont surlignées en vert, les variables disponibles pour l'ensemble des dispositifs et en jaune, celles concernant au moins 4.

	Autun	Dettey	Pressy	Semelay	Seaulieu	Sully
Taux de reprise	X	X	X	X	X	X
Taux de mortalité à 3 ans	X	X	X	X	X	X
Taux de mortalité à 5 ans	X	X	X	X	X	X
Taux de mortalité à 8 ans	X	X	X	X	X	X
Taux de mortalité à 12 ans	X	X	X	X		
Proportion des plants ayant débourré à une date donnée en 2010		X	X	X		
Proportion des plants ayant débourré à une date donnée en 2011				X		
Hauteur initiale	X	X	X	X*	X*	X*
Hauteur après 1 année de croissance	X	X	X	X	X	X
Hauteur après 2 années de croissance	X	X	X	X	X	
Hauteur après 3 années de croissance	X	X	X	X	X	X
Hauteur après 4 années de croissance				X	X	X
Hauteur après 5 années de croissance	X	X	X	X	X	X
Hauteur après 6 années de croissance					X	
Hauteur après 8 années de croissance		X	X	X	X	X
Hauteur après 9 années de croissance	X					
Hauteur après 11 années de croissance				X		
Hauteur après 12 années de croissance	X	X	X	X		
Circonférence à 1.30 m à 8 ans		X	X	X	X	X
Circonférence à 1.30 m à 9 ans	X					
Circonférence à 1.30 m à 12 ans	X	X	X	X		
Proportion d'individus ayant 1, 2 ou 3 années d'aiguilles en 2011				X		
Proportion d'individus ayant 1, 2 ou 3 années d'aiguilles en 2012				X		
Proportion d'individus ayant 1, 2 ou 3 années d'aiguilles en 2013				X	X	
Proportion d'individus ayant 1, 2 ou 3 années d'aiguilles en 2014				X	X	
Proportion d'individus ayant 1, 2 ou 3 années d'aiguilles en 2015		X	X		X	
Proportion d'individus ayant 1, 2 ou 3 années d'aiguilles en 2017				X		X
Proportion de plants présentant du rouge physiologique en mars 2017					X	
Densité des branches à 8 ans				X		
Angle d'insertion des branches à 8 ans				X		
Coefficient d'élanement à 8 ans		X	X	X	X	X
Coefficient d'élanement à 9 ans	X					
Hauteur dominante à 8 ans		X	X	X	X	X
Hauteur dominante à 9 ans	X					
Hauteur dominante à 12 ans	X	X	X	X		

*Hauteur initiale déterminée a posteriori lors de la mesure de H1

Traitements statistiques

Les proportions (taux de mortalité, proportion d'individus ayant 1, 2 ou 3 années d'aiguilles ou présentant du rouge physiologique) ont en général été analysées en utilisant le test d'indépendance du Khi2 ou de Kruskal-Wallis.

Les variables continues ont été traitées par analyse de variance à deux facteurs (provenance + bloc considérées respectivement comme fixe et aléatoire) sur les données individuelles, avec ou sans interaction, puis comparaison des moyennes à l'aide du test de comparaisons multiples de Tukey ou de Newman-Keuls. Le cas échéant, des transformations de variables ont été effectuées pour satisfaire au mieux les conditions de normalité et d'égalité des variances.

Les traitements statistiques utilisés sont précisés pour chaque dispositif.

Dans le rapport, le symbole σ correspond à l'écart type c'est-à-dire à la racine carrée de la variance divisée par le nombre d'individus utilisé pour la calculer.

3.4.2. Dispositif d'Autun, Saône et Loire

Le dispositif est situé en forêt privée, il est suivi par le CNPF. La parcelle était précédemment occupée par des épicéas âgés d'une cinquantaine d'années, coupés en 2007/08 suite à des attaques de bostryche.

3.4.2.1. Caractéristiques de la parcelle :

- | région forestière IGN : Plateau de l'Autunois (SER G23 : - Morvan et Autunois) ;
- | altitude : 600 m ;
- | orientation : NNO ;
- | position topographique : milieu de versant, pente : 23 % ;
- | T° moy min : 5,5°C T° moy max : 15,1°C T° moy annuelle : 10.3°C (Ref : 1971-2000, St Symphorien de Marmagne situé à 360 m d'altitude)
- | 1 030 mm d'eau/an³ dont 495 mm entre Avril et Septembre (Ref : 1971-2000, Uchon situé à 654 m d'altitude)
- | indice de vigilance climatique : 2 (3 avec +1°C) (Ref : modèle NorCliS©CNPF construit à partir des données Météo France et AgroParisTech sur la période 1981-2010) ;
- | sol cryptopodzolique brun acide (pH_{eau}: 4.5) à texture SL, formé sur granite⁴.



Figure 10 : Vue de la parcelle juste après plantation le 21 avril 2009 (Photo S. Girard)

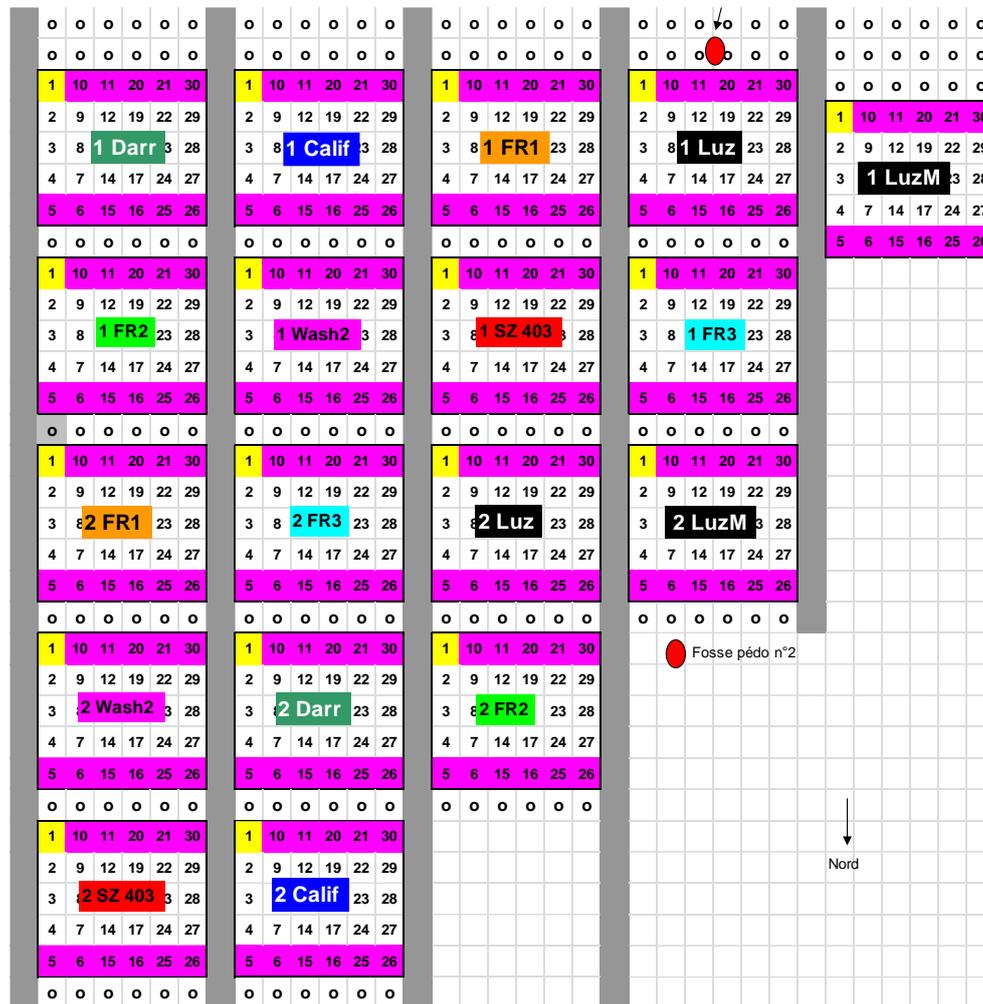
3.4.2.2. Dispositif :

9 placettes unitaires de 30 plants d'une même variété x 2 blocs soit un total de 540 plants suivis individuellement.

³ 1100 mm/an et 586 mm d'Avril à Octobre par *modèle NorCliS©CNPF construit à partir des données Météo France et AgroParisTech sur la période 1981-2010*

⁴ Ouverture de 2 fosses à la pelle mécanique, descriptions de sol et analyses chimiques disponibles auprès de S. Girard, IDF-CNPF.

Densité : 1111 plants/ ha ⇔ 3 m x 3 m



1.1.1.1. Matériel végétal évalué :

- | Darrington-VG (PME-VG-001) => Darr
- | La Luzette-VG (PME-VG-002) non mycorhizé => Luz
- | La Luzette-VG (PME-VG-002) mycorhizé par *Laccaria bicolor* (souche S238N)=> LuzM
- | Washington2-VG (PME-VG-005) => Wash2
- | Californie-VG (PME-VG-006) => Calif
- | France1-VG (PME-VG-004) => FR1
- | France2-VG (PME-VG-007) => FR2
- | France3-VG (PME-VG-008) => FR3
- | Seed Zone 403 (matériel américain) => SZ 403

Remarque : tous les plants ont été produits en 1 an en godet WMde 600 cc par la pépinière administrative d'Aix en Provence-Les Milles, sauf les plants LuzM produits racines nues par les pépinières Naudet.

3.4.2.3. Gestion appliquée :

Travaux préparatoires : pas de dessouchage, les rémanents ont été mis en andains par une pelle mécanique en janvier 2009. Andains tous les 16 m, larges de 4,5 m et hauts de 1 m environ. Sol nu à 95 % au moment de la plantation.

Plantation : le 21 avril 2009 par temps chaud et sec, à la pioche. Installation de 3 piquets acacia en quinconce autour des plants du dispositif pour limiter les dégâts de gibier.

Entretiens : mai 2009 : traitement contre l'hylobe (Forester®) ; *Une forte attaque d'hylobe au printemps 2010 a provoqué des mortalités malgré l'application d'un traitement Forester® quelques jours après l'apparition des premières morsures.*

Le premier dégagement a eu lieu durant l'été 2010 soit un an après la plantation, les suivants sont intervenus en 2012 (dégagement manuel à hauteur et rabattage des bouleaux et genets concurrentiels), en 2014, 2017 et au printemps 2019 (nettoyement d'un interligne sur 2 à la débroussailleuse à dos pour les 3 derniers). Compte tenu de l'état de la plantation lors de notre passage en décembre 2020, aucun autre dégagement ne sera nécessaire.

3.4.2.4. Mesures et observations réalisées

Des observations et mesures de hauteur ont eu lieu en : avril 2009 (H0), avril 2010 (H1), novembre 2010 (H2), janvier 2012 (H3), avril 2014 (H5), avril 2015 (surveillance), février 2018 (H9, C9) et décembre 2020 (C12 et Hdom 12).

A chaque passage, l'état général de chaque plant était noté en mentionnant la présence de certains défauts (cime sèche, plant abrouiti, frotté ou cassé et tout autre observation jugée opportune).

Le 7 décembre 2020 ont été mesurées les circonférences à 1,3 m de tous les arbres du dispositif (au niveau de la marque de peinture réalisée en 2018). Les hauteurs 2020 et 2019 des 59 arbres qui présentaient les plus forts diamètres en 2016 ($C130 \geq 39$ cm en 2016) ont également été mesurés à l'aide d'un vertex.

Aucun problème particulier n'a été signalé lors de cette dernière campagne, le peuplement était sain, et de belle venue.

3.4.2.5. Analyses statistiques

Les variables continues (hauteurs et circonférences) ont été traitées par analyse de variance à deux facteurs (provenance + bloc considérées respectivement comme fixe et aléatoire) sur les données individuelles, puis les moyennes ont été comparées à l'aide du test de comparaisons multiples de Tukey.

3.4.2.6. Résultats :

a) Mortalité

L'attaque d'hylobes survenue le mois qui a suivi la plantation (mai 2009) a provoqué de la mortalité dans le dispositif et des dégâts importants inégalement répartis. L'interandain situé le plus à l'Est a été le plus touché et en particulier dans le bloc 2 : SZ 403, WA2 et FR1 et dans le bloc 1 : FR2 et DARR. En 2011, de nouvelles morsures d'hylobe ont été observées sans toutefois provoquer de nouvelles pertes. Du fait de cette situation, les différences de mortalités observées entre variétés dans ce dispositif ne peuvent être interprétées comme indicateur de performance. Aucun traitement statistique n'a donc été réalisé sur cette variable. Rappelons qu'à la suite de cette attaque, le taux de mortalité était de 10 % sur le dispositif. Il a peu évolué par la suite puisque, neuf ans après la

plantation, il était de 12%, valeur qui n'a pas changé en 2020 malgré trois étés successifs particulièrement chauds.

Figure 11 : Evolution du taux de mortalité par variété sur le dispositif d'Autun.

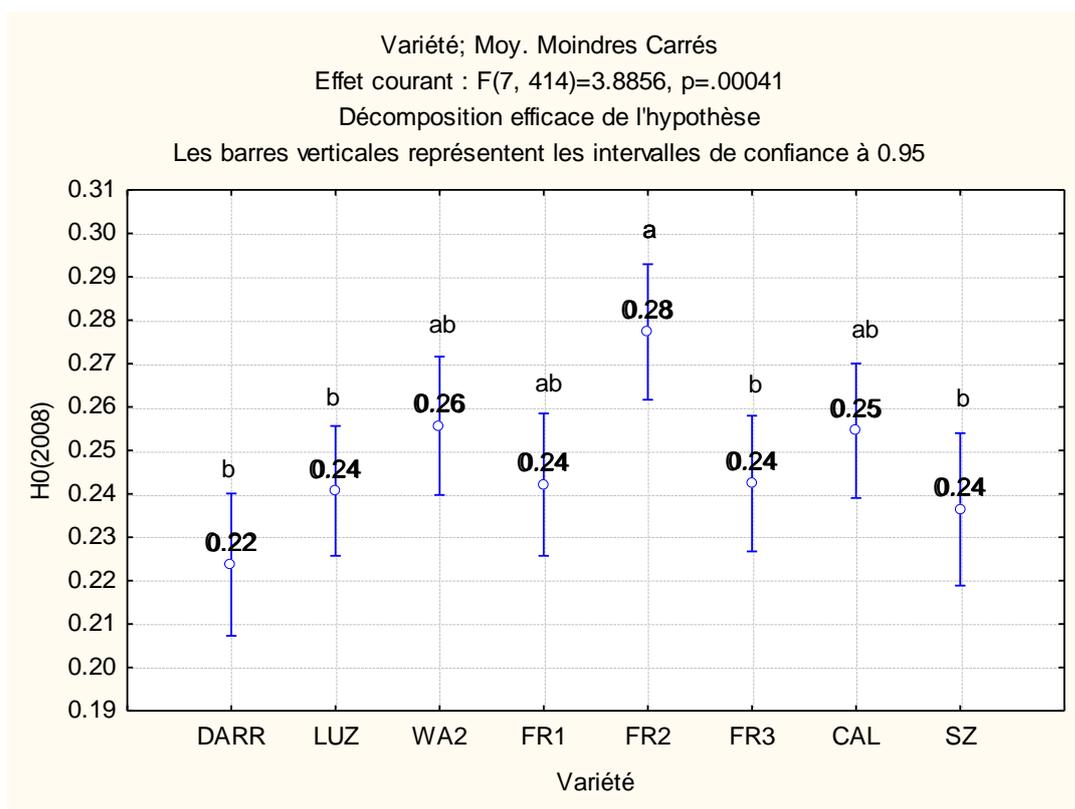
Mortalité :

	CAL	DARR	FR1	FR2	FR3	LUZ	SZ	WA2	Tous
2009	3%	13%	15%	7%	3%	0%	25%	10%	10%
2010	3%	17%	17%	7%	7%	0%	27%	10%	11%
2011	3%	17%	17%	8%	7%	0%	27%	12%	11%
2013	5%	17%	17%	8%	7%	0%	27%	12%	11%
2017	7%	17%	17%	8%	7%	0%	27%	12%	12%
2020	7%	17%	17%	8%	7%	0%	27%	12%	12%

Croissance en hauteur après plantation

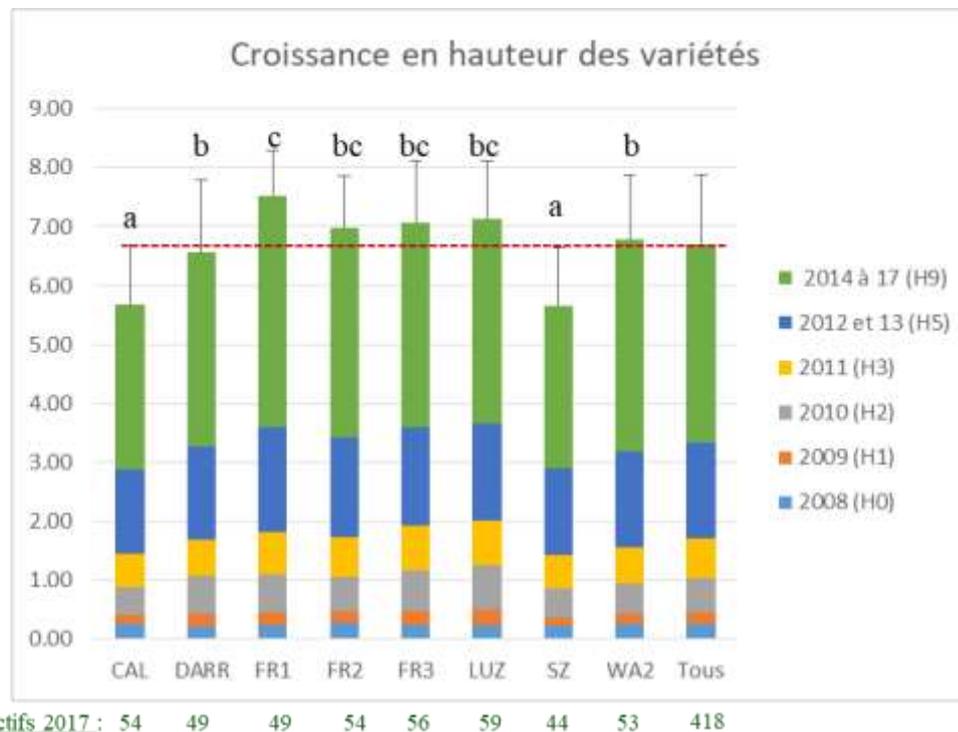
Au moment de leur plantation, les plants du dispositif mesuraient en moyenne 24 cm ($n=6$). L'analyse de variance mettait en évidence un effet variété mais pas d'effet bloc (Fig.12). Un écart significatif existait entre ceux de la variété FR2 et ceux de DARR (+ 5 cm).

Figure 12 : Hauteurs moyennes initiales (m) des différentes variétés mesurées en avril 2009 sur le site d'Autun. Les barres matérialisent l'intervalle de confiance.



Les résultats des différentes campagnes de mesures figurent sur le graphe ci-dessous et concernent les plants qui se sont développés sans aucun incident (Plants Indemnes).

Figure 13 : Hauteurs moyennes (m) des plants restés indemnes des différentes variétés sur le dispositif d'Autun



La première année, seule la variété LUZ a doublé sa hauteur, les variétés SZ 403 et CAL ont mis en place les pousses les plus courtes (13 et 15 cm respectivement) contre 20 cm en moyenne pour les autres.

La plus faible croissance en hauteur de SZ 403 et CAL a également été enregistrée les années suivantes et, 9 ans après plantation, ces variétés sont significativement plus petites que les autres avec une hauteur moyenne de 5.6 m, inférieure de 25 % à la plus haute c'est-à-dire FR1 qui atteint 7,5 m en moyenne. Viennent ensuite les variétés LUZ, FR3 et FR2 (7 m en moyenne) puis WA2 et DARR (6,7 m).

Défauts de forme

Pour évaluer les conséquences des attaques d'hylobe survenues immédiatement après plantation sur la forme des arbres, nous avons relevé le nombre et la hauteur des baïonnettes et des fourches lors du passage de 2013. Il s'avère que 60 % des arbres vivants du dispositif ne présentaient aucun défaut (pas de baïonnette, ni de fourche, ni de tête multiple) mais que 20 % possédaient un défaut "grave" nécessitant une opération de taille. Le propriétaire a jugé utile de tailler certains arbres les années suivantes. Lors des mesures, début 2018, 5 % des arbres du dispositif présentaient un défaut de forme « ancien » de type baïonnette ou fourche basse (de 0 à 8 % selon les variétés).

Précisons qu'aucune fente longitudinale, coulure de résines, décollement d'écorce n'a été observé lors de la campagne de mesure de décembre 2020.

Coefficient d'élanement à 9 ans

En 2017, 9 ans après plantation, les hauteurs et les circonférences à 1,30 m de chaque arbre du dispositif ont été mesurées, ce qui a permis de calculer le coefficient d'élanement moyen de chaque variété. Il correspond au rapport entre la hauteur et le diamètre à 1.30 m (Fig. 14).

Figure 14 : Rapport entre la hauteur (H) et le diamètre (D) des arbres âgés de 9 ans ou coefficient d'élanement des différentes variétés sur le site d'Autun.

	Effectifs	H/D	σ	
CAL	55	63.6	1.55	a
FR1	49	68.5	0.89	ab
LUZ	59	70.1	1.03	ab
FR2	55	71.3	1.08	b
FR3	55	71.3	1.38	b
DARR	49	71.8	1.40	b
SZ	44	72.0	1.50	b
WA2	53	73.1	0.92	b
Tous	419	70.1	1.27	

L'analyse de variance à deux facteurs (provenance, bloc) a mis en évidence un effet significatif ($p < 0.01$) de la variété sur ce coefficient mais pas d'effet bloc. Deux groupes se distinguent, les plants de la variété CAL étant en moyenne les plus trapus.

Hauteur dominante à 12 ans

Les mesures de circonférence faites en février 2018 à l'âge de 9 ans, nous ont permis d'identifier les 58 plus gros arbres du dispositif soit un peu plus de 10 % de l'effectif initial ; leur circonférence était supérieure à 39 cm. Leur répartition par bloc et variété est présentée dans le tableau ci-dessous (Fig.15).

Figure 15 : Répartition par bloc et variétés des 58 arbres les plus gros à l'âge de 9 ans sur la parcelle d'Autun.

En 2020, les arbres mis en place des cm en moyenne 0.28, valeur minimale maximale de 200).

La hauteur moyenne est de 11,21 m (0.94 elle correspond à la dominante du ans après la

	Nombre d'arbres mesurés		Effectif total	Proportion de chaque variété (%)
	Bloc 1	Bloc 2		
SZ 403	0	1	1	2
Calif	6	4	10	17
Darr	4	1	5	9
WA2	4	1	5	9
FR3	5	3	8	14
FR2	3	1	4	7
Luz	9	2	11	19
FR1	7	7	14	24
Total	38	20	58	100

les plus gros ont poussés de 97 (écart type de de 60 cm et

de ces arbres d'écart type), hauteur dispositif 13 germination des

Croissance en circonférence 12 ans après plantation

Des mesures de circonférence à 1,30 m ont eu lieu en février 2018 soit 9 ans après plantation (C9) et en 2020, douze ans après (C12). Les résultats de ces deux campagnes de mesures figurent dans le tableau ci-dessous et concernent l'ensemble des arbres vivants (remarque : les effectifs sont identiques puisqu'aucune mortalité supplémentaire n'est apparue entre les deux campagnes).

Figure 16 : Circonférence à 1.30m de tos les arbres des différentes variétés, 9 et 12 ans après plantation sur le dispositif d'Autun. Les moyennes accompagnées d'une lettre identique ne sont pas statistiquement différentes.

	C9 en cm (écart type)	C12 en cm (écart type)	Accroissement annuel moyen entre 2017 et 2020 en cm (écart type)	Effectif analysé
SZ 403	25.5 (6.8) c	38.4 (10.9) c	4.3 (1.6) a	44
Calif	29.2 (9.2) bc	40.4 (11.5) bc	3.7 (1.5) b	56
Darr	29.6 (8.5) bc	41.9 (11.1) abc	4.1 (1.4) a	50
WA2	29.7 (6.9) bc	44.1 (10.9) abc	4.8 (1.8) a	53
FR3	32.0 (7.2) ab	44.2 (9.4) abc	4.1 (1.2) a	55
FR2	31.0 (5.7) ab	44.4 (8.7) abc	4.5 (1.4) a	56
Luz	32.2 (6.5) ab	45.7 (8.8) ab	4.5 (1.2) a	60
FR1	34.7 (6.8) a	47.8 (8.2) a	4.4 (1.7) a	50
Moyenne	30.6 (7.6)	43.5 (10.3)	4.3 (1.5)	424

L'analyse de variance à deux facteurs (provenance, bloc) a mis en évidence un effet significatif ($p < 0.01$) de la variété sur la circonférence à 9 ans et à 12 ans ainsi que sur l'accroissement annuel entre ces deux dates ((C12 - C9)/3). En revanche, pour ces trois variables, pas d'effet bloc.

Neuf ans après plantation, la circonférence moyenne des arbres du dispositif était de 30,6 cm (7,6 cm d'écart type). La provenance américaine (SZ 403) avait les plus faibles valeurs (25,5 cm en moyenne) et FR1 les plus fortes (34,7 cm). Le différentiel était de 3 cm soit 10 % entre les variétés CAL et LUZ. Trois ans plus tard, la circonférence moyenne des arbres du dispositif est de 43,5 cm (10,3 cm d'écart type). Le classement des variétés n'a pas évolué : SZ 403 présente la circonférence moyenne la plus faible et FR1 la plus forte (38,4 et 47,8 cm respectivement) soit un différentiel de presque 10 cm. Le différentiel entre CAL et LUZ est de 5,3 cm soit 13 %.

L'accroissement annuel moyen des trois dernières années est de 4,3 cm toutes variétés confondues, seule la variété CAL a eu un accroissement significativement inférieur aux autres (3,7 cm/an) soit un écart de croissance de l'ordre de 15 %.



Fig. 17 : Aperçu de la parcelle le 26 septembre 2011 soit 3 ans après plantation (Photo S. Girard, CNPF)

3.4.3. Dispositif de Dettey, Saône et Loire

Le dispositif est situé en forêt privée, il est suivi par le CNPF. La parcelle était précédemment occupée par des douglas exploités à l'âge de 24 ans l'hiver 2003/04 car certains, après l'été 2003, étaient entièrement secs et d'autres présentaient des cimes sèches.

3.4.3.1. Caractéristiques de la parcelle

- | région forestière IGN : Charolais et annexes (SER B92 : - Bourbonnais et Charolais) ;
- | altitude : 440 m ;
- | orientation : SW et SE ;
- | Position topographique : Haut de versant, pente : de 15 à 25 % ;
- | T° moy min : 5,5°C T° moy max : 15,1°C T° moy annuelle : 10.3°C⁵ (Ref : 1971-2000, St Symphorien de Marmagne situé à 360 m d'altitude)
- | 1 030 mm d'eau/an⁶ dont 495 mm entre Avril et Septembre (Ref : 1971-2000, Uchon situé à 654 m d'altitude)
- | indice de vigilance climatique : 3 (4 avec +1°C) (Ref : modèle NorCliS©CNPF construit à partir des données Météo France et AgroParisTech sur la période 1981-2010) ;
- | sol cryptopodzolique peu profond (pHeau: 4.5) très chargé en éléments grossiers, formé sur granite ;
- | ouverture de 2 fosses à la pelle mécanique, descriptions de sol et analyses chimiques disponibles auprès de S. Girard, IDF-CNPF.



Fig. 18 : Vue panoramique de la partie orientée SW en avril 2009 (Photos S. Girard)

3.4.3.2. Dispositif :

Le site est divisé en 2 zones, l'une orientée Sud-Ouest, l'autre Sud-Est, chacune d'entre elles étant découpées en 4 blocs avec 7 (au SW) et 8 plants (partie SE) de chaque variété (cf. plan ci-dessous).

Au Sud Est : 4 blocs x 9 provenances x 7 plants disposés en ligne.

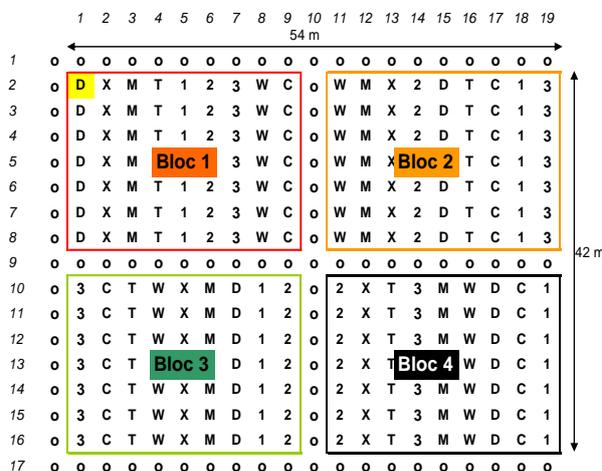
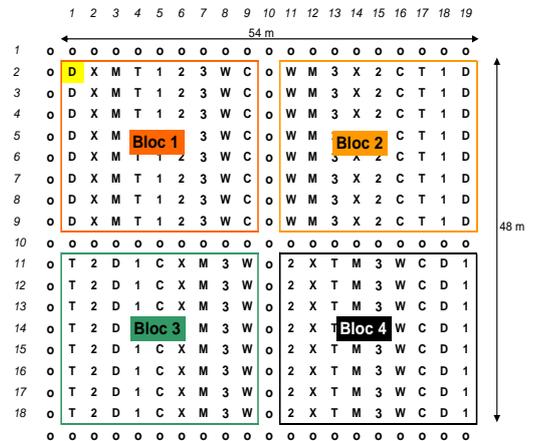
Au Sud Ouest : 4 blocs x 9 provenances x 8 plants disposés en ligne.

Au total, 540 plants sont suivis individuellement.

Densité : 1111 plants/ ha ⇔ 3 m x 3 m

⁵ 10.7° par modèle NorCliS©CNPF construit à partir des données Météo France et AgroParisTech sur la période 1981-2010

⁶ 945 mm/an et 546 mm d'Avril à Octobre d'après le modèle NorCliS©CNPF construit à partir des données Météo France et AgroParisTech sur la période 1981-2010



M	Luzette-VG mycorhizé
X	Luzette-VG
1	France 1- VG
C	Californie-VG
D	Darrington-VG
T	SZ 403
2	France 2-VG
3	France 3-VG
W	Washington2-VG

3.4.3.3. Matériel végétal évalué :

- Darrington-VG (PME-VG-001) => D
- La Luzette-VG (PME-VG-002) => X
- La Luzette-VG (PME-VG-002) mycorhizé par *Laccaria bicolor* (souche S238N) => M
- Washington2-VG (PME-VG-005) => W
- Californie-VG (PME-VG-006) => C
- France1-VG (PME-VG-004) => 1
- France2-VG (PME-VG-007) => 2
- France3-VG (PME-VG-008) => 3
- Seed Zone 403 (matériel américain) => T

Remarque: tous les plants ont été produits en 1 an en godet de 600 cc par la pépinière administrative d'Aix en Provence-Les Milles, sauf les plants LUZM (Luzette-VG mycorhizés) produits racines nues par les pépinières Naudet.

3.4.3.4. Gestion appliquée

Travaux préparatoires : Broyage en plein

Plantation : le 24 avril 2009 par temps chaud et sec ; à la pioche. Installation de 3 piquets acacia en quinconce autour des plants du dispositif pour limiter les dégâts de gibier.

Entretiens : Les interlignes ont été broyées l'été 2010 soit un an après la plantation et en 2012. Par la suite, des passages ont été réalisés à la débroussailleuse à dos pour permettre la mesure et l'observation des arbres (pas de justification sylvicole) : en 2014, pour les mesures 5 ans après plantation et en novembre 2015, pour quantifier les dégâts apparus au cours de l'été. Pour la campagne de 2020, soit 12 ans après plantation, il a été nécessaire de dégager manuellement un interligne sur 2 pour atteindre les arbres.

3.4.3.5. Mesures et observations réalisées

Des observations et mesures de hauteur ont eu lieu en : avril 2009 (H0), avril 2010 (H1), novembre 2010 (H2), janvier 2012 (H3), avril 2014 (H5), novembre 2015 (observation des dégâts après un été particulièrement chaud et sec), décembre 2016 (H8, C8) et décembre 2020 (C12 et Hdom 12).

A chaque passage, l'état général de chaque plant était noté en mentionnant la présence de certains défauts (cime sèche, plant abrousti, frotté ou cassé et tout autre observations jugée opportune).

En août 2015, des rougissements de rameaux ont été détectés dans les houppiers résultant- a priori- des conditions particulièrement sèches et chaudes de l'été. Pour savoir si toutes les variétés étaient impactées de la même façon, une campagne d'observations a été réalisée en novembre 2015 pour évaluer la perte foliaire de chaque individu. Plus précisément, nous avons répertorié les arbres ayant des aiguilles rouges au moment de notre passage et compté le nombre d'années d'aiguilles au niveau des branches situées entre 1,5 et 2 m de hauteur âgées de 3 voire 4 ans.

Le 7 décembre 2020 ont été mesurées les circonférences à 1,3 m de tous les arbres du dispositif (au niveau de la marque de peinture réalisée en 2016). Les hauteurs 2020 et 2019 des 54 arbres qui présentaient les plus forts diamètres en 2016 ($C130 \geq 31$ cm en 2016) ont également été mesurées à l'aide d'un vertex.

En 2020, lorsque de nouveaux arbres étaient morts, nous avons noté si leur mort était survenue en 2020 (aiguilles sèches encore visibles) ou avant. De nombreuses cimes sèches ont été observées. Les cas observés jusqu'à présent concernaient toujours le dessèchement d'une partie de la pousse de l'année en cours, rarement la pousse entière). Lors de cette campagne, des dessèchements de grande ampleur ont été observés, sur plusieurs mètres et concernant parfois les 2/3 du houppier de l'arbre (Photo). Lorsque ce phénomène s'accompagnait d'une faible densité d'aiguilles dans la partie encore vivante, nous avons qualifié ces individus de « moribonds ».

Plusieurs observations récurrentes ont été faites lors de cette campagne en lien avec la dégradation de l'état de nombreux arbres du dispositif. Nous avons ainsi noté un certain nombre de « problèmes particuliers » :

- | « Coulures » = la présence d'écoulements de résine sur le tronc (sans préciser la hauteur du phénomène ni son intensité ni son caractère ceinturant ou non), cf. photo 1 ;
- | « Méplat » = la présence d'une zone de méplat sur le tronc, avec le plus souvent un décollement d'écorce et évoquant un chancre, cf. photo 2 ;
- | « Fente » = fente verticale sur le tronc, observés en général à plus de 3 m de hauteur. Sur un individu où 3 fentes distinctes étaient observées, nous les avons localisées sur les pousses mises en place en 2013, 2015 et 2016 ;
- | « déficience en aiguilles » lorsque le houppier était très clair et ne portait qu'une année d'aiguilles sur la plupart de ses branches.

3.4.3.6. Analyses statistiques

* Mortalité : La liaison entre les variables « taux de mortalité à 12 ans » et « variété » a été recherchée en utilisant le test d'indépendance du Khi2 au seuil de risque α de 1%. Dans le cas d'une liaison entre ces variables, les résidus ajustés (résidus d'Haberman) ont été testés au seuil unilatéral de 1%.

* Hauteur, Rapport Hauteur/ Diamètre, Circonférence :

La distribution normale de ces variables a été vérifiée à l'aide du test de Shapiro-Wilk. Des analyses de variance à deux facteurs (Variété et Bloc) ont ensuite été réalisées sur les données individuelles. Le test de comparaisons multiples de Tuckey a été utilisé pour déterminer les différences significatives entre les moyennes.

3.4.3.7. Résultats :

a) Mortalité

Le taux de reprise était très bon sur l'ensemble du dispositif puisque seulement 2 plants étaient morts après la première saison de végétation. Les années suivantes, sans contrainte météorologique majeure, très peu de mortalité supplémentaire a été enregistrée. Ainsi, début 2014, le taux de survie sur l'ensemble du dispositif s'élevait à 97 %.

Les années suivantes, la mortalité a en revanche augmenté, de façon plus forte dans la partie exposée au Sud-Est comparativement à celle orientée au Sud-Ouest (tableaux ci-dessous). Le phénomène semble avoir démarré en 2015, année caractérisée par un été sec et très chaud à la suite duquel des rougissements et des pertes d'aiguilles avaient été observés sur le site (cf. paragraphe suivant). Ainsi, en novembre 2015, plus de 60 % des plants vivants avaient perdu tout ou parties des aiguilles mises en place l'année précédente.

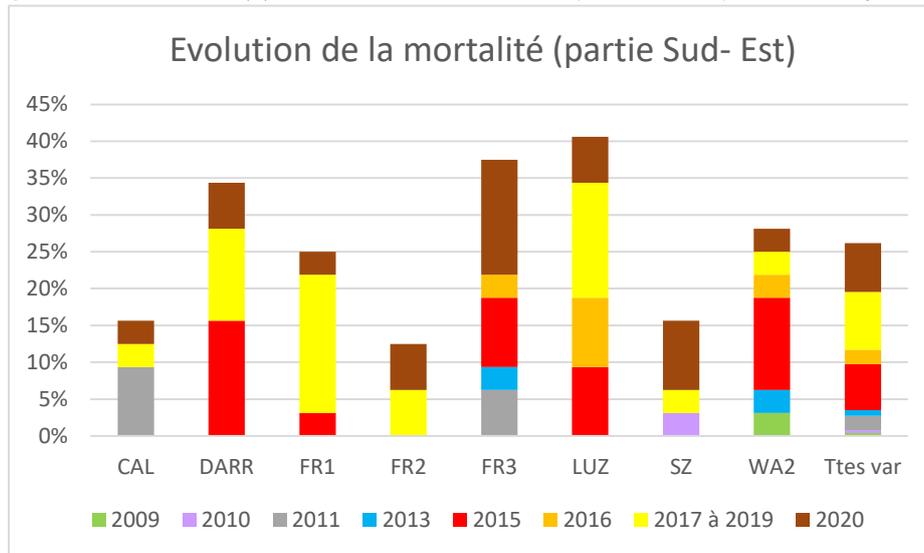
	Taux de mortalité	
	Sud Ouest	Sud Est
2009	0%	0%
2010	0%	1%
2011	1%	3%
2013	2%	4%
2015	3%	10%
2016	4%	12%
2017 à 2019	4%	20%
2020	5%	26%

Tableau 19 : Evolution du taux de mortalité selon l'exposition sur le dispositif de Dettey en comptabilisant les plants des 7 variétés et du témoin (effectif total initial de 480 plants)

De nouvelles mortalités sont survenues les années suivantes, marquées, pour la plupart, par de forts déficits hydriques estivaux. Douze ans après la plantation, $\frac{1}{4}$ des douglas plantés dans la partie orientée Sud-Est ont disparu et 5 % dans la partie Sud-Ouest.

La figure ci-dessous permet de visualiser la progression de la mortalité par variété et par année dans la zone la plus impactée (Sud-Est).

Fig. 20 : Taux de mortalité (%) des différentes variétés dans la partie SE du dispositif de Dettey



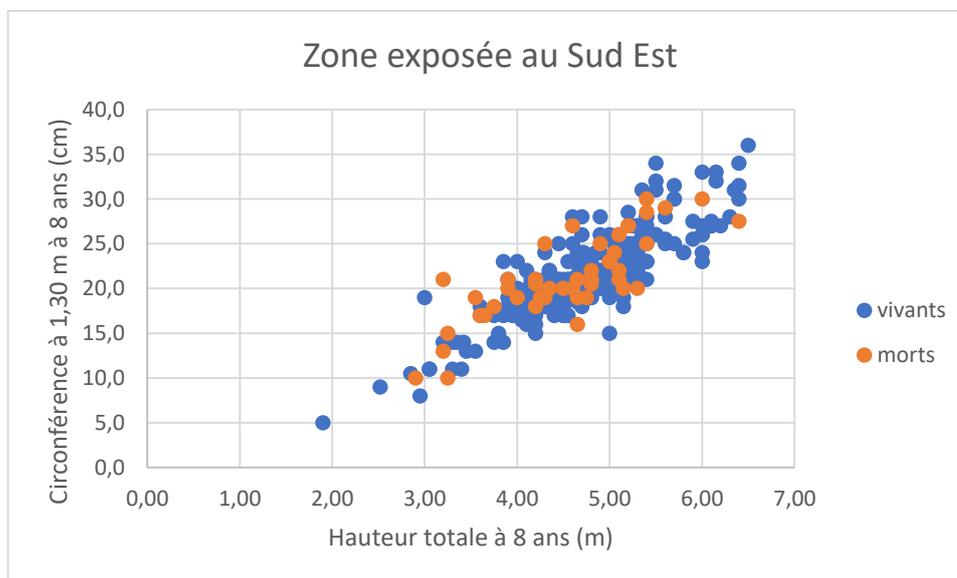
Dans la zone exposée au Sud-Est, le taux de mortalité diffère selon la variété considérée (test du Khi2). Les variétés LUZ, FR3 et DARR présentent les taux de mortalité les plus élevés (41%, 38 % et 34 % respectivement). Seules SZ 403 et les variétés CAL et FR2 dépassent les 80 % de survie, douze ans après plantation.

Nous avons voulu savoir si les arbres morts en 2020, depuis la dernière campagne de mesures avaient des caractéristiques de croissance particulières (plus petits ou au contraire plus grands ou gros, que les autres). Pour chaque zone (SE et SW), nous avons donc constitué 2 populations : a) les plants morts entre 2016 et 2020 et b) les plants vivants. Leurs caractéristiques en termes de hauteur et de circonférence à 1,30 m sont représentées dans les graphes suivants :

Figure 21 : Comparaison des dimensions des plants morts après 2016 (en orange) et des plants vivants en 2020 (en bleu) dans les deux zones.



Figure 22 : Dimensions des plants à 8 ans sur la zone Sud-Est, toutes variétés confondues, selon leur statut (mort ou vivant) à 12 ans.



Aucun lien n'apparaît entre les dimensions qu'avaient les plants en 2016 à l'âge de 8 ans et leur mortalité dans les années qui ont suivi.

b) Dégâts foliaires apparus l'été 2015

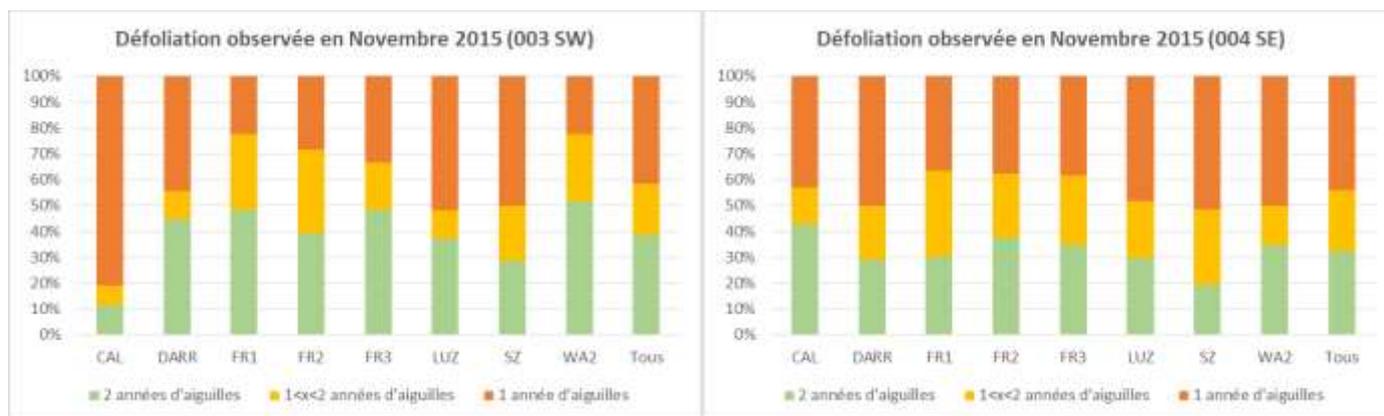
Lors d'un passage sur le dispositif en août 2015, des rougissements ont été observés (cf. photos ci-dessous).

Photos 23 : Colorations observées sur le dispositif le 26 août 2015 (photos : B. Borde, CRPF BFC) :



En novembre 2015, plus de 60 % des plants vivants avaient perdu tout ou parties des aiguilles mises en place l'année précédente et ne conservaient que les aiguilles de 2015 (histogramme ci-dessous) et cela, dans les deux zones du dispositif.

Fig. 24 : Nombre moyen d'année d'aiguilles présentes sur les arbres des différentes variétés en novembre 2015 dans la zone orientée au sud-ouest (graphe de gauche) et celle orientée au sud-est (graphe de droite) du dispositif de Dettey



Aucune liaison statistiquement significative n'existe entre les variables « Nombre d'années d'aiguilles » et « variété » quelle que soit la partie du dispositif considérée. La variété CAL a été particulièrement touchée dans la partie exposée au SW.

c) Etat sanitaire 12 ans après plantation

En décembre 2020, des fentes longitudinales (photo 1), des coulures de résine (photo 2), des décollements d'écorce (photo 3) et de forts déficits foliaires et descentes de cimes ont été observés (photo 4).

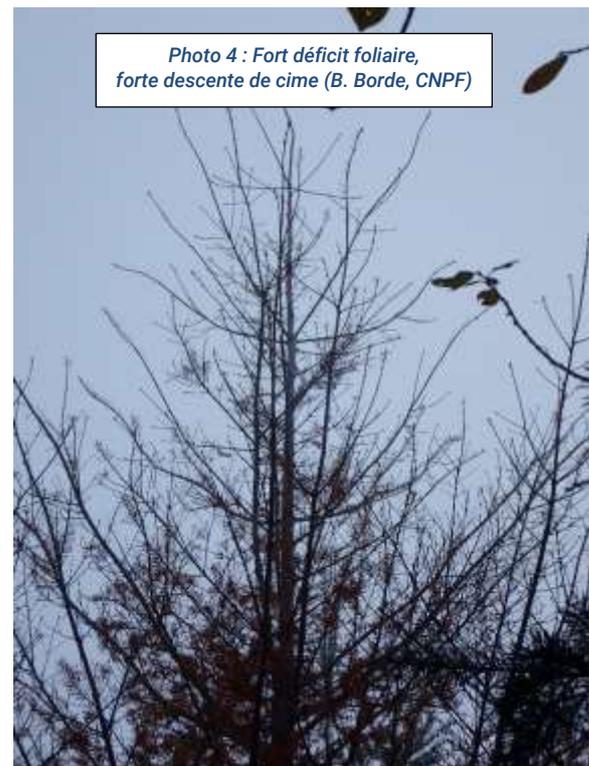
Fig. 25 : Les différents symptômes observés en novembre 2015 sur le site de Dettey.



Photo 1 : Fente
longitudinale
(B.Borde, CNPF)

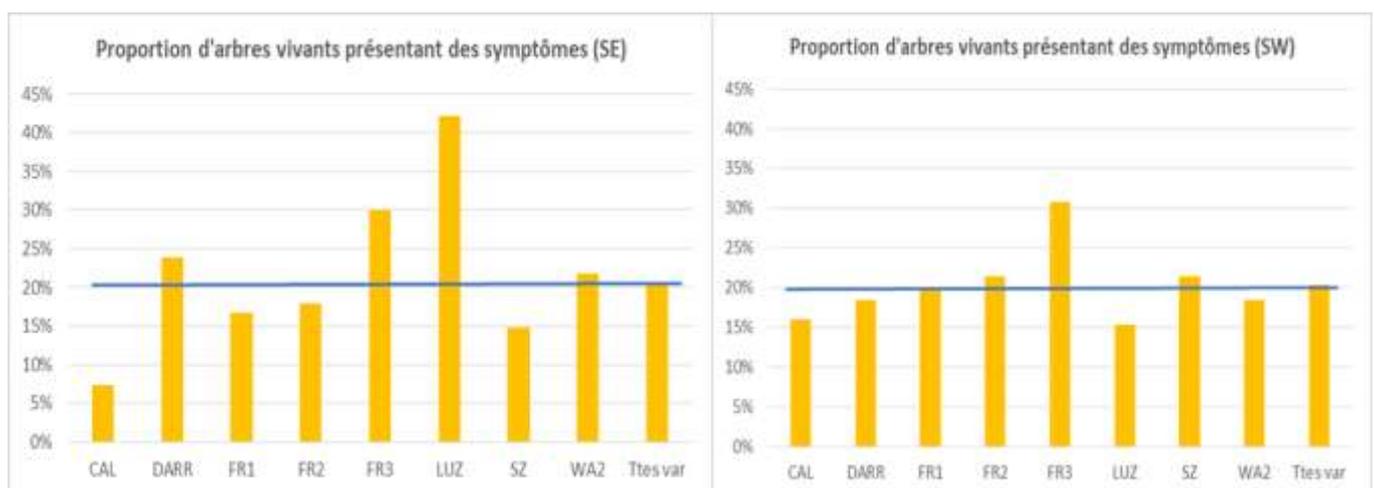


Photo 2 : Ecoulements
de résine
(B.Borde, CNPF)



Les graphes ci-dessous récapitulent, par variété, la proportion des arbres vivants présentant au moins un de ces éléments.

Fig. 26 : Proportion d'arbres présentant au moins un symptôme dans la zone orientée au sud-est (graphe de gauche) et celle orientée au sud-ouest (graphe de droite) du dispositif de Dettey.



Présents sur les 2 versants, ils concernent en moyenne, 1 arbre vivant sur 5. Cette proportion est relativement similaire quelle que soit la variété au SW en revanche, au SE, l'hétérogénéité est plus forte avec un minimum à 7 % pour CAL et un maximum de 42 % pour LUZ. Dans cette zone, on

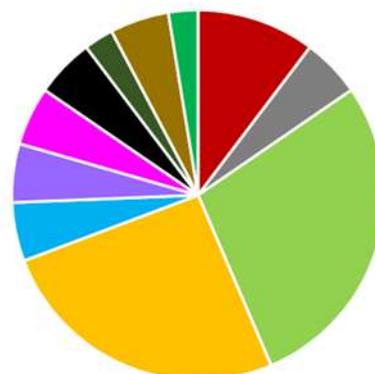
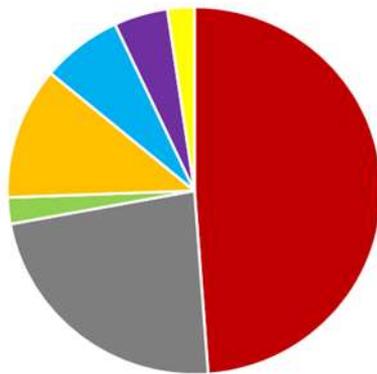
remarque que les 3 variétés les plus touchées sont celles qui présentent les taux de mortalité les plus élevés.

Tous les dégâts ne sont pas représentés avec la même importance dans les 2 zones : les coulures de résines et les décolllements d'écorce sont très fréquents au SW et représentent les 3/4 des dégâts observés, alors qu'au SE, les forts dessèchements de houppiers et les pertes foliaires sont les plus répandus (graphes ci-dessous).

Fig. 27 : Nature des dégâts observés, toutes variétés confondues, dans la zone orientée au sud-ouest (graphe de gauche) et celle orientée au sud-est (graphe de droite) du dispositif de Dettey

Nature des dégâts observés sur les 43 plants touchés au SW

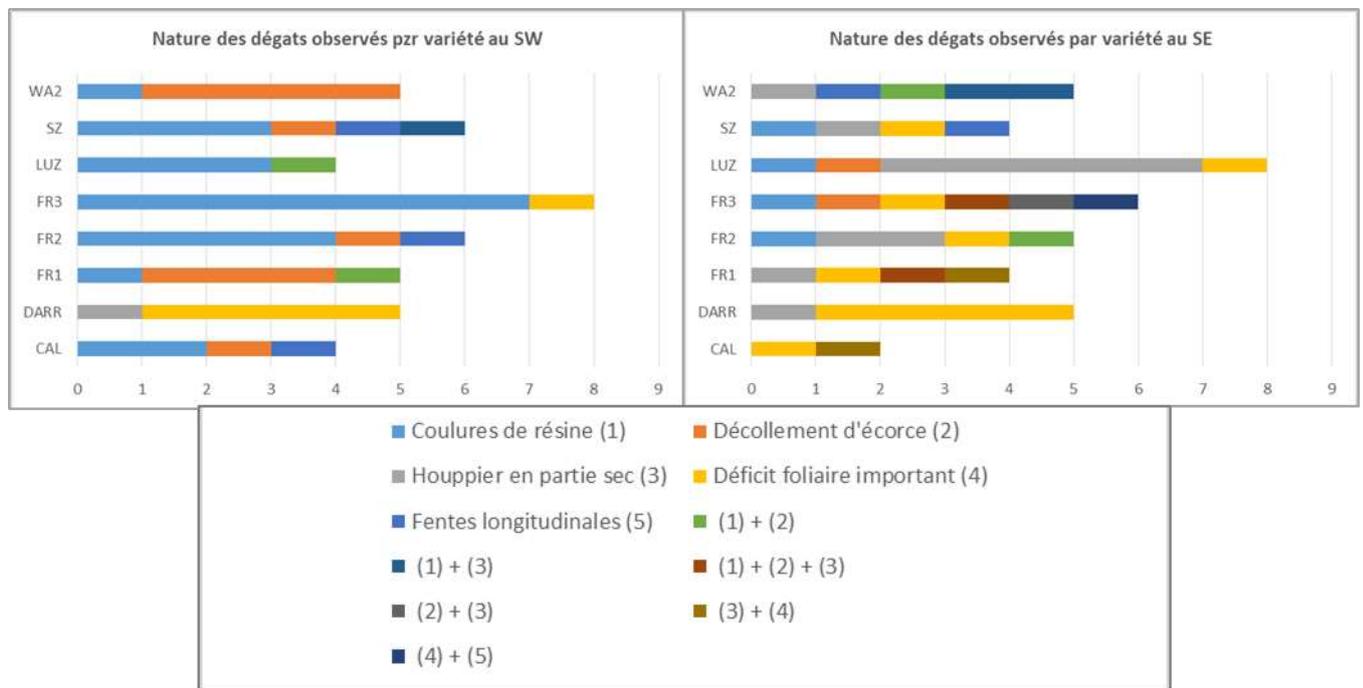
Nature des dégâts observés sur les 39 plants touchés au SE



- | | |
|------------------------------|----------------------------------|
| ■ Coulures de résine (1) | ■ Décollement d'écorce (2) |
| ■ Houppier en partie sec (3) | ■ Déficit foliaire important (4) |
| ■ Fentes longitudinales (5) | ■ (1) + (2) |
| ■ (1) + (3) | ■ (1) + (2) + (3) |
| ■ (2) + (3) | ■ (3) + (4) |
| ■ (4) + (5) | |

Les deux graphes ci-dessous présentent la nature des dégâts observés pour chaque variété. Compte tenu des faibles effectifs concernés, il n'est pas possible de mettre en évidence un lien entre variété et symptômes.

Fig. 28 : Nature des dégâts observés par variété dans la zone orientée au sud-ouest (graphe de gauche) et celle orientée au sud-est (graphe de droite) du dispositif de Dettey



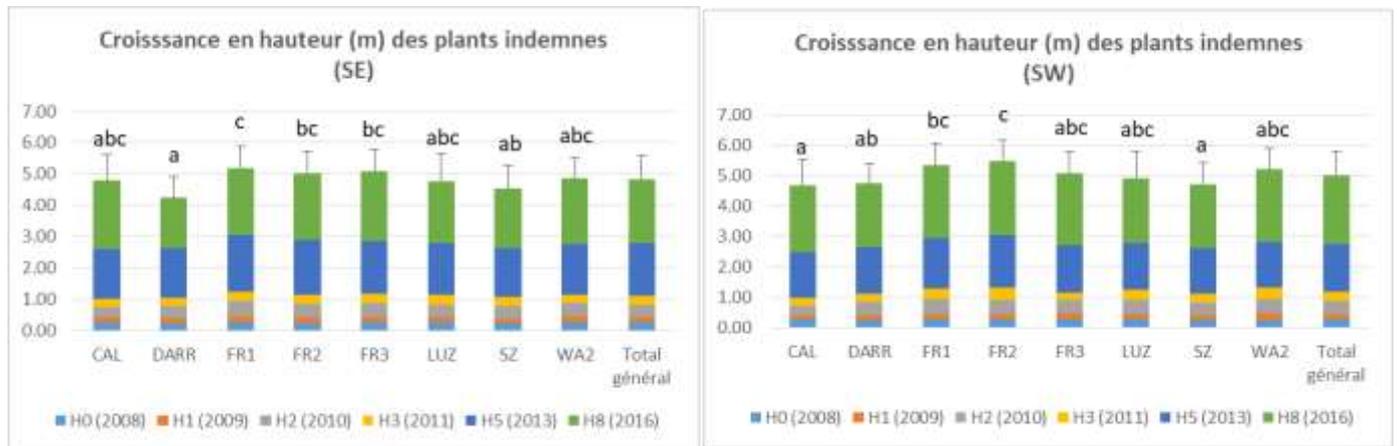
Il sera intéressant de suivre l'évolution de ces dégâts pour établir - le cas échéant - un lien entre leur présence et la croissance voire la survie ultérieure des arbres. Se pose également la question de savoir s'il s'agit de symptômes liés à des stress différents ou bien à un même stress d'intensité variable. Ses symptômes ont été portés à connaissance des autres membres du réseau national d'évaluation des variétés de douglas et les prochaines campagnes d'observations des dispositifs du réseau s'attacheront à relever ou non leur présence.

d) Croissance en hauteur après plantation

Pour mémoire, des mesures de hauteur ont eu lieu en avril 2009 (H0), avril 2010 (H1), novembre 2010 (H2), janvier 2012 (H3), avril 2014 (H5), décembre 2016 (H8).

Les résultats présentés ci-dessous concernent les plants dont la croissance s'est déroulée sans altération majeure (les arbres ayant subi des frottis n'apparaissent pas dans les moyennes).

Fig. 29 : Croissance en hauteur des plants indemnes d'accident dans la zone orientée au sud-est (graphe de gauche) et celle orientée au sud-ouest (graphe de droite) du dispositif de Dettey Les variétés accompagnées d'une lettre identique ne sont pas statistiquement différentes.



Les plants du dispositif mesuraient en moyenne 27 cm ($\bar{x} = 6$) à la plantation.
La hauteur atteinte 8 ans après plantation diffère selon l'orientation du versant et selon la variété considérée sans qu'aucune interaction entre ces deux facteurs n'ait été mise en évidence par l'analyse statistique.
Les plants installés sur le versant orienté au Sud-Ouest sont en moyenne légèrement plus grands que ceux plantés au Sud-Est (5 m contre 4,8 m soit une faible différence de 4 %, statistiquement significative néanmoins).
Sur les deux versants, les variétés CAL, DARR et SZ sont plus petites que les autres.

e) Coefficient d'élanement à 8 ans

En 2016, 8 ans après plantation, les hauteurs et les circonférences à 1,30 m de chaque arbre du dispositif ont été mesurées, ce qui a permis de calculer le coefficient d'élanement moyen de chaque variété. Il correspond au rapport entre la hauteur et le diamètre à 1,30 m.

Fig. 30 : Moyenne des coefficients d'élanement des différents variétés dans la zone orientée au sud-est (tableau de droite) et celle orientée au sud-ouest (tableau de gauche) du dispositif de Dettey

Dispositif 003 SW				Dispositif 004 SE					
Tous les arbres vivants en 2016				Tous les arbres vivants en 2016					
	H/D	σ	Effectif		H/D	σ	Effectif		
CAL	64.32	8	25	a	CAL	65.55	8	29	a
FR2	66.64	7	28	ab	FR2	67.59	9	32	ab
FR3	67.36	7	25	ab	FR3	68.58	9	25	ab
FR1	67.38	8	26	ab	WA2	69.54	7	23	ab
LUZ	67.92	9	27	ab	FR1	70.02	10	29	ab
LUZM	67.93	10	26	ab	LUZM	70.63	9	26	ab
WA2	68.68	9	27	ab	LUZM	70.94	8	28	ab
DARR	70.94	7	27	ab	SZ	73.43	9	31	b
SZ	72.04	11	28	b	DARR	74.13	11	25	b
Total général	68.18	9	239		Total général	70	9	248	

Les arbres sont significativement plus élancés dans la partie orientée au Sud-Est que ceux plantés dans la partie Sud-Ouest (Tableaux ci-dessus). Sur les deux sites, la variété CAL est la plus trapue, tandis que le témoin américain SZ est le plus élancé. Les autres variétés ne se distinguent pas pour ce caractère.

f) Hauteur dominante à 12 ans

Les mesures de circonférence faites en décembre 2016 à l'âge de 8 ans, nous ont permis d'identifier les plus gros arbres du dispositif : n=23 au SW et au SE avec une circonférence supérieure ou égale à 31 cm dans le premier et à 27,5 cm dans le second, soit 8,5 % de l'effectif initial. Sur ces arbres, nous avons mesuré les hauteurs atteintes en 2019 et 2020. Leur répartition par versant et variété est présentée dans le tableau ci-dessous.

Fig. 31 : Nombre d'arbres utilisé pour le calcul de la hauteur dominante par variété dans les deux zones du dispositif de Dettey

	Nombre d'arbres mesurés au SE	Proportion (%)	Nombre d'arbres mesurés au SW	Proportion (%)	Effectif total	Proportion de chaque variété dans l'effectif des plus gros arbres de la parcelle(%)	
SZ 403	0	0	3	13	3	6.5	de
Calif	6	26	2	9	8	17	est de
Darr	0	0	1	4	1	2	0,8)
WA2	1	4	2	9	3	6.5	zone
FR1	2	9	3	13	5	11	SE et
FR2	6	26	4	17	10	22	=0,8)
FR3	6	26	2	9	8	17	SW,
Luz	1	4	4	17	5	11	de 9,8
LUZM	0	0	1	4	1	2	sur
RN	1	4	1	4	2	4	du
Total	23	100	23	100	46	100	

La hauteur moyenne de ces arbres est de 9,6 m (σ=0,8) dans la zone orientée au SE et de 10 m (σ=0,8) dans celle orientée au SW, soit une hauteur moyenne de 9,8 m (σ=0,8) sur l'ensemble du site. Ces valeurs correspondent à la hauteur dominante atteinte par les douglas 13 ans après la germination des graines et permettent d'évaluer le niveau de fertilité du site. Ainsi, d'après Angelier (2006), celui-ci se trouve en classe de fertilité 2.

Les mesures de la hauteur 2019 réalisées sur la plupart de ces arbres, permettent de préciser que la longueur moyenne des pousses mises en place au cours de la saison 2020 est de 70 cm sur la partie SW et de 90 sur la partie SE.

g) Croissance en circonférence 12 ans après plantation

Des mesures de circonférence à 1,30 m ont eu lieu en décembre 2016 soit 8 ans après plantation (C8) et en 2020, douze ans après (C12).

Les résultats des deux campagnes de mesures figurent dans les tableaux ci-dessous et concernent l'ensemble des arbres vivants.

L'analyse statistique (ANOVA à 2 facteurs) met en évidence un effet significatif de l'orientation du dispositif et de la variété sur la circonférence à 8 et 12 ans. Le même résultat est obtenu pour la variable « accroissement annuel en circonférence entre 2016 et 2020 ».

Les circonférences sont légèrement plus faibles dans la partie orientée au SE tout comme l'accroissement annuel.

Partie orientée au SW :

Sur le versant orienté au SW, où la mortalité est la plus faible et les performances en croissance en hauteur légèrement meilleures, la variété FR2 présente la circonférence moyenne à 12 ans la plus forte (44,8 cm en moyenne) tandis que les plus faibles sont observées pour le témoin SZ 403 et DARR (38,6 et 38,8 cm respectivement).

En revanche, l'accroissement annuel réalisé les 4 dernières années est le même quelle que soit la variété considérée avec une valeur moyenne de 4,5 cm.

Fig. 32 : Circonférence moyenne à 1.30 m (écart type), nombre d'individus mesurés (n) à 8 et 12 ans et accroissement moyen sur cet intervalle dans la partie orientée au sud-ouest du dispositif de Dettey

	C8 en cm (écart type)	n	C12 en cm (écart type)	n	Accroissement annuel moyen entre 2018 et 2020 en cm (écart type)	n
SZ 403	21.3 (5.7) a	28	38.6 (8.6) a	28	4.3 (0.9) a	28
Calif	23.5 (4.7) abc	25	40.6 (9.5) ab	26	4.5 (1.1) a	25
Darr	21.4 (4.5) ab	27	38.8 (6.5) a	26	4.3 (1.7) a	26
WA2	24.1 (3.9) abc	27	43.6 (6.0) ab	27	4.9 (1.0) a	27
FR1	25.4 (4.8) bc	26	42.6 (8.6) ab	26	4.3 (1.7) a	26
FR2	26.1 (5.0) c	28	44.8 (5.0) b	28	4.7 (0.5) a	28
FR3	24.2 (4.1) abc	25	42.1 (6.0) ab	25	4.5 (1.0) a	25
Luz	23.3 (5.7) abc	27	41.7 (7.0) ab	26	4.5 (0.7) a	26
Moyenne	23.6 (5.0)	213	41.6 (7.5)	212	4.5 (1.0)	211

Partie orientée au SE

Sur le versant orienté au SE, les circonférences sont légèrement plus faibles.

Fig. 33 : Circonférence moyenne à 1.30 m (écart type), nombre d'individus mesurés (n) à 8 et 12 ans et accroissement moyen sur cet intervalle dans la partie orientée au sud-est du dispositif de Dettey

	C8 en cm (écart type)	n	C12 en cm (écart type)	n	Accroissement annuel moyen entre 2018 et 2020 en cm (écart type)	n
SZ 403	19.7 (3.2) a	31	35.4 (4.8) ab	29	3.8 (0.7) ab	29
Calif	23.4 (5.6) b	29	40.5 (8.5) b	28	4.3 (0.9) b	27
Darr	18.2 (4.6) a	25	30.8 (7.7) a	23	3.3(1.2) a	22
WA2	22.0 (3.8) ab	23	39.0 (4.9) b	22	4.2 (0.7) b	22
FR1	23.4 (4.8) b	29	39.0 (8.1) b	23	3.9 (1.0) ab	23
FR2	23.9 (5.1) b	32	40.1 (6.5) b	32	4.0 (0.7) b	32
FR3	23.6 (4.2) b	25	39.4 (6.2) b	25	3.9 (0.8) ab	25
Luz	21.2 (2.9) ab	26	37.6 (4.8) b	22	4.1 (0.8) b	22
Moyenne	22.0 (4.7)	220	37.8 (7.1)	204	4.0 (0.9)	203

La circonférence moyenne la plus faible concerne la variété DARR, les plus fortes CAL et FR2. Contrairement à l'autre partie du dispositif, les accroissements annuels diffèrent selon les variétés : celles avec les diamètres les plus gros ayant une croissance supérieure aux autres.

3.4.4. Dispositif de Pressy sous Dondin, Saône et Loire

Le dispositif est situé en forêt privée, il est suivi par le CNPF. La parcelle était précédemment occupée par des douglas.

3.4.4.1. Caractéristiques de la parcelle :

- | région forestière IGN : Clunisois (SER G41 : Bordure Nord-Est du Massif central) ;
- | altitude : 355 m ;
- | orientation : SSW ;
- | position topographique : haut de versant, pente : 15 % ;
- | T° moy min : 5,8°C T° moy max : 14,4°C T° moy annuelle : 10.1°C⁷ (Ref : 1971-2000, St Bonnet de Joux situé à 360 m d'altitude)
- | 900 mm d'eau/an⁸ dont 367 mm entre avril et septembre (Ref : 1971-2000, La Guiche situé à 433 m d'altitude)
- | indice de vigilance climatique : 3 (4 avec +1°C) (Ref : modèle NorCliS©CNPF construit à partir des données Météo France et AgroParisTech sur la période 1981-2010)
- | sol cryptopodzolique brun acide (pH_{eau}: 4.5) à texture SL, formé sur granite alcalin ;
- | ouverture de 2 fosses à la pioche, descriptions de sol et analyses chimiques disponibles auprès de S. Girard, IDF-CNPF.



Fig. 34 : Vue du dispositif de Pressy juste après plantation le 22 avril 2009(Photo S. Girard, CNPF)

3.4.4.2. Dispositif :

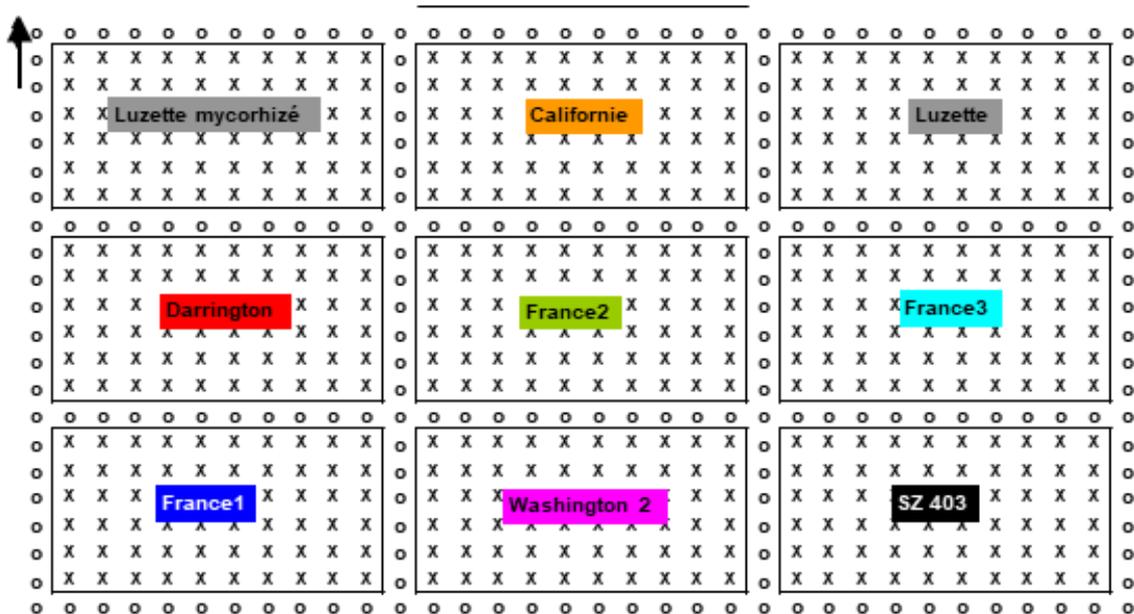
9 placettes unitaires de 60 plants d'une même variété soit un total de 540 plants suivis individuellement.

Densité : 1111 plants/ ha ⇔ 3 m x 3 m

⁷ 10.7° d'après le modèle NorCliS©CNPF construit à partir des données Météo France et AgroParisTech sur la période 1981-2010

⁸ 928 mm/an et 563 mm d'avril à octobre d'après le modèle NorCliS©CNPF construit à partir des données Météo France et AgroParisTech sur la période 1981-2010

Nord



1.1.1.2. Matériel végétal évalué :

- **Darrington-VG** (PME-VG-001)
- **La Luzette-VG** (PME-VG-002).
- **La Luzette-VG** (PME-VG-002) mycorhizé par *Laccaria bicolor* (souche S238N)
- **Washington2-VG** (PME-VG-005)
- **Californie-VG** (PME-VG-006)
- **France1-VG** (PME-VG-004)
- **France2-VG** (PME-VG-007)
- **France3-VG** (PME-VG-008)
- **Seed Zone 403** (matériel américain)

Remarque: tous les plants ont été produits en 1 an en godet de 600 cc par la pépinière administrative d'Aix en Provence-Les Milles, sauf les plants de Luzette-VG mycorhizés, produits racines nues par les pépinières Naudet.

3.4.4.3. Gestion appliquée

Antécédent culturel : Futaie régulière de douglas.

Travaux préparatoires : Broyage en plein 15 jours avant la plantation.

Plantation : le 23 avril 2009 par temps chaud et sec ; à la pioche. Installation de 3 piquets acacia en quinconce autour des plants du dispositif pour limiter les dégâts de gibier.

Entretiens : Aucun entretien avant l'automne 2014, soit 6 ans après plantation où les plants ont été dégagés sur la ligne à la débroussailleuse à dos et les interlignes girobroyés. Lors du passage en

mesure en décembre 2016 (H8 et C8) les opérateurs ont dégagé à la serpe un accès aux arbres, opération a été renouvelée en décembre 2020 (C12 et Hdom12).

3.4.4.4. Mesures et observations réalisées

Des observations et mesures de hauteur ont eu lieu en : avril 2009 (H0), avril 2010 (H1), avril 2011 (H2), janvier 2012 (H3), mars 2014 (H5), novembre 2015 (observation des dégâts après un été particulièrement chaud et sec sur une partie de chaque placette unitaire), décembre 2016 (H8, C8) et décembre 2020 (C12 et Hdom 12).

A chaque passage, l'état général de chaque plant était noté en mentionnant la présence de certains défauts (cime sèche, plant abrouiti, frotté ou cassé et tout autre observations jugée opportune).

En août 2015, des rougissements de rameaux ont été détectés dans les houppiers résultant - a priori - des conditions particulièrement sèches et chaudes de l'été. Pour savoir si toutes les variétés étaient impactées de la même façon, une campagne d'observations a été réalisée en novembre 2015 pour évaluer la perte foliaire de chaque individu. Plus précisément, nous avons répertorié les arbres ayant des aiguilles rouges au moment de notre passage et compté le nombre d'année d'aiguilles au niveau des branches situées entre 1,5 et 2 m de hauteur âgées de 3 voire 4 ans.

Le 10 décembre 2020 ont été mesurées les circonférences à 1,3 m de tous les arbres du dispositif (au niveau de la marque de peinture réalisée en 2016). Les hauteurs 2020 et 2019 des 58 arbres qui présentaient les plus forts diamètres en 2016 ($C130 \geq 23$ cm en 2016) ont également été mesurés à l'aide d'un vertex.

3.4.4.5. Analyses statistiques

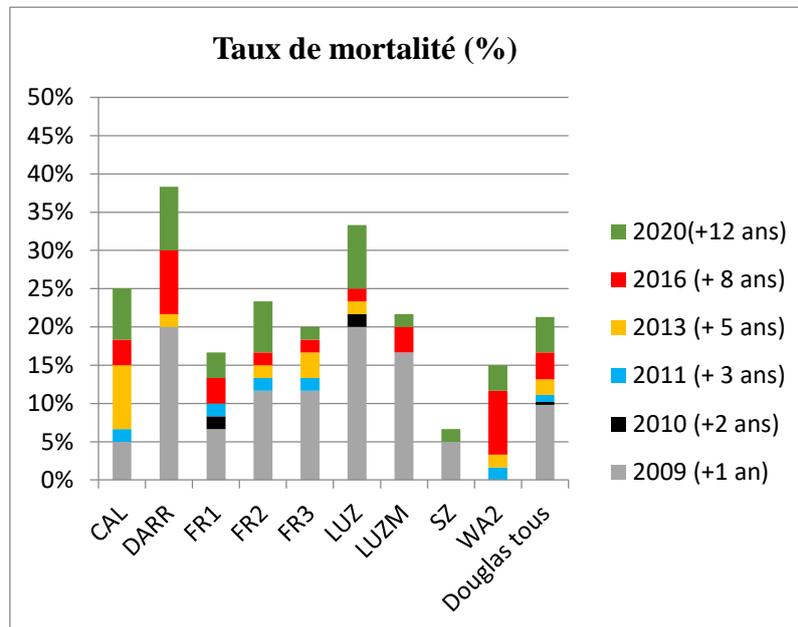
Le schéma d'installation du dispositif, sans bloc, ne permet pas un traitement statistique des données obtenues sur le site. En revanche, elles sont valorisées dans l'analyse multisite du réseau dans son ensemble.

3.4.4.6. Résultats

a) Mortalité

La création d'un chemin au milieu des placettes unitaires situées les plus à l'ouest du dispositif et la mise en place d'un mirador en bordure de ce chemin a éliminé un certain nombre de plants du dispositif expérimental des variétés Luzette mycorrizés, Darrington-VG et France1-VG. En plus de cet effet direct, cet aménagement explique certainement le taux important de blessures faite par le gibier aux plants situés aux abords, aisément accessibles. De ce fait, les taux de reprise des différentes variétés sont hétérogènes (cf. Histogrammes ci-dessous).

Fig. 35 : Evolution du taux de mortalité sur le dispositif de Pressy par variété



On remarque une médiocre reprise des plants de la variété LUZ (1 plant sur 5 n'a pas repris), installée pourtant à distance des perturbations.

Le taux de reprise global était de 90%. La mortalité a progressé les années suivantes, sachant qu'aucun dégagement n'a été réalisé avant l'automne 2014. Ainsi, on peut supposer qu'une partie de la mortalité observée est liée à la très forte concurrence exercée par les rejets de robinier dans certaines zones du dispositif.

Par ailleurs, l'été chaud et sec 2015 pourrait expliquer l'augmentation de la mortalité observée pour quasiment toutes les variétés en 2016 (sauf SZ 403), mortalité qui a continué de progresser ensuite pour atteindre 21 % en 2020.

Compte tenu des éléments décrits plus haut (création d'un chemin, concurrence des rejets de robiniers impactant inégalement les placeaux) et du type de dispositif (un seul placeau par variété), les différences de mortalité observées selon les variétés de douglas ne peuvent être imputées à des effets génétiques.

b) Dégâts foliaires apparus l'été 2015

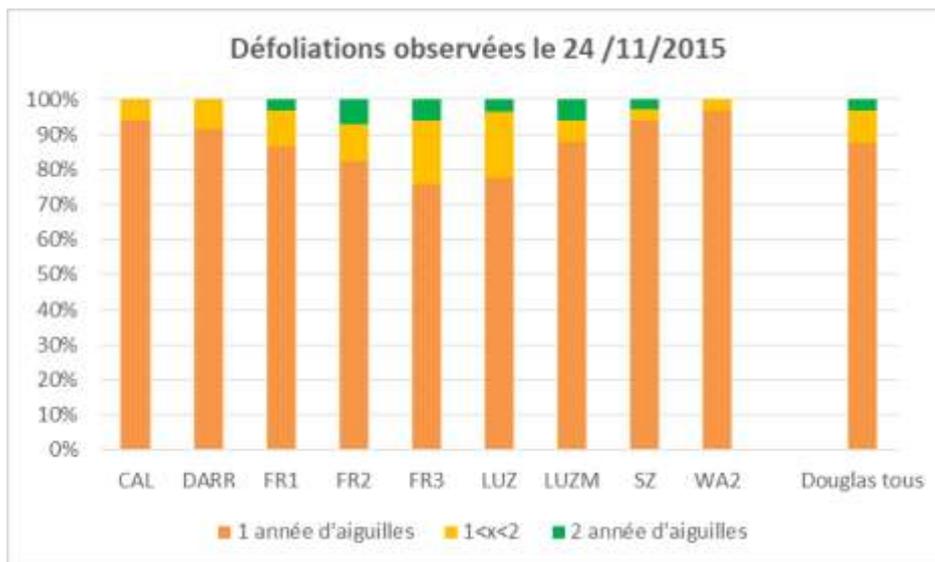
En août 2015, des rougissements ont été observés sur certains plants (cf. photo ci-dessous).

Fig. 36 : Rougissements observés sur le dispositif en août 2015 (photo : B. Borde, CRPF BFC) :



Le 24 novembre 2015, la quasi-totalité des aiguilles rouges observées en août étaient tombées et se trouvaient au pied des arbres. Les observations réalisées montrent que la majorité des plants (87 %) ne possèdent alors qu'une année d'aiguilles sur les branches âgées de 3 voire 4 ans (graphe ci-dessous).

Fig. 37 : Nombre d'années d'aiguilles en place en novembre 2015 par variété



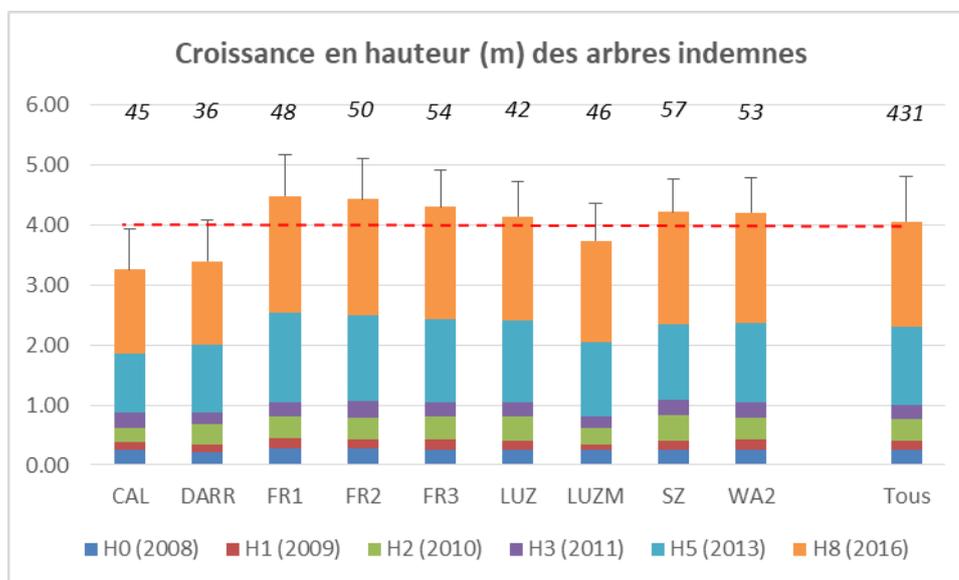
c) Etat sanitaire 12 ans après plantation

En décembre 2020, sur l'ensemble du dispositif, 2 arbres présentaient des coulures de résine, 2 autres des décollements d'écorce et 9 des dessèchements importants dans le houppier. Les effectifs étaient trop faibles pour discerner un lien entre ces observations et l'origine génétique des plants atteints.

d) Croissance en hauteur après plantation

Le graphe ci-dessous rend compte de la croissance en hauteur des différentes variétés jusqu'en 2016 c'est-à-dire durant les 8 années qui ont suivi la plantation. Seuls les plants dont la croissance s'est déroulée sans altération majeure sont pris en compte (les arbres ayant subi des frotis n'apparaissent pas dans les moyennes).

Fig. 38 : Croissance en hauteur moyenne (+ écart type) des plants indemnes d'accidents de croissance des différentes variétés sur le dispositif de Pressy. Le nombre d'arbres comptabilisés par variété est indiqué au-dessus des histogrammes



Les plants du dispositif mesuraient en moyenne 25,6 cm ($\bar{x} = 5$) à la plantation.

Les variétés DARR et CAL ont eu des accroissements plus faibles que les autres variétés dès les premières années. Huit ans après plantation, ces deux variétés atteignent 3,2 m de hauteur en moyenne, contre 4,2 m pour les autres variétés.

e) Coefficient d'élanement à 8 ans

En 2016, 8 ans après plantation, les hauteurs et les circonférences à 1,30 m de chaque arbre du dispositif ont été mesurées, ce qui a permis de calculer le coefficient d'élanement moyen de chaque variété. Il correspond au rapport entre la hauteur et le diamètre à 1,30 m.

Variétés	Effectifs	H/D8	σ
CAL	42	68.9	10.9
DARR	36	72.5	8.3
FR1	48	69.0	6.6
FR2	49	69.3	6.8
FR3	54	71.0	8.6
LUZ	39	70.1	8.9
LUZM	45	73.4	8.4
SZ	57	71.6	6.4
WA2	52	68.9	7.3
Tous	426	70.7	8.5

Fig. 39 : Rapport Hauteur / Diamètre à l'âge de 8 ans pour les différentes variétés sur le dispositif de Pressy.

Le coefficient d'élancement moyen à Pressy est de 71

f) Hauteur dominante à 12 ans

Les mesures de circonférence faites en décembre 2016 à l'âge de 8 ans, nous ont permis d'identifier les 58 plus gros arbres du dispositif soit un peu plus de 10 % de l'effectif initial. Sur ces arbres, nous avons mesuré les hauteurs atteintes en 2019 et 2020. Leur répartition par variété est présentée dans le tableau ci-dessous.

La hauteur moyenne de ces arbres est de 8,71 m ($\sigma = 0.8$). Cette valeur correspond à la hauteur dominante atteinte par les douglas 13 ans après la germination des graines et permettent d'évaluer le niveau de fertilité du site. Ainsi, d'après Angelier (2006), celui-ci se trouve en classe de fertilité 2.

Les mesures de la hauteur 2019 réalisées sur la plupart de ces arbres, permettent de préciser que la longueur moyenne des pousses mises en place au cours de la saison 2020 est de 80 cm ($\sigma = 20$).

	nombre d'arbres parmi les 10 % les plus gros du dispositif	%
CAL	1	2%
DARR	2	3%
LUZ	4	7%
LUZM	3	5%
FR1	11	19%
FR2	13	22%
FR3	12	21%
WA2	7	12%
SZ	5	9%
Toutes	58	100%

g) Croissance en circonférence 12 ans après plantation

Des mesures de circonférence à 1,30 m ont eu lieu en février 2018 soit 8 ans après plantation (C8) et en 2020, douze ans après (C12). Les résultats de ces deux campagnes de mesures figurent dans le tableau ci-après et concernent l'ensemble des arbres vivants (remarque : les cases jaunes correspondent aux valeurs les plus élevées).

Huit ans après plantation, la circonférence moyenne des arbres du dispositif était de 18,4 cm (3 cm d'écart type). Les variétés DARR et CAL avaient les plus faibles valeurs (15.4 cm en moyenne), FR1 et FR2 les plus fortes. Le différentiel était de 3,3 cm soit 18 % de croissance en moins pour la variété CAL comparativement à LUZ.

Quatre ans plus tard, la circonférence moyenne des arbres du dispositif est de 35,6 cm (6,6 cm d'écart type). Les variétés DARR et CAL avaient toujours les circonférences moyennes les plus faibles, FR1 et WA2, les plus fortes. Le différentiel entre CAL et LUZ est de 4.8 cm soit 13 %.

Fig. 40 : Circonférence moyenne à 1.30 m (écart type), nombre d'individus mesurés (n) à 8 et 12 ans et accroissement moyen sur cet intervalle sur le dispositif de Pressy

	C8 en cm (écart type)	C12 en cm (écart type)	Accroissement annuel moyen entre 2016 et 2020 en cm (écart type)	Effectif analysé
CAL	15.4 (4.78)	32.3 (7.90)	4.22 (1.08)	42
DARR	15.2 (4.33)	31.9 (6.77)	4.16 (0.75)	36
FR1	20.5 (4.32)	38.0 (6.50)	4.40 (0.80)	50
FR2	20.2 (3.86)	36.3 (6.53)	4.02 (0.94)	46
FR3	19.3 (4.06)	37.1 (5.47)	4.44 (0.58)	53
LUZ	18.8 (3.43)	37.1 (6.15)	4.58 (0.82)	39
LUZM	16.3 (3.93)	33.3 (6.53)	4.24 (0.93)	47
SZ	18.7 (3.05)	35.7 (5.27)	4.25 (0.66)	56
WA2	19.7 (3.41)	37.6 (5.37)	4.48 (0.81)	50
Tous	18.4 (3.03)	35.6 (6.56)	4.31 (0.72)	419

L'accroissement annuel moyen des quatre dernières années est de 4,3 cm toutes variétés confondues, la variété FR2 a présenté le plus faible et LUZ le plus fort.



Fig. 41 : Aperçu de la parcelle de Pressy-Sous-Dondin le 13 décembre 2016 soit 8 ans après plantation (photo S. Girard, CNPF)

3.4.5. Dispositif de Semelay, Nièvre

Le dispositif, planté en mars 2010, est situé dans une propriété gérée par la Société Forestière de la CDC, il est suivi par IRSTEA devenu INRAE. La parcelle était précédemment occupée par un beau peuplement de douglas âgés de 40 ans exploités en 2009.

3.4.5.1. Caractéristiques de la parcelle :

- | région forestière IGN : Morvan (SER G23 : Morvan et Autunois) ;
- | altitude : 313 m ;
- | orientation : S-SE, Milieu de versant, pente : 12 % ;
- | T° moy annuelle* : 11.4°C⁹ 955 mm d'eau/an dont 562 mm entre avril et octobre*
- | indice de vigilance climatique* : 3 (4 avec +1°C) (*Ref : modèle NorCliS©CNPFP construit à partir des données Météo France et AgroParisTech sur la période 1981-2010) ;
- | sol¹⁰ formé sur granite présentant 2 ou 3 horizons/sondage (moyenne de 2,5). Changements d'horizons motivés par un changement de texture, de charge en cailloux, d'intensité d'hydromorphie ou de couleur ;
- | texture LS en surface, avec enrichissement en argile dès le 2^{ème} horizon. Passage de LS à LAS à partir de 10-20 cm de profondeur. LA sur 50/80 cm de profondeur, avec une charge en cailloux assez importante au-dessous de 50 cm ;
- | profondeur prospectée : de 30 cm à 60 cm (m = 50-55 cm). Arrêts causés par la présence de cailloux (7 points) ou la sécheresse du sol (5 points) ;
- | charge en éléments grossiers (entre 2 mm et 5 cm) d'environ 10% dans les horizons décrits. Cette charge est vraisemblablement plus forte (≥ 30%) dans l'horizon sous-jacent puisque la tarière est souvent bloquée par la présence de cailloux.
- | traces d'hydromorphie rares et peu marquées (0-10%), à l'exception d'un point (n°12) où ce facteur peut être considéré comme contraignant (70% dès 20 cm de profondeur) ;
- | pH (mesuré à un seul emplacement) : 5,5

3.4.5.2. Dispositif

Dispositif « mono-arbres » composé de 96 blocs comportant chacun 1 individu de 10 variétés différentes soit un total de 960 plants suivis individuellement.

Densité : 1111 plants/ ha ⇔ 3 m x 3 m

⁹ Comme pour les autres dispositifs, il s'agit de la valeur donnée par le modèle NorCliS©CNPFP construit à partir des données Météo France et AgroParisTech sur la période 1981-2010, plus élevée que celle mentionné dans le compte rendu d'installation : 10.3°C (source non spécifiée)

¹⁰ 12 sondages à la tarière pédologique, répartis de façon homogène (1 point tous les 25 m) sur l'ensemble du dispositif, ont été réalisés par l'équipe EFNO de l'INRAE Nogent en novembre 2019. Les valeurs présentées ici sont les moyennes de ces sondages.

3.4.5.4. Gestion appliquée

Travaux préparatoires : Dessouchage à la dent Becker et andainage des rémanents au râteau (andains distants de 18 m d'axe en axe).

Plantation : les 25 et 26 mars 2010.

Entretiens : Dégagement sur la ligne Août 2010 (l'année de la plantation), l'été 2011 et novembre 2012. Dégagement en plein au tracteur avec gyrobroyeur et finition sur la ligne en novembre 2013. Dégagement au tracteur de toutes les lignes au broyeur en 2016.

3.4.5.5. Mesures et observations réalisées

Des observations et mesures de hauteur ont eu lieu en : novembre 2010 (H0 & H1), novembre 2011 (H2), novembre 2012 (H3), novembre 2013 (H4), novembre 2014 (H5), novembre 2017 (H8 & C8), décembre 2020 (C11) et décembre 2021 (H12 et C12).

A chaque passage, l'état sanitaire de chaque plant était noté.

De 2011 à 2014 le nombre d'année d'aiguilles (1, 2 ou 3) présentes sur le troisième verticille au-dessous du bourgeon apical a été noté sur tous les arbres, seuls une vingtaine d'arbres de chaque provenance a fait l'objet de la même notation en 2017. Il s'agissait d'apprécier d'éventuelles pertes d'aiguilles et indirectement l'indice foliaire des arbres. En novembre 2017, la qualité de la branchaison (angle d'insertion des branches et densité de branches) des arbres de plus de 2,50m de haut a été notée

3.4.5.6. Analyses statistiques

« Les proportions (pourcentages) ont été analysées à l'aide du test de Khi² ou de Kruskal-Wallis.

Les variables continues ont été traitées par analyse de variance à deux facteurs (provenances et bloc) sur les données individuelles, sans interaction, puis comparaison des moyennes à l'aide du test de Tukey. Des transformations de variables ont été effectuées pour satisfaire au mieux les conditions de normalité et d'égalité des variances. ». Source : G. Philippe, 2018.

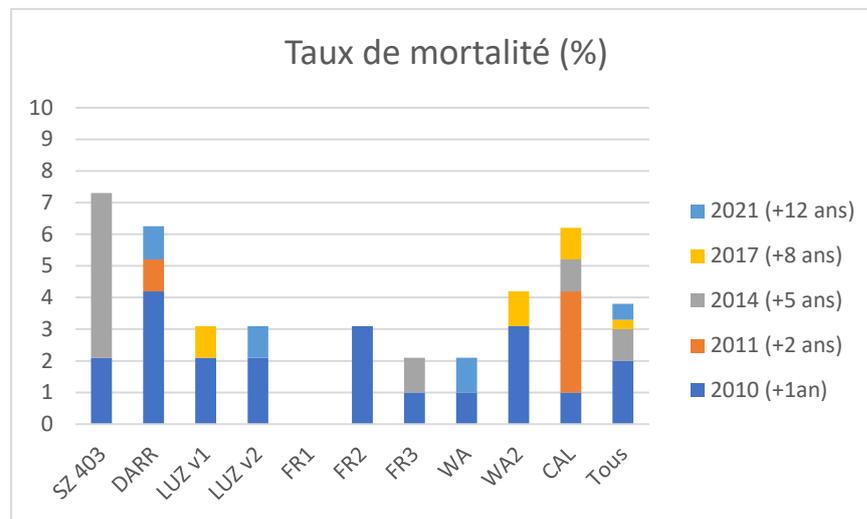
3.4.5.7. Résultats

a) Mortalité

Le taux de reprise était très bon sur l'ensemble du dispositif puisque seulement 20 plants étaient morts après la première saison de végétation. Aucune différence n'apparaissait entre variété. En revanche, la plupart des plants morts avaient été exposés aux fortes chaleurs en pépinière en 2009 (Source G. Philippe, p22, rapport 2011).

Les années suivantes, très peu de mortalité supplémentaire a été enregistrée (Fig. ci-dessous).

Fig. 42 : Evolution du taux de mortalité des variétés après plantation sur le site de Sémelay



Ainsi, en 2021, douze ans après plantation, plus de 96 % des plants plantés en 2010 étaient présents. Le taux de mortalité en 2021 varie de 0 à 7 % selon les provenances sans que les différences soient statistiquement significatives.

b) Etat sanitaire :

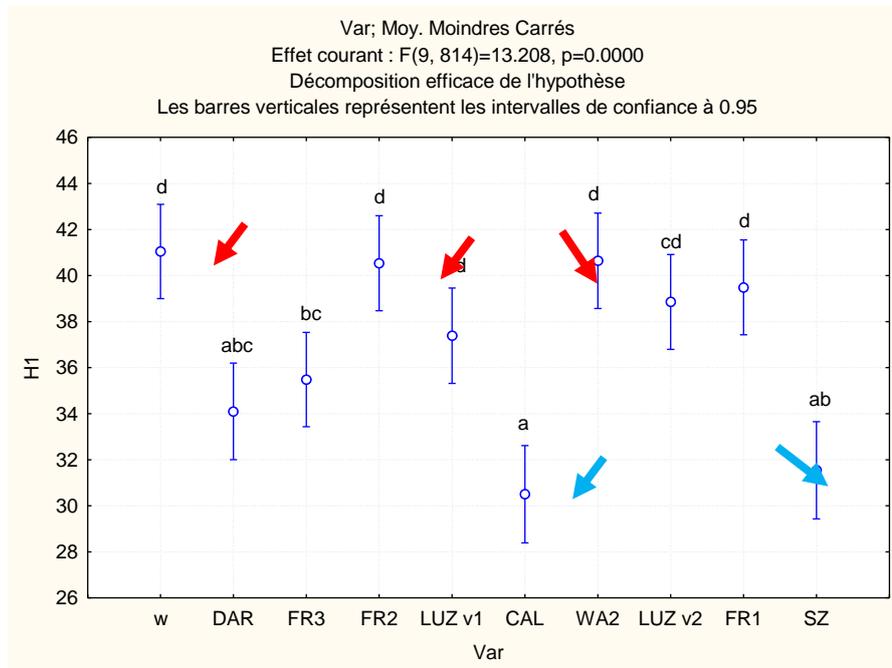
Attaques d'hylobes

Une attaque d'hylobes a eu lieu dans les mois qui ont suivi la plantation mais de faible intensité ce qui n'a engendré aucune perte et des dégâts modérés sur 68 plants (soit 7 % de l'effectif).

L'année suivante, en 2011, une nouvelle attaque a eu lieu à la fin de l'été et concernait 32 % des plants vivants. Les dégâts étaient répartis de façon relativement homogène dans le dispositif et, compte tenu du schéma du dispositif, il a été possible de faire une analyse statistique montrant que les variétés CAL et SZ403 étaient les moins touchées alors que FR2, LUZv2, WA2 présentaient la plus forte proportion de dégâts.

Les variétés les moins touchées sont celles qui présentaient les plants les plus petits au moment de l'attaque de l'automne (cf. graphe suivant) et les accroissements les plus faibles. On peut supposer que les attaques ne s'effectuent pas complètement au hasard mais qu'elles sont dirigées vers les individus les plus vigoureux ($r=0.82^{**}$ entre hauteur et taux de dégâts des provenances).

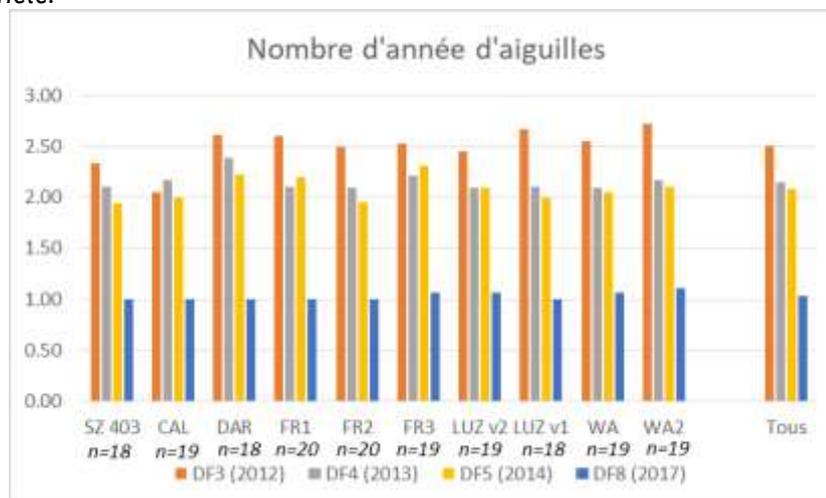
Fig. 43 : Hauteurs moyennes ajustées des différentes variétés en fin de saison 2011, un an après plantation (+/- intervalle de confiance). Les flèches bleues indiquent les variétés les moins touchées par des dégâts d'hylobes et les rouges, les plus touchées.



Indices foliaires

De 2011 à 2014, sur une vingtaine d'arbres de chaque provenance, le nombre d'année d'aiguilles présents sur le troisième verticille au-dessous du bourgeon apical (puis sur un verticille compris entre 1.30 et 2.30 m de hauteur) a été compté. Il s'agit d'une appréciation indirecte de l'indice foliaire des arbres. En 2017, la plupart des arbres n'avaient plus qu'une année d'aiguille. Les histogrammes ci-dessous montrent une nette réduction du nombre d'années d'aiguilles présentes sur les arbres entre 2014 et 2017.

Fig. 44 : Evolution de 2012 à 2017 du nombre moyen d'années d'aiguilles d'un sous-échantillon d'arbres de chaque variété.



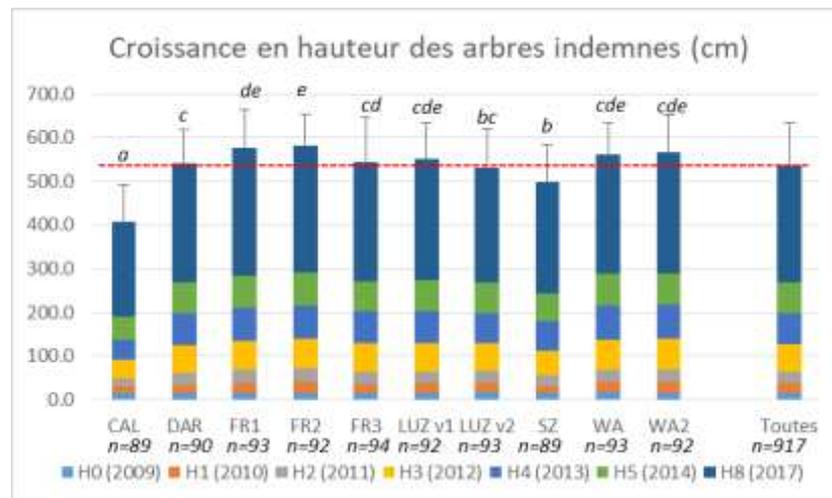
Cette variable et son évolution permettent de rendre compte de l'aspect clairsemé des houppiers en 2017, huit ans après plantation, aspect que le gestionnaire attribuait à un manque d'eau.

En décembre 2020, lors des mesures de circonférences réalisées par le CNPF, une quinzaine d'individus présentaient des symptômes similaires à ceux observés dans le dispositif de Dettey : des coulures de résines, décollements d'écorce ou de très fortes descentes de cimes.

c) Croissance en hauteur après plantation

Les plants du dispositif n'ont pas été mesurés à la plantation mais leur hauteur initiale a été notée après développement de la pousse de la première année. Ces valeurs conduisent à une hauteur initiale moyenne de 15,6 cm ($\bar{x} = 4$) toutes variétés confondues.

Fig. 45 : Croissance en hauteur moyenne (+ écart type) des plants indemnes d'accidents de croissance des différentes variétés sur le dispositif de Sémelay. Le nombre d'arbres comptabilisés par variété est indiqué au-dessous des histogrammes ($n=x$). Les moyennes accompagnées d'une lettre identique ne sont pas statistiquement différentes.



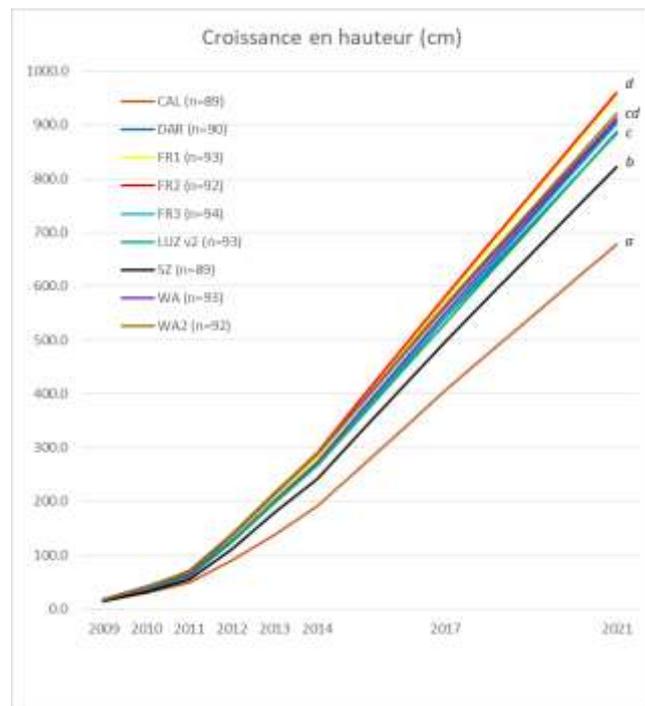
La variété CAL a eu des accroissements plus faibles que les autres variétés dès les premières années. Les histogrammes ci-contre rendent compte de la croissance en hauteur moyenne des différentes variétés jusqu'en 2017 c'est-à-dire durant les 8 années qui ont suivi la plantation.

Sur l'ensemble du dispositif, les arbres atteignent en moyenne 5,37 m ($\bar{x}=0,97$) à 8 ans. La variété CAL présente les plants les plus petits, inférieurs d'environ 1 mètre en moyenne à ceux de SZ et de 1,3 m à la variété Luzette actuellement commercialisée. Les autres variétés sont significativement plus grandes, en particulier FR1, FR2, WA et WA2.

L'ensemble des arbres vivants ayant été mesurés jusqu'à l'âge de 12 ans, il est possible de représenter les courbes de croissance de chaque variété (ci-contre) :

Fig. 46 : Courbes de croissance en hauteur moyenne des différentes variétés sur le dispositif de Sémelay.

La variété CAL croît plus lentement en hauteur que les autres et atteint en moyenne 6,8 m 12 ans après plantation ($\bar{x}=1,6$), contre 9,5 m ($\bar{x}=1$) pour les plus vigoureuses : FR1 et FR2.



d) Coefficients d'élanement à 8 ans

En 2017, les hauteurs et les circonférences à 1,30 m de chaque arbre du dispositif ont été mesurées, ce qui a permis de calculer le coefficient d'élanement moyen de chaque variété. Il correspond au rapport entre la hauteur et le diamètre à 1.30 m. Les valeurs portées dans le tableau sont corrigées de l'effet bloc (Philippe, 2018).

	H/D8 (2017)	
WA	67.9	a
FR2	68.6	ab
LUZ v1	68.6	ab
LUZ v2	68.6	ab
WA2	69.4	ab
FR1	70.8	abc
FR3	71.0	abc
DAR	71.5	abc
SZ	72.7	bc
CAL	74.1	c
Toutes	70.2	

Fig. 47 : Coefficient d'élanement (Hauteur/ diamètre) par variété sur le dispositif de Sémelay.

Le coefficient d'élanement est de 70 en moyenne à 8 ans, le plus faible étant obtenu pour la variété WA, le plus fort pour CAL. Ce dernier point est en contradiction avec les résultats obtenus sur les 3 précédents dispositifs où CAL était la variété la plus trapue avec les coefficients d'élanement les plus bas. En ajoutant la circonférence dans le modèle, G. Philipe (2019) obtient un classement différent : Californie se distingue des autres provenances par un port plus trapu (H/D ajusté de 64). A l'inverse, les représentants de FR1 se caractérisent par un port filiforme (H/D ajusté de 73).

e) Hauteur dominante à 12 ans

Les mesures de circonférence faites à l'âge de 8 ans, nous ont permis d'identifier les 108 plus gros arbres du dispositif – soit un peu plus de 10% de l'effectif initial- dont la circonférence était supérieure ou égale à 32 cm. Les hauteurs atteintes par ces arbres en 2021 ont permis d'estimer la hauteur dominante du dispositif.

Leur répartition par variété est présentée dans le tableau ci-dessous.

Quatre ans plus tard, la circonférence moyenne de la variété CAL avait augmenté de 2,8 cm/an et atteignait 29,5 cm. La circonférence de la variété LUZv2 avait quant à elle augmenté de 4,25 cm/an et atteignait quasiment 42 cm. Le classement des variétés n'avait pas évolué.

3.4.6. Dispositif de Saulieu, Côte d'Or

Le dispositif, planté en mars 2011, est situé en forêt domaniale de Saulieu. La parcelle était précédemment occupée par une futaie régulière de sapin pectiné, très fortement mitée à la tempête de 1999 et endommagée par la canicule de 2003.

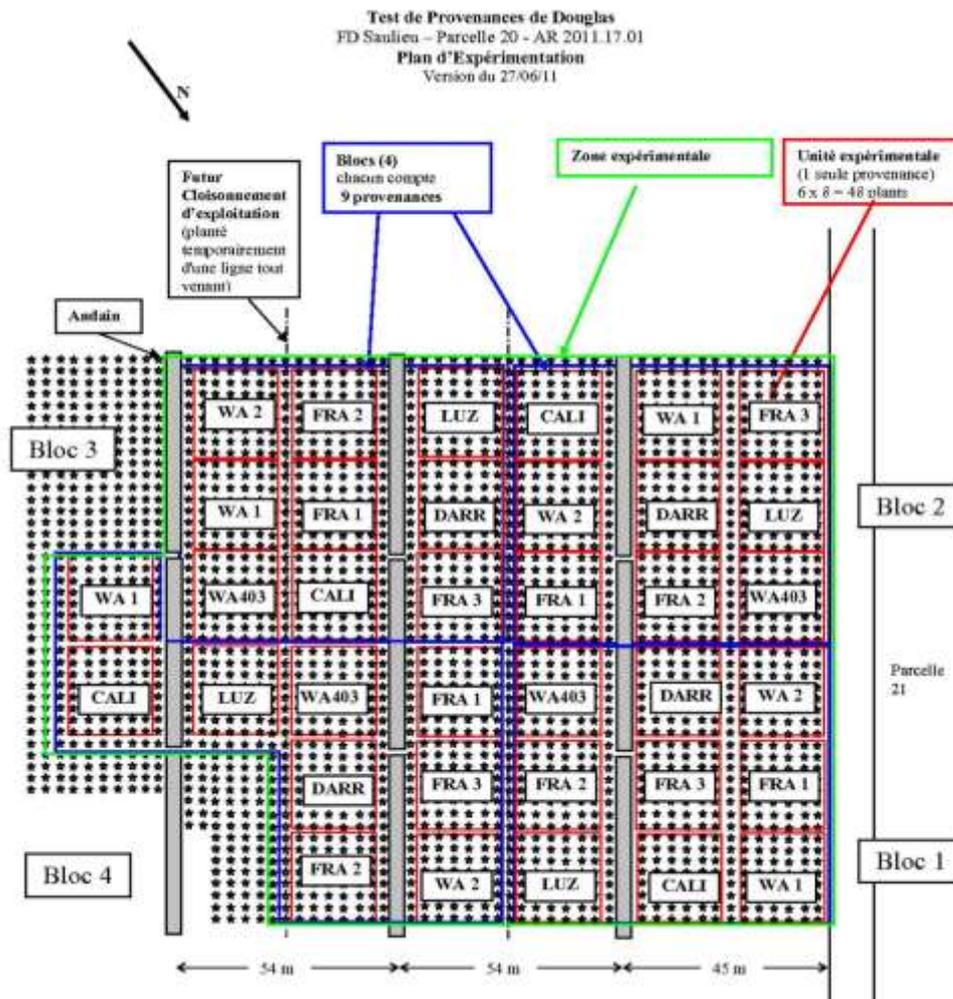
3.4.6.1. Caractéristiques de la parcelle

- | Région forestière IGN : Morvan (SER G23 : Morvan et Autunois) ;
- | Altitude : 580 m ;
- | Orientation : aucune, plateau, pente : 1% ;
- | T° moy annuelle* : 9.9°C* ;
- | 1059 mm d'eau/an dont 584 mm entre Avril et Octobre* ;
- | indice de vigilance climatique* : 2 (3 avec +1°C) (*Ref : modèle NorCliS©CNPF construit à partir des données Météo France et AgroParisTech sur la période 1981-2010) ;
- | sol brun acide profond (+80cm) formé sur granite à deux micas. Texture LAS sur les 50/60 premiers cm puis AS sur 10 cm, avec une charge en cailloux assez importante au-dessous de 80 cm.

3.4.6.2. Dispositif

Dispositif : 9 variétés x 4 blocs comportant chacun 48 individus de chaque variété soit un total de 1 728 plants suivis individuellement.

Densité : 1111 plants/ ha ⇔ 3 m x 3 m



3.4.6.3. Matériel végétal évalué

- **Darrington-VG** (PME-VG-001), récolte 2008
- **La Luzette-VG** (PME-VG-002), récolte 2007, après éclaircie du verger initial => LUZ
- **Washington-VG** (PME-VG-005), récolte 2008
- **Washington2-VG** (PME-VG-005), récolte 2007
- **Californie-VG** (PME-VG-006), récolte expérimentale de 2007
- **France1-VG** (PME-VG-004), récolte 2007
- **France2-VG** (PME-VG-007), récolte 2007
- **France3-VG** (PME-VG-008), récolte 2007
- **Seed Zone 403** (matériel américain), mélange de millésimes

Remarque : tous les plants ont été produits en 2 ans en godet WM de 600 cc par la pépinière administrative d'Aix en Provence-Les Milles.

3.4.6.4. Gestion appliquée

Travaux préparatoires : Dessouchage puis mise en andain des rémanents à la pelle mécanique (andains distants de 48 m d'axe en axe).

Plantation : les 28 et 29 mars 2011. Retassement généralisé au pied des plants en mai 2012 suite au déchaussement hivernal et traitement en plein contre l'hylobe. Pose de protections individuelles contre le gibier en octobre et novembre 2012.

Entretiens : Dégagement des lignes de plantation en sept 2011, sept 2012, octobre 2013, 2017, 2019 Novembre 2015 et février 2016 : défouillage sous 1,30 m de 413 plants (soit 26 % de l'effectif vivant), défaut lié à un orage de grêle survenu en août 2012.

3.4.6.5. Mesures et observations réalisées

Des observations et mesures de hauteur ont eu lieu en : octobre 2011 (H0 & H1), novembre 2012 (H2), novembre 2015 et février 2016 (H5), décembre 2018 (H8 & C8). A noter que les modalités WA du bloc 3 et LUZ du bloc 4 n'ont pas été mesurées en 2018.

Par ailleurs, en novembre 2013 et février 2015, des notations d'état sanitaire de tous les plants ont été réalisées et au printemps 2017, des observations de rouge physiologique.

3.4.6.6. Analyses statistiques (source : D. François, rapport 2019)

« Les proportions (pourcentages) ont été analysées par analyse de variance à deux facteurs (provenance + bloc) sans interaction sur les valeurs moyennes par parcelle unitaire à l'aide du teste de Newman-Keuls.

Les variables continues ont été analysées par analyse de variance à deux facteurs (provenance + bloc) sans interaction sur les valeurs moyennes par parcelle unitaire à l'aide du teste de Newman-Keuls. Des transformations de variables ont été effectuées pour satisfaire au mieux les conditions de normalité et d'égalité des variances. »

3.4.6.7. Résultats

a) Mortalité

Seulement 33 plants avaient disparu après la première saison de végétation dont 6 arrachés par malveillance ; le taux de reprise des plants s'élevait à 98 % sur l'ensemble du dispositif. Les années suivantes, la mortalité de l'ensemble des variétés a légèrement augmenté pour atteindre, en 2018, un taux global de 10.7 %.

	2011	2012	2013	2014	2015	2018
CAL	3.6	7.8	12	13	14.1	21.9
DARR	4.2	6.3	6.8	7.8	8.3	12
FR1	0.5	1.6	2.1	3.1	3.1	4.7
FR2	1	4.2	6.3	8.3	8.9	11.5
FR3	1	4.2	5.7	7.8	8.3	7.8
LUZ	0	2.1	3.1	3.1	3.6	3.6
WA	2.6	3.6	4.2	5.7	6.8	7.8
WA2	1	2.6	4.7	5.7	8.3	8.3
SZ403	2.6	5.9	7.8	10.4	10.4	7.3
Toutes	1.9	4.2	6	7.2	8	10.7
Effet Variété :	*	(*)	NS	NS	NS	NS
Effet bloc :	NS	(*)	NS	NS	(*)	*

Fig. 50 : Evolution de la mortalité (%) sur l'ensemble du dispositif de Saulieu. Les effets statistiquement significatifs mis en évidence par l'ANOVA sont mentionnés sur les dernières lignes : (*) indique que l'effet est significatif au seuil de 10%, *, au seuil de 5%.

L'analyse statistique ne montre pas de différence de taux de mortalité entre les 9 provenances testées.

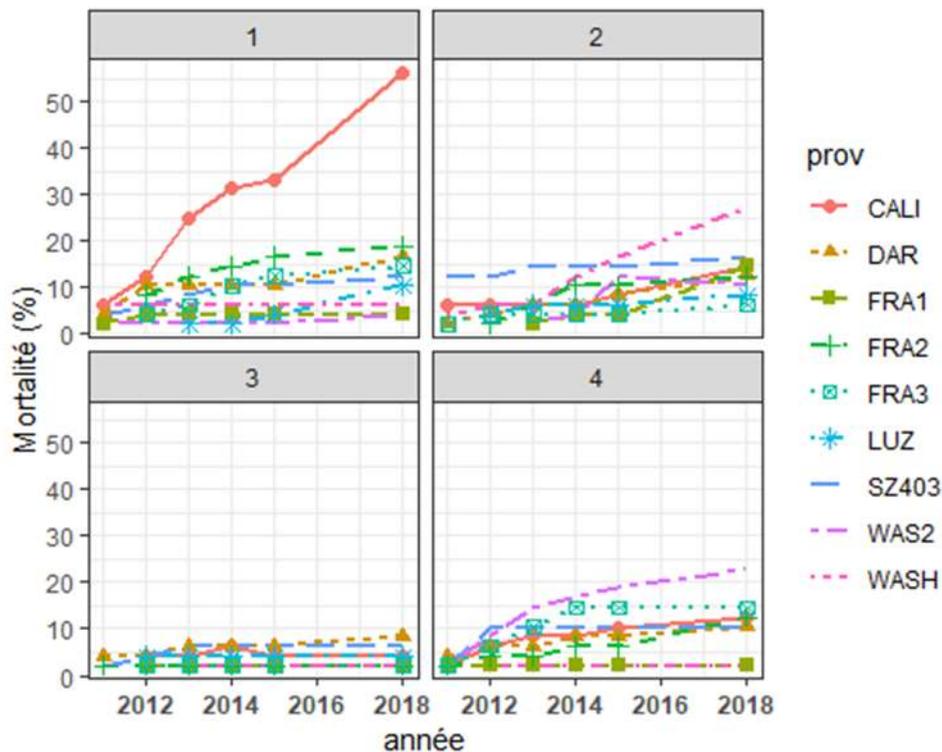
Néanmoins, un effet bloc apparaît à partir de 2015 : le bloc 1 présentant une mortalité supérieure à celle observées dans le bloc 3, en raison d'une mortalité très importante dans la variété CAL (27

sur 48 plants installés soit 56%).

Fig. 51 : Mortalité globale enregistrée 8 ans après plantation sur les différents blocs :

Bloc 1	16.0%	a
Bloc 2	13.7%	ab
Bloc 4	9.7%	ab
Bloc 3	3.5%	c

Fig. 52 : Mortalité de chaque variété dans les différents blocs 8 ans après plantation. (Source : F. Didier, 2019) :



b) Etat sanitaire :

Gibier

Les frottis liés au gibier ont touché presque 15 % des plants du dispositif en 2013, 3 ans après plantation (n=255). Les plants de la variété CAL, plus petits que les autres ont particulièrement souffert.

Attaques d'hylobes

Le dispositif n'a pas subi de grosse attaque d'hylobes, néanmoins, fin 2011, des morsures ont été observées sur 72 plants. L'analyse statistique n'a mis en évidence aucun effet de l'origine génétique des plants mais un effet bloc, le bloc 3 accueillant 60 % des plants attaqués. L'année suivante, le 11 mai 2012, un traitement en plein contre l'hylobe (Forester®) était réalisé. En octobre 2012, 38 plants portaient des morsures.

Rouge physiologique

Durant l'hiver 2016/17, des colorations anormales sont apparues, symptômes du « rouge physiologique ». Une campagne de notation a eu lieu le 6 mars 2017 en précisant si les plants étaient entièrement rouge (note 3), partiellement rouge (note 2), jaune (note 1) ou vert (note 0). Plus de la

moitié des plants du dispositif (51,7%) étaient tout ou partiellement rouges. La répartition par variété et bloc est donnée dans le tableau ci-dessous :

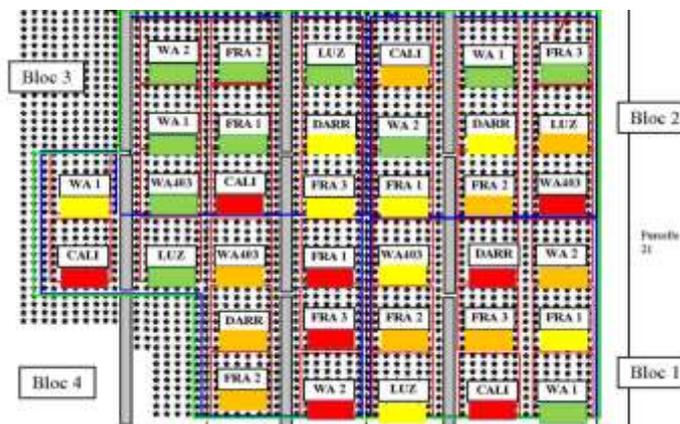
Fig. 53 : Importance du rougissement en mars 2017 par variété et bloc dans le dispositif de Saulieu

	Bloc1	Bloc2	Bloc3	Bloc4	Tous
CAL	93.5	65.1	97.8	95.3	87.7
DARR	88.1	39.5	28.9	61.4	54
FR1	37	32.6	17	83	42.5
FR2	67.5	58.1	12.8	71.1	51.4
FR3	66.7	20	48.9	80.5	53.1
LUZ	46.7	64.4	19.6	16.7	36.4
WA	16.7	0	4.3	27.7	12.9
WA2	57.4	9.5	0	86.8	36.6
SZ403	41.9	77.5	24.4	65.1	51.5
Toutes	56.2	47.7	35.6	68.4	51.7

Pour faciliter la lecture, nous avons utilisé un code couleur: rouge : plus des $\frac{3}{4}$ des plants sont touchés, orange : de 50 et 75 % des plants sont touchés, jaune : de 25 et 50 % des plants sont touchés vert : moins d'un quart des plants est touché.

Ce code a également été utilisé sur le plan ci-dessous pour localiser le phénomène.

Fig. 54 : Localisation des rougissements en mars 2017 dans le dispositif de Saulieu :



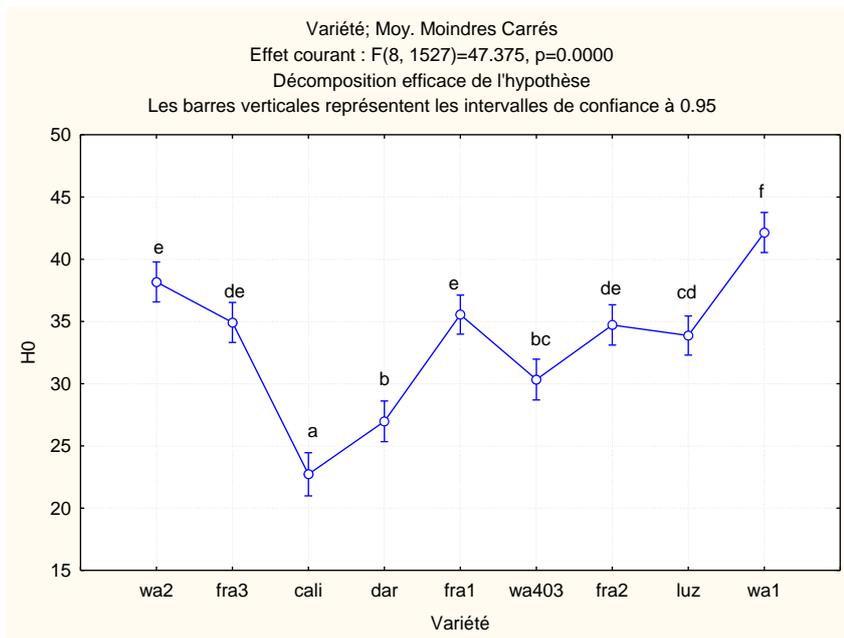
L'analyse statistique réalisée (F. Didier, 2019) montre que la variété CAL était significativement plus touchée que les autres avec 88 % de plants partiellement ou entièrement rouges et que le bloc 3 présentait le moins de symptômes, tandis que les blocs 4 et 1 étaient plus fortement atteints.

Deux ans plus tard, plus aucun plant n'était rouge. Par ailleurs, aucun lien n'a été mis en évidence entre rougissement et la mortalité survenue après l'évènement, notamment pour la variété CAL du bloc 1 où la mortalité a fortement augmenté durant cette période (F. Didier, 2019).

c) Croissance en hauteur après plantation

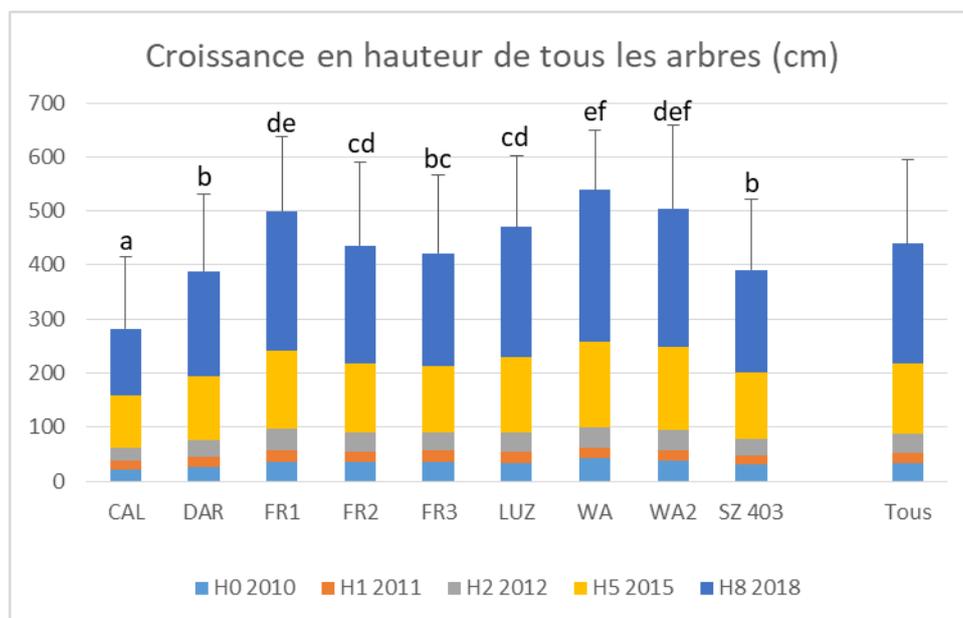
Les plants du dispositif n'ont pas été mesurés à la plantation mais leur hauteur initiale a été notée après développement de la pousse de la première année. Tous les plants n'avaient pas les mêmes dimensions au moment de leur plantation et différaient significativement selon les variétés : les plants de WA étaient les plus grands (moy=41,8 cm, $\sigma=11,7$), supérieurs en taille à ceux de LUZ, SZ 403 et CAL, ces derniers étant les plus petits (moy=22,5 cm, $\sigma=8,2$).

Figure 55: Hauteurs initiales moyennes des différentes variétés dans le dispositif de Saulieu



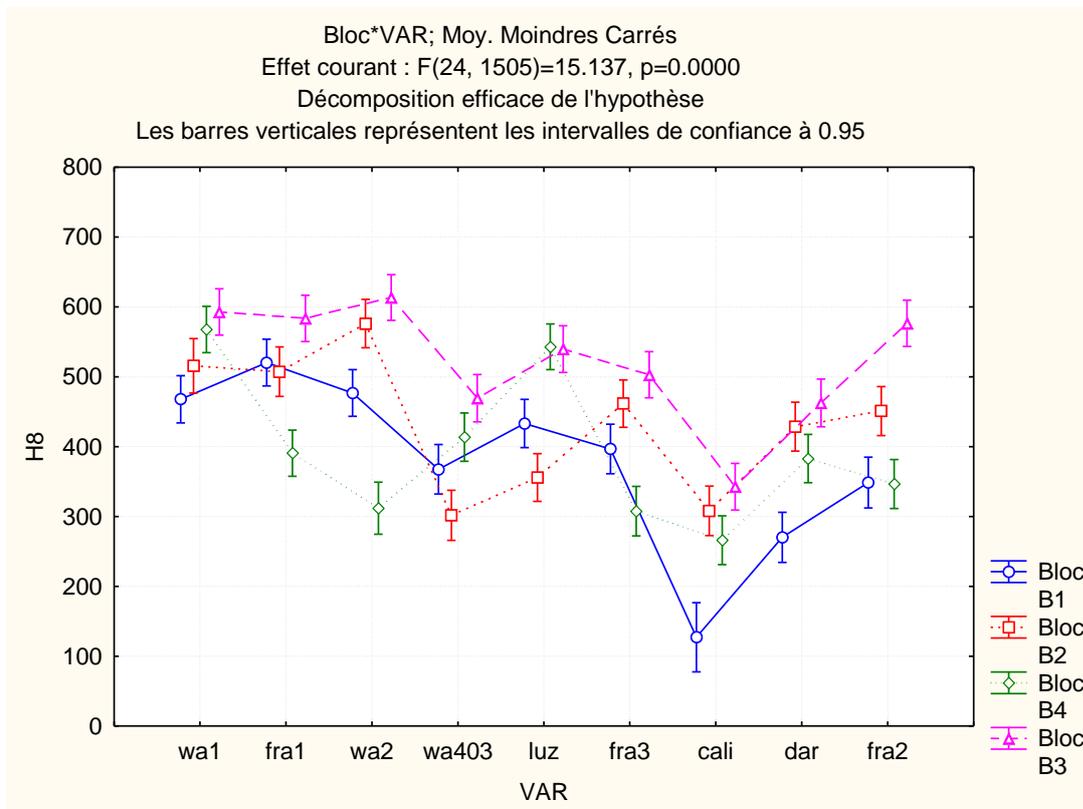
A cette différence entre provenance, se juxtapose dès la plantation, un effet bloc (fig. ci-dessus) : qui va perdurer jusqu'à la dernière analyse concernant les hauteurs à 8 ans.

Figure 56: Croissance en hauteur jusqu'à l'âge de 8 ans des différentes variétés dans le dispositif de Saulieu. Les barres correspondent aux écarts types et les lettres aux groupes homogènes au plan statistique (ANOVA 2 facteurs suivie de tests de Tuckey).



Huit ans après plantation, la hauteur moyenne des arbres est de 4,4 m ($\sigma = 1,5$). La variété CAL présente la hauteur moyenne la plus faible (2,8 m, $\sigma = 1,3$) soit 1 m de moins que SZ 403 et DARR et 1.90 m de moins que LUZ. La variété WA affiche les hauteurs les plus grandes (5,4 m, $\sigma = 1.1$).

Figure 57: Hauteurs moyennes ajustées des différentes variétés par bloc dans le dispositif de Saulieu



Les plants situés dans le bloc 3 sont plus grands qu'ailleurs, ceci peut s'expliquer par l'abri constitué par le peuplement adulte situé en bordure sud du dispositif, qui pourrait « tamponner » les contraintes climatiques telle la sécheresse, les fortes chaleur et le gel. Cet effet est probablement combiné à un effet stationnel car le bloc 2, qui bénéficie également de l'abri de ce peuplement, ne présente pas un accroissement du même ordre.

d) Circonférence à 8 ans

En 2018, la quasi-totalité des plants avaient dépassé 1,30 m de hauteur, ce qui a permis de mesurer leur circonférence à ce niveau. La circonférence moyenne sur le dispositif était de 20 cm ($\sigma = 7,4$).

Comme pour la hauteur, l'ANOVA met en évidence des effets Variétés, Blocs et des interactions entre blocs. Les résultats sont portés dans le tableau ci-contre. Comme pour la hauteur, CAL présente les circonférences les plus faibles et WA les plus fortes:

	C 130 (cm)	n
WA	23.5 a	173
FR1	22.3 a	179
WA2	21.2 a	169
LUZ	21.1 a	173
FR2	19.5 ab	157
FR3	18.7 ab	161
SZ 403	17.4 ab	159
DAR	17.4 ab	154
CAL	13.2 b	113
Toutes	20	1438

e) Coefficients d'élancement à 8 ans

Le coefficient d'élancement moyen de chaque variété a été calculé à l'âge de 8 ans sur les plants. Il est de 77,5 en moyenne à 8 ans, le plus faible étant obtenu pour la variété LUZ, le plus fort pour CAL.

DARR	75.09408	137
WA2	74.53720	155
FR3	74.78245	147
FR2	74.47826	148
SZ403	73.56890	145
WA	73.33041	167
LUZ	72.67341	168
FR1	72.30856	167
CAL	71.19338	89

3.4.7. Dispositif des Battées, Sully, Saône et Loire

Le dispositif, planté en avril 2012, est situé en forêt domaniale des Battées sur la commune de Sully. La parcelle était précédemment occupée par un taillis sous futaie ruiné de chêne sessile ($G < 7 \text{ m}^2/\text{ha}$) à gros bois et bois moyens dominants.

3.4.7.1. Caractéristiques de la parcelle :

- | région forestière IGN : plaine morvandelle (SER C20 : Plateaux calcaires du Nord-Est) ;
- | Altitude : 510 m ;
- | Orientation : aucune, milieu de versant, pente : 1% ;
- | T° moy annuelle* : 9.9°C*
- | 912 mm d'eau/an dont 516 mm entre Avril et Octobre* ;
- | indice de vigilance climatique* : 3 (4 avec +1°C) (*Ref : modèle NorCliS©CNPF construit à partir des données Météo France et AgroParisTech sur la période 1981-2010) ;
- | sol brun acide moyennement profond (entre 50 et 80cm) formé sur arène de schistes, grès, arkoses et conglomérats du Stephanien. Texture LS évoluant vers LSA puis SAL à humus de type mull oligotrophe à mull-moder ;
- | station de type « Hêtraie chênaie sessiliflore acidiphile sur sol d'épaisseur moyenne à forte de plateau »¹² ;
- | fertilité faible à moyenne (Réserve utile moyenne et sol pauvre en éléments minéraux) ;
- | facteurs limitants : acidité assez forte et nombre de jours de gel important.

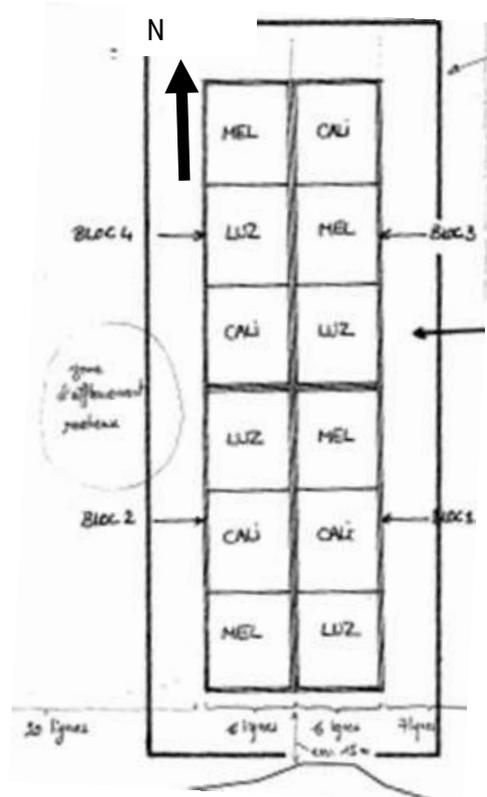
3.4.7.2. Dispositif

Le dispositif est une comparaison de 2 variétés : La Luzette-VG (dans sa version non éclaircie qui n'est plus disponible depuis 2008 en pépinière) et Californie-VG, installées selon 2 modalités différentes : en plein et en mélange pied à pied. Il s'agit d'un réplica d'un essai installé au printemps 2009 aux Barres (45).

Dispositif : (2 variétés en plein + mélange pied à pied des 2 variétés) x 4 blocs comportant chacun 42 individus de chaque variété soit un total de 504 plants suivis individuellement.

Densité : 1111 plants/ ha \Leftrightarrow 3 m x 3 m

¹² Type 1420 du Catalogue des types de stations forestières des annexes du Morvan, Université de Bourgogne, 1994.



3.4.7.3. Matériel végétal évalué

- **La Luzette-VG** (PME-VG-002), récolte 2004 dans le verger non éclairci => LUZv1
- **Californie-VG** (PME-VG-006), récolte commerciale de 2007 => CAL

Rq tous les plants ont été produits en 2 ans (et non 1 an comme dans les autres dispositifs du réseau) en godet de 600 cc par la pépinière administrative d'Aix en Provence-Les Milles.

3.4.7.4. Gestion appliquée

Antécédent culturel : taillis sous futaie de chêne sessile ($G < 7 \text{ m}^2/\text{ha}$) à Gros Bois et Bois Moyens dominants.

Exploitation : hiver 2011/12.

Travaux préparatoires : andainage des rémanents (souches feuillues laissées en place) puis broyage des andains (broyeur à axe horizontal).

Plantation : à la pioche, le 11 avril 2012. Conditions climatiques favorables (pluies fortes la veille et la semaine suivante). Mise en place de protections individuelles contre le gibier l'automne 2012

Dégagements : en juin 2013, juin/juillet 2014, Septembre 2014,

3.4.7.5. Mesures et observations réalisées

Des observations et mesures de hauteur ont eu lieu en : octobre 2012 (H0 et H1), octobre 2013 (H2), novembre 2014 (H3), mars 2017 (H5), février 2020 (H8 & C8). En mars 2017, le nombre d'année d'aiguilles a été compté.

Analyses statistiques (Source : D. François, rapport 2013)

Les proportions (pourcentages) ont été analysées par analyse de variance à deux facteurs (provenance + bloc) sans interaction sur les valeurs moyennes par parcelle unitaire.

Les variables continues ont été analysées par analyse de variance à deux facteurs (provenance + bloc considérées respectivement comme fixe et aléatoire) sans interaction sur les valeurs moyennes par parcelle unitaire à l'aide du teste de Newman-Keuls. Des transformations de variables ont été effectuées pour satisfaire au mieux les conditions de normalité et d'égalité des variances.

3.4.7.6. Résultats

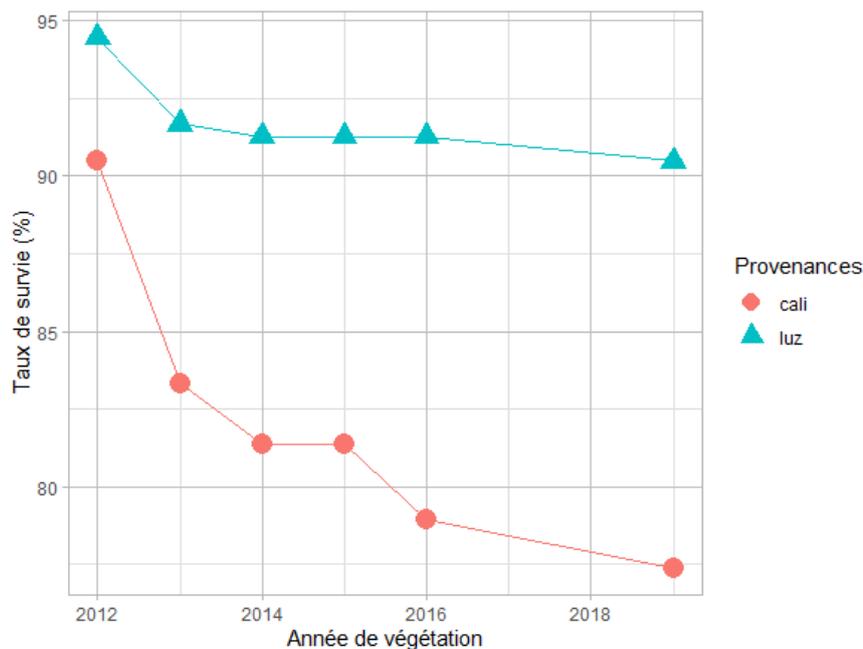
a) Mortalité

Juste après plantation, le 17 mai 2012, l'essai a été fortement impacté par des gels printaniers. Près de la moitié des plants du dispositif était touchée, en particulier la variété CAL (65 % contre 31 % pour LUZv1). Cet épisode n'a pas affecté le taux de reprise qui, fin 2012, était de 90 %.

A partir de 2014 soit 3 ans après plantation, on note un taux de mortalité de la variété CAL plus élevé dans le bloc 3 que dans les autres (interaction variété x bloc) sans explication simple, la concurrence n'y étant pas plus importante que dans les autres blocs.

Les années suivantes, malgré un taux de mortalité un peu plus élevé pour CAL, aucune différence n'a été statistiquement mise en évidence entre les deux variétés (Fig. ci-dessous).

Fig. 58 : Evolution du taux de survie pour les modalités en plein (n=504 pour chaque modalité)

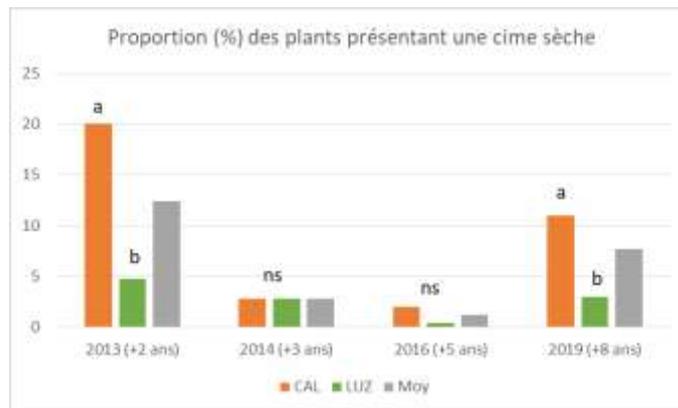


Huit ans après plantation, le taux de survie s'établit en moyenne à 84 % toutes provenances confondues : 77% pour CAL et 90 % pour LUZv1, différence non significative au plan statistique.

b) Etat sanitaire

Au cours des différentes campagnes d'observations et de mesures, les plants vivants étaient en bonne santé. La proportion d'entre eux présentant des cimes sèches était faible en 2014 et 2016 (1.4 et 1.2% respectivement) et identique pour les deux variétés. En revanche, en 2013 et 2019, cette proportion était plus élevée, en particulier pour CAL.

Fig. 59 : Proportion (%) des plants présentant une cime sèche



Les dégâts de gibier ont concerné moins de 5 % des plants toutes variétés confondues. Les analyses statistiques ne mettent pas en évidence de différence entre LUZv1 et CAL.

c) Croissance en hauteur après plantation

A la plantation, les plants mesuraient en moyenne 21 cm de hauteur quelle que soit la variété considérée (\bar{x} = 9).

Fig. 60 : Croissance en hauteur moyenne (\pm écart type) des plants indemnes d'accidents de croissance des différentes variétés sur le dispositif de Saulieu. Le nombre d'arbres comptabilisés par variété est indiqué au-dessous des histogrammes (n=x).

Huit ans après, les 422 douglas vivants du dispositif mesurent en moyenne 3,88 m (\bar{x} = 1.3). Le graphe ci-contre rend compte de la croissance des plants n'ayant subi aucun accident (blessures de gibier notamment) qualifiés d'« indemnes ».

Les analyses statistiques montrent un effet très significatif de la variété sur la hauteur des plants à 8 ans et, dans une moindre mesure, de la modalité d'installation (variété seule ou en mélange) (cf. tableau ci-après).

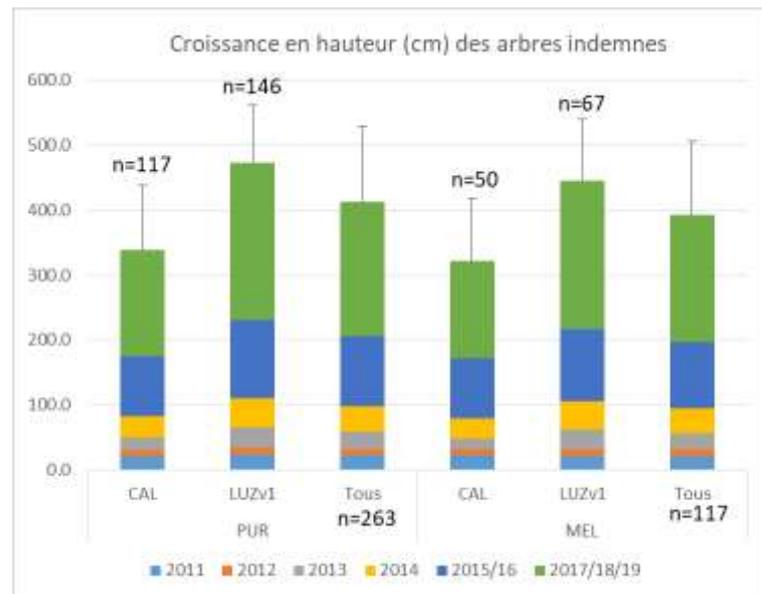


Fig. 61 : Résultats de l'ANOVA sur la hauteur à 8 ans des arbres indemnes (Effet statistique significatif au seuil de (*) 10 %, * 5%, ** 1% ou *** 1‰)

	H8
Effet Modalité (Mélange ou Pur)	p=0.025*
Effet Bloc	NS
Effet Variété	***
Modalité*Bloc	NS
Modalité*Variété	NS
Bloc*Variété	NS
Modalité*Bloc*Variété	p = 0.03*

En plantation pure ou en mélange, la différence de hauteur est très nette entre les variétés : les plants de CAL sont toujours plus petits que ceux de LUZv1, dans des proportions similaires d'environ 30%.

Les deux variétés ont une taille légèrement inférieure lorsqu'elles sont en mélange pied à pied : -17 cm pour CAL et -28 cm pour LUZv1 à 8 ans, ce qui

représente une différence de l'ordre de 5 %. Ce léger effet est difficilement interprétable pour l'instant et devra être confirmé dans l'avenir.

c) Circonférence à 8 ans

En 2019, la plupart des plants avaient dépassé 1,30 m de hauteur, ce qui a permis de mesurer leur circonférence à ce niveau. La circonférence moyenne sur le dispositif était de 17 cm ($\bar{x}=6,7$). Comme pour la hauteur, le principal facteur influençant la circonférence des plants « indemnes » est leur variété (Fig.42). La circonférence moyenne de CAL est inférieure de 30% à celle de LUZv1 (soit environ 6 cm) quel que soit la modalité d'installation des variétés.

Fig. 62 : Résultats de l'ANOVA sur la circonférence des arbres indemnes mesurée à 1.30 m à 8 ans (Effet statistique significatif au seuil de (*) 10 %, * 5%, ** 1% ou *** 1 %)

	C8
Effet Modalité (Mélange ou Pur)	p = 0.07 (*)
Effet Bloc	NS
Effet Variété	***
Modalité*Bloc	p = 0.08 (*)
Modalité*Variété	NS
Bloc* Variété	NS
Modalité*Bloc*Variété	p = 0.06 (*)

L'effet de la modalité d'installation (variété seule ou en mélange) est très faible et le différentiel est de l'ordre du cm pour LUZ entre les plants installés purs et ceux installés en mélange.

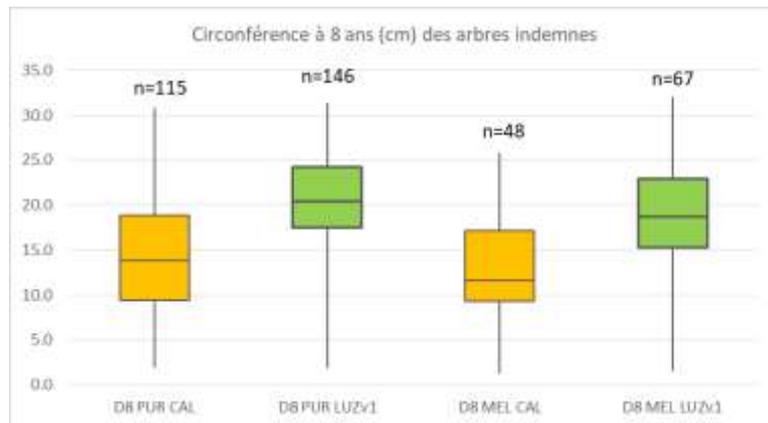


Fig. 63 : Représentation des valeurs de circonférence (cm) à 8 ans des variétés Californie-VG (CAL) et Luzette_VG avant éclaircie (LUZv1), installées seules (PUR) ou en mélange pied à pied (MEL). Seuls les plants n'ayant subi aucun accident au cours de leur développement sont intégrés. Les effectifs de chaque modalité sont mentionnés au-dessus de chaque boîte.

3.4.8. Synthèse des résultats obtenus en Bourgogne

3.4.8.1. Une mortalité faible et indépendante de la variété

Le tableau ci-dessous récapitule les éléments relatifs à la mortalité dans les six dispositifs bourguignons.

Fig. 64 Taux de reprise et taux de survie à 8 et 12 ans dans les différents dispositifs bourguignons par variété. En gris apparaissent les valeurs recueillies à Autun et Pressy où de la mortalité a été induite par des facteurs autres génétiques.

	Autun (71)	Saulieu (21)	Semelay (58)	Pressy (71)	Detthey (71)		Sully (71)	
					SW	SE		
Nombre initial de plants par variété	60	192	96	60	24	36	168	
Taux de reprise sur l'ensemble du dispositif :	90%	98%	98%	91%	100%	100%	90%	
Effet du facteur "Variété" sur le taux de reprise	na	NS	NS	na	NS	NS	NS	
Taux de reprise LUZ :	100%	100%	98%	80%	96%	100%	95% (LUZv1)	
Taux de reprise CAL :	97%	96%	99%	95%	100%	100%	85%	
Taux de reprise DARR :	87%	96%	96%	80%	100%	100%		
Taux de reprise FR1 :	85%	99%	99%	93%	100%	100%		
Taux de reprise FR2 :	93%	99%	97%	88%	100%	100%		
Taux de reprise FR3 :	97%	99%	99%	97%	100%	100%		
Taux de reprise WA :		97%	99%					
Taux de reprise WA2 :	90%	99%	97%	100%	100%	97%		
Taux de reprise SZ 403 :	75%	97%	98%	95%	100%	100%		
Mortalité sur l'ensemble du dispositif à 8 ans* : <i>*à 9 ans pour Autun</i>	88%	89%	97%	84%	96%	88%		84%
Effet du facteur "Variété" sur le taux de survie à 8 ans	na	NS	NS	na	NS	*		NS
Taux de survie à 8 ans LUZ :	100%	96%	98%	75%	96%	81%	90% (LUZ v1)	
Taux de survie à 8 ans CAL :	93%	78%	93%	82%	93%	91%	77%	
Taux de survie à 8 ans DARR :	83%	88%	95%	70%	100%	84%	84%	
Taux de survie à 8 ans FR1 :	83%	95%	100%	87%	93%	97%		
Taux de survie à 8 ans FR2 :	92%	89%	97%	83%	100%	100%		
Taux de survie à 8 ans FR3 :	93%	92%	98%	90%	93%	78%		
Taux de survie à 8 ans WA :		92%	99%					
Taux de survie à 8 ans WA2 :	88%	92%	96%	88%	96%	78%		
Taux de survie à 8 ans SZ 403 :	73%	93%	93%	95%	100%	97%		
Mortalité sur l'ensemble du dispositif à 12 ans :	88%		96%	79%	95%	74%		84%
Effet du facteur "Variété" sur le taux de survie à 12 ans	na		NS	na	NS	*		
Taux de survie à 12 ans LUZ :	100%		97%	64%	93%	59%		
Taux de survie à 12 ans CAL :	93%		94%	75%	89%	84%		
Taux de survie à 12 ans DARR :	83%		94%	62%	96%	66%		
Taux de survie à 12 ans FR1 :	83%		100%	83%	89%	75%		
Taux de survie à 12 ans FR2 :	92%		97%	77%	100%	87%		
Taux de survie à 12 ans FR3 :	93%		98%	88%	93%	62%		
Taux de survie à 12 ans WA :			98%					
Taux de survie à 12 ans WA2 :	88%		96%	85%	96%	72%		
Taux de survie à 12 ans SZ 403 :	73%		93%	93%	100%	84%		
(*), **, *** : effet statistique significatif au seuil de 10%, 5%, 1% ou 1%								
na : non analysable, NS : pas d'effet statistique								

Les taux de reprise ont été très élevés dans tous les dispositifs (>90%).

Les plus faibles étaient observés dans les dispositifs d'Autun et de Pressy sous Dondin où ils sont liés à des facteurs biotiques et abiotiques qui, du coup, limitent l'analyse statistique de l'effet de l'origine génétique des plants (notation « na » dans le tableau). Pour Autun, la mortalité observée la première année est liée à l'attaque d'hylobes survenue le mois qui a suivi la plantation (mai 2009) et qui a provoqué des dégâts inégalement répartis sur le dispositif. Pour Pressy sous Dondin, l'explication se trouve dans la création d'un chemin au milieu de certaines placettes unitaires de ce dispositif monobloc. Le site de Sully a quant à lui été très impacté par un gel le mois qui a suivi la plantation.

Sur l'ensemble des dispositifs, les premières années qui ont suivi les plantations ont permis de suivre les performances des différentes variétés sans contrainte climatique forte (de 2009 à 2015). Dans de telles conditions, les taux de reprise puis de survie ont été élevés.

Huit ans après plantation, tous les dispositifs affichaient un taux de mortalité inférieur à 20 % et aucune différence n'était mise en évidence entre variétés. Par ailleurs, le nombre de plants disparus après la première année avait peu évolué. On note néanmoins une progression de la mortalité sur la partie exposée au SE à Dettey (+12 points), sur le site de Saulieu (+9 points) et sur celui de Pressy (+7 points). Sur le site de Dettey, cette progression a démarré en 2015, année caractérisée par un été sec et très chaud à la suite duquel des rougissements et des pertes d'aiguilles ont été observés. Sur celui de Pressy, l'augmentation a progressé régulièrement après plantation, en lien probable avec l'absence de dégagement autour des plants durant les 5 premières années, cause à laquelle a pu se rajouter, comme à Dettey, l'impact des rougissements observés l'été 2015 alors que la plantation était dans sa 7^{ème} année de croissance.

La moitié des dispositifs ayant atteint leur douzième année de croissance présente un taux de survie supérieur à 80 % (Autun, Semelay et zone SW de Dettey), taux qui n'a quasiment pas évolué depuis les observations réalisées 4 ans plus tôt.

Les sites de Pressy et la zone exposée au SE à Dettey ont des taux de survie à 12 ans un peu plus faibles que dans les autres (79% et 74 % respectivement). Ceux-ci ont par ailleurs augmenté comparativement aux valeurs observées à l'âge de 8 ans (+ 5 points à Pressy et +14 points dans la zone exposée au SE à Dettey).

Quel que soit le dispositif considéré, le taux de mortalité est indépendant de la variété considérée, à l'exception toutefois de ce qui est observé dans la zone SE de celui de Dettey. Dans ce dispositif, en dépit d'effectifs faibles (32 plants de chaque variété), la mortalité observée après 12 ans diffère statistiquement selon la variété considérée et concerne davantage les variétés LUZ, FR3 et DARR. Seule l'analyse des autres dispositifs du réseau national permettra de savoir si ce résultat, obtenu dans le dispositif bourguignon particulièrement impacté par les conditions climatiques de 2015, est généralisable et si certaines variétés sont plus sensibles que d'autres lorsque de fortes contraintes hydriques et thermiques surviennent.

3.4.8.2. Un état sanitaire mis à mal en 2015 et des signes inquiétants sur certains dispositifs en 2020

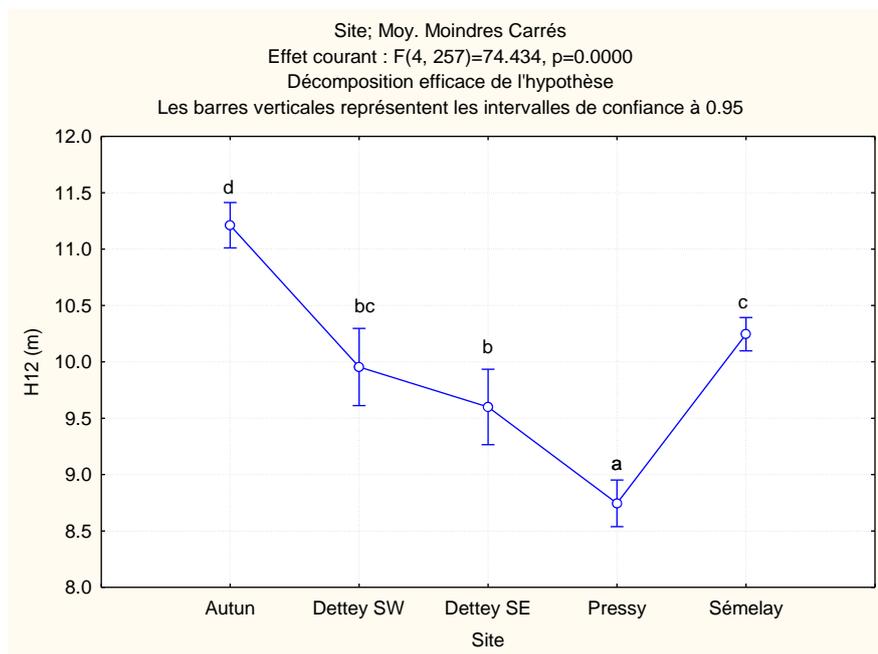
Depuis 2009, le réseau a permis d'observer et d'évaluer l'impact d'un certain nombre de facteurs biotiques et abiotiques sur l'état sanitaire et la croissance des différentes variétés testées.

a) Les hylobes délaissent-elles les plus petits plants.?

Des attaques d'hylobes ont touché 2 dispositifs. À Autun, une forte attaque est intervenue un mois après la plantation en mai 2019 et a entraîné la disparition de 10% des plants du dispositif. À Sémelay, deux attaques ont eu lieu l'année qui a suivi la plantation en 2010 sans toutefois entraîner de mortalité. Dans ce dernier dispositif, de type mono-arbre, il a été possible de faire une analyse statistique qui indique que les dégâts d'hylobes, répartis de façon relativement homogènes sur le site, sont plus ou moins fréquents selon la variété. Toutefois cet effet pourrait être davantage lié à la taille et à la vigueur des plants au moment de l'attaque qu'à leur origine génétique. Ainsi les variétés les moins touchées (CAL et SZ403 en l'occurrence) sont celles qui présentaient les plants les plus petits et les accroissements les plus faibles.

Afin d'approcher la fertilité des sites, nous avons utilisé la hauteur dominante c'est-à-dire la moyenne des hauteurs des plus gros arbres à 8 ans (H8dom) et 12 ans (H12dom), indépendamment de leur origine génétique. Cette variable, pour une essence et un âge donnés, ne dépend en effet que des conditions de station si le couvert est fermé (1^{ère} loi de Eichhorn), condition qui n'était qu'imparfaitement remplie sur certains dispositifs à l'âge de 8 ans. Les 5 dispositifs qui ont atteint l'âge de 12 ans, ont une hauteur dominante qui varie de 11.2 (\bar{x} =0.94) m à Autun à 8.7 m (\bar{x} =0.8) à Pressy.

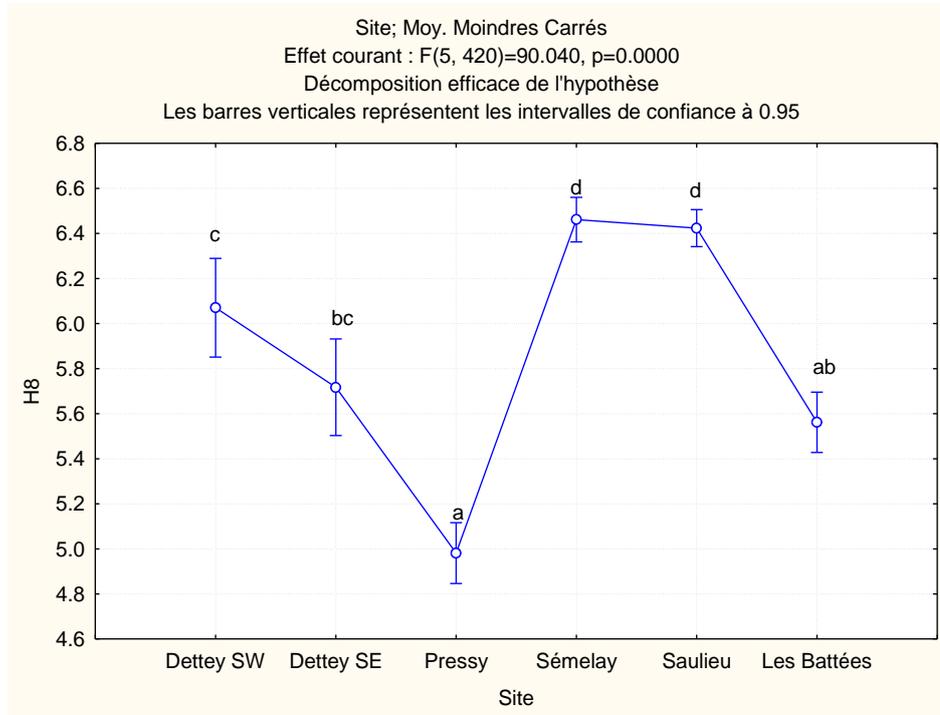
Figure 65 : Hauteurs dominantes à 12 ans de 5 dispositifs bourguignons. Les moyennes sont mentionnées sur le graphe ainsi que les résultats de l'analyse statistique (Les moyennes accompagnées d'une lettre identique ne sont pas statistiquement différentes, ANOVA à 1 facteur (site)).



D'après les courbes de fertilité établies pour le Douglas par Angelier (2006), les sites d'Autun, Sémelay et la zone exposée au sud-ouest du dispositif de Dettey se trouvent en classe de fertilité 1, alors que Pressy et la seconde zone de Dettey, en classe de fertilité 2.

Pour intégrer les dispositifs plus jeunes, nous avons calculé la hauteur dominante à 8 ans. Le dispositif d'Autun- qui n'a pas été mesuré à 8 ans mais à 9 ans- n'apparaît pas dans le graphe. Les hauteurs dominantes à 8 ans varient de 6.5 m à Sémelay à 5 m à Pressy.

Figure 66: Hauteurs dominantes à 8 ans de 6 dispositifs bourguignons.
Les moyennes accompagnées d'une lettre identique ne sont pas statistiquement différentes, (ANOVA à 1 seul facteur= site).



L'ensemble de ces éléments font apparaître un premier groupe de dispositifs aux conditions favorables à la croissance du douglas, en classe de fertilité 1 (Hdom à 12 ans supérieur à 10 m). Il est composé des dispositifs d'Autun, Sémelay et Saulieu. Le dispositif de Pressy correspond aux conditions les plus défavorables, tandis que ceux des Battées et de Dettey semblent être en position intermédiaire, la zone exposée au SW de Dettey se rapprochant du 1^{er} groupe et celle exposée au SE, du niveau de contraintes prévalant à Pressy. Ce classement correspond bien au découpage établi *a priori* dans le cadre du réseau national qui attribue les premiers au « cœur de l'aire » du douglas et les seconds à sa « marge 1 ».

A partir de ces éléments, il est possible de classer les conditions de croissance qui ont prévalu jusqu'à présent sur les dispositifs, en fonction de leur niveau de contrainte pour la croissance du douglas (Fig. 65 et 66). Autun semble bénéficier des conditions les plus favorables et Pressy des plus défavorables.

Figure 67: Gradient de contraintes stationnelles des 6 dispositifs expérimentaux bourguignons

Autun > Sémelay = Saulieu > Dettey SW > Dettey SE = Les Battées / Sully > Pressy

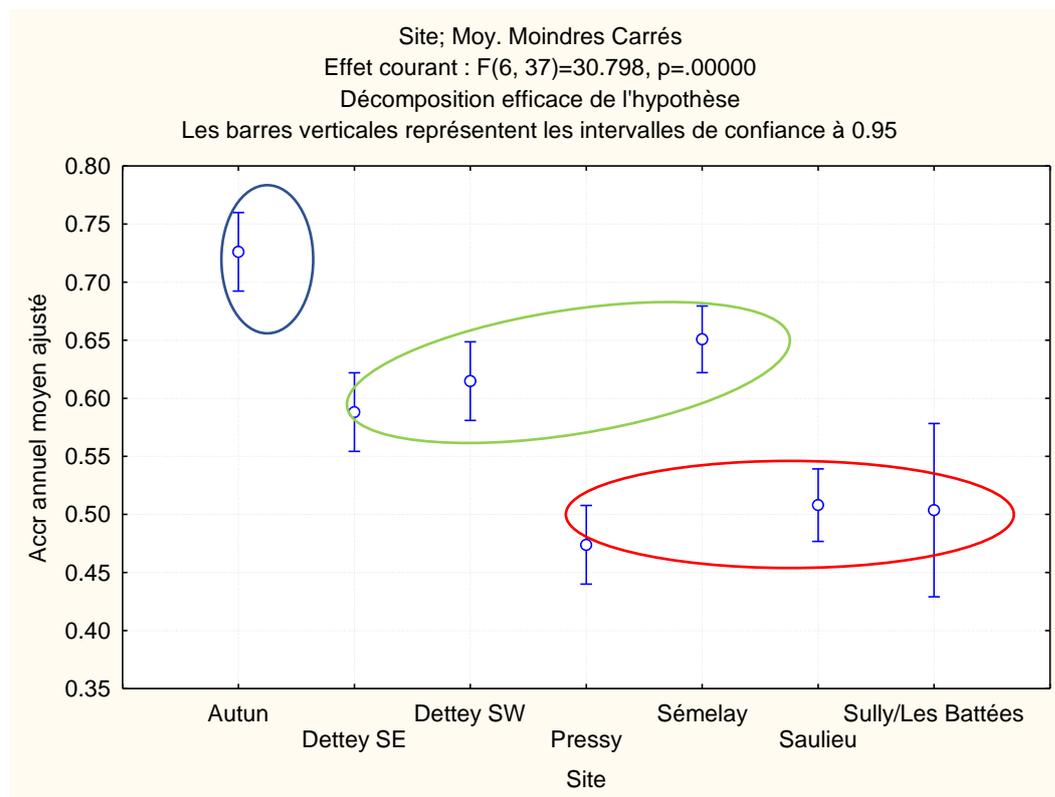


3.4.8.4. Des accroissements en hauteur variables selon les sites...

Pour comparer plus facilement les performances des variétés sur les différents sites, nous avons travaillé avec les **accroissements annuels moyens** en hauteur pendant les 8 (9 pour Autun) premières années de croissance (soit $(H_8-H_0)/8$ ou $(H_9-H_0)/9$), accroissements ajustés par le modèle établi lors de l'analyse de variance. Ceux-ci varient de 32 à 81 cm/an selon le site et la variété considérée. Précisons qu'ils sont calculés à partir de l'ensemble des arbres.

En considérant l'ensemble des variétés (Fig. 68), c'est sur le site d'Autun que les performances moyennes sont les plus fortes et sur ceux de Pressy, Saulieu et Sully qu'elles sont les plus faibles.

Figure 68: Accroissements annuels moyens ajustés (m) par site (+/- intervalle de confiance)



Ce classement est un peu différent de celui établi avec les hauteurs dominantes dans le paragraphe, en particulier pour le site de Saulieu, qui affiche des accroissements faibles bien qu'en classe de fertilité 1.

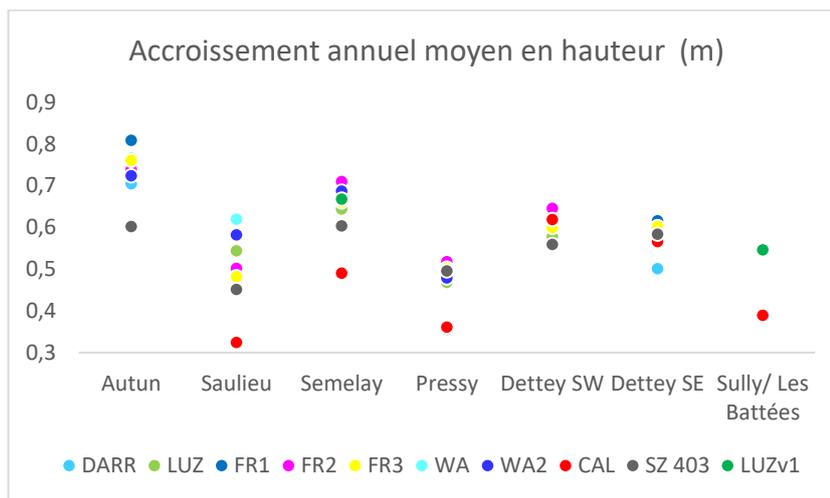
3.4.8.5. ... et selon les variétés

Sur la plupart des sites, l'accroissement moyen de la variété CAL (point rouge sur la figure suivante) est nettement inférieur à celui des autres variétés. Ce n'est toutefois pas le cas dans les deux zones du site de Dettey où sa croissance est équivalente. Comparativement à LUZ, l'écart varie de 0 à -40 % selon les sites. Il est nul comme il vient d'être mentionné à Dettey, de 7 % à Pressy, d'environ 22 % à Autun, Sémelay et Pressy et atteint 40 % à Saulieu.

Le fait que les performances de CAL relativement aux autres variétés varient selon le milieu considéré a déjà été pressenti suite à l'analyse partielle de résultats à 3 ans (Girard et al, 2017) et étayée lors du bilan réalisé à l'âge de 5 ans intégrant 24 sites du réseau national (Bastien et coll, 2021). Les auteurs signalent que le différentiel de croissance entre CAL et les autres provenances diminue

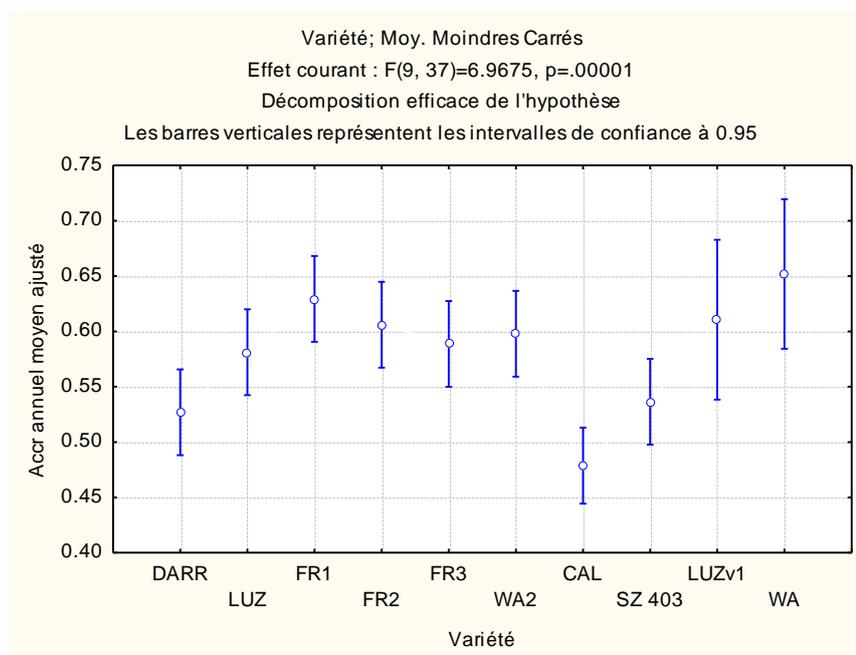
fortement lorsqu'on passe d'un milieu favorable au douglas à un environnement chaud et sec où la variété CAL ne diffère plus significativement du témoin, ni de certains vergers. Les résultats obtenus sur les sites bourguignons vont dans ce sens, le différentiel étant le plus important à Saulieu, Autun, Sémelay situés dans le « cœur de l'air » du douglas et diminuant jusqu'à disparaître en marge 1, à Pressy et Dettey.

Figure 69: Accroissements annuels moyens ajustés (m) des différentes variétés par site



Les performances plus faibles de CAL apparaissent nettement lorsqu'on considère l'ensemble des dispositifs (Fig.ci-après).

Figure 70: Accroissements annuels ajustés (m) par variété (+/- intervalle de confiance)



Cette représentation synthétique rend également compte de la position intermédiaire qu'occupe la variété DARR, dont les performances sur les sites bourguignons sont systématiquement inférieures à celles des autres variétés et équivalentes à celles du témoin. Dans le précédent bilan déjà cité, son

accroissement moyen était supérieur au témoin SZ 403 mais elle se positionnait déjà comme moins vigoureuse que les autres.

Il faut noter que, dans les dispositifs bourguignons, l'écart entre les accroissements moyens du témoin américain SZ 403 et ceux des variétés améliorées est peu important. Ainsi comparativement à LUZ, il est de l'ordre de 20 % à Autun et Saulieu mais de moins de 6% ailleurs.

Concernant les autres variétés à savoir LUZ, FR1, FR2, FR3 et WA2, il n'est pas possible de distinguer des tendances, leurs accroissements en hauteur sont toujours parmi les plus forts mais le classement des unes par rapport aux autres varie selon les sites.

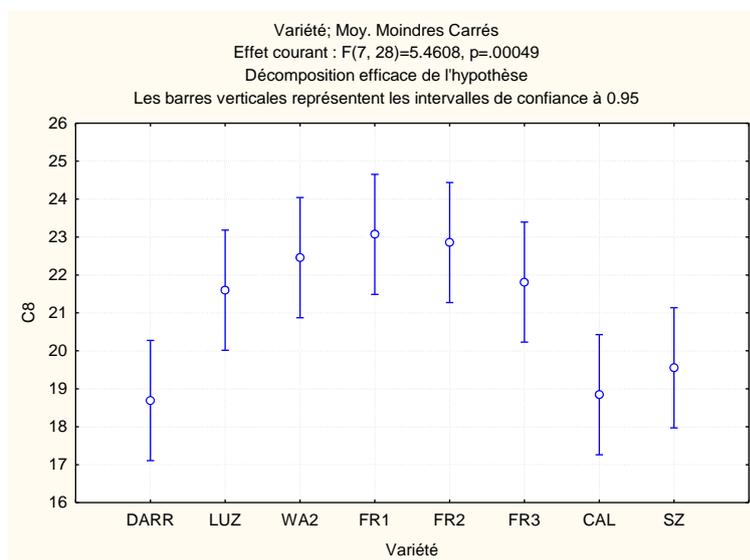
Pour mémoire, les résultats obtenus à 5 ans au niveau national ne montrent pas de différence de croissance selon les variétés sauf pour la variété Californie-VG.

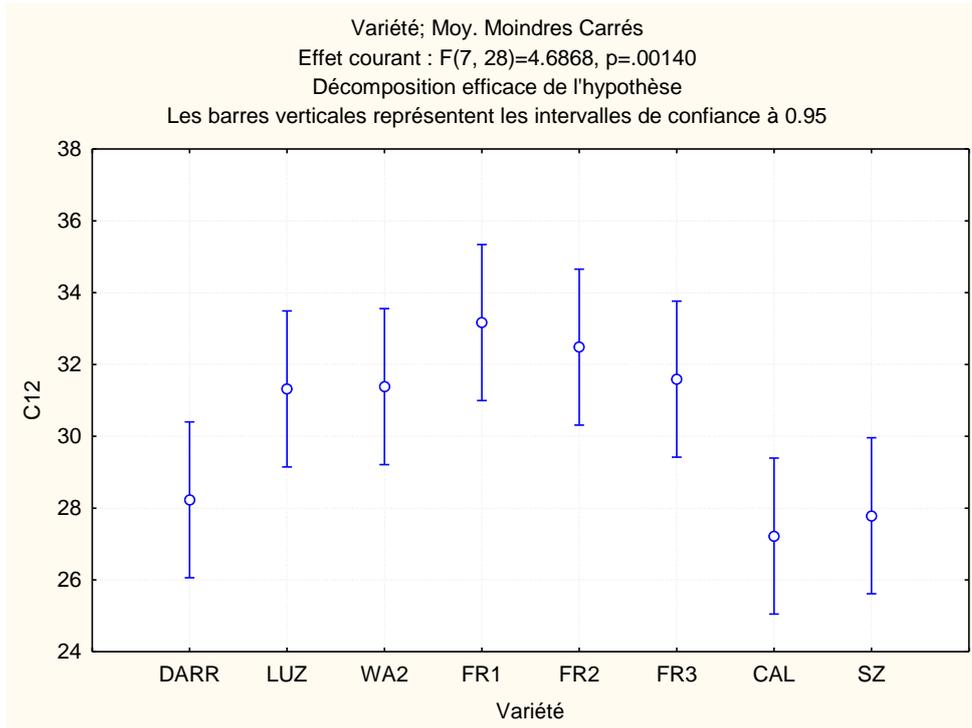
Nous ne discuterons pas ici des résultats relatifs à WA et LUZv1 qui sont évaluées sur un nombre trop restreint de sites bourguignons (n=2) pour pouvoir les positionner par rapport aux autres. L'analyse d'autres dispositifs du réseau national dans lesquels elles sont intégrées le permettra. Signalons toutefois que, sur le site de Sémelay où se trouvent LUZ et LUZv1, les hauteurs atteintes à 12 ans sont identiques tout comme les circonférences. L'éclaircie du verger à graines n'aurait donc pas a priori modifié ces caractères.

3.4.8.6. Tendance identique pour la croissance en diamètre

À 8 ans, quelle que soit la variété et le site considérés, la circonférence moyenne à 1,3m atteint 21 cm. Le classement des variétés est similaire à celui obtenu avec l'accroissement en hauteur : le groupe constitué de CAL, SZ 403 et DARR étant inférieur aux autres vergers qui ne diffèrent pas entre eux, situation qui reste inchangée 4 ans plus tard (Fig. ci-dessous).

Figure 71: Moyennes ajustées des circonférences (cm) par variété à 8 ans (graphe du haut) et à 12 ans (graphe du bas) (+/- intervalle de confiance)





À 12 ans, sur les 4 sites concernés, la circonférence moyenne à 1,3m atteint 30 cm. Le classement des variétés est le même que celui établi 4 ans plus tôt. Durant cette période, les accroissements annuels sur ces sites varient de 4.3 à 4.5 cm/an soit de l'ordre de 1.4 cm sur le diamètre.

3.4.9. En conclusion

De 2009 à 2012, 6 dispositifs expérimentaux comparant les différentes variétés actuellement disponibles sur le marché ont été installés en Bourgogne dans différentes situations climatiques. La moitié se situe dans des conditions environnementales favorables à la production de douglas, dans le « cœur de l'aire » de l'espèce. Les autres sont localisés dans des zones plus sèches, zone désormais située en marge du cœur de l'aire.

Les données récoltées ont été analysées par dispositif puis globalement à 8/9 ans et 12 ans.

De 2009 à 2014, c'est-à-dire durant les premières années qui ont suivi les plantations, aucune contrainte climatique forte n'est venue perturber les performances des différentes variétés. Dans de telles conditions, les taux de survie ont été élevés. A partir de l'année 2015, les arbres ont en revanche été exposés à une sécheresse intense et à de fortes températures qui sont très certainement à l'origine de la hausse de la mortalité observée dans la majorité des dispositifs. Aucune variété ne s'en accommode mieux qu'une autre et le taux de mortalité apparaît comme indépendant de la variété considérée.

La croissance en hauteur de la variété Californie-VG, présumée mieux adaptée à des conditions plus chaudes et sèches que celles du cœur de l'aire du douglas, se distingue de celle des autres variétés actuellement commercialisées. Elle est nettement plus faible dans les secteurs les plus favorables au douglas. Toutefois, le différentiel se réduit fortement lorsque l'environnement est plus chaud et sec comme en marge 1. Dans ce genre de contexte, cette variété peut être intéressante en diversification. Il faut néanmoins s'assurer qu'elle ne présente pas de sensibilité particulière.

Concernant les autres variétés améliorées actuellement commercialisées, la variété Darrington présente systématiquement, la croissance la plus faible sur les 6 sites bourguignons. Quant aux autres, à ce stade, il n'est pas possible de les distinguer en termes de croissance.

Le suivi des six dispositifs bourguignons a fourni de très nombreuses données depuis sa mise en place. Le travail réalisé ici a notamment permis de réaliser la première analyse multisite intégrant des résultats récoltés 12 ans après plantation. Les résultats obtenus viennent renforcer les tendances ébauchées au niveau national (Rousselle et al, 2018, Bastien et al, 2021) et apporter de nouveaux éléments sur le comportement des 8 variétés de douglas actuellement utilisées.

Pour préciser davantage l'adaptation aux changements climatiques de ces variétés, l'analyse d'autres dispositifs est indispensable, qu'ils s'agissent de ceux installés selon les mêmes protocoles expérimentaux dans le cadre du réseau national d'évaluation ou bien de ceux mis en place dans le cadre du PEI pour tester différentes espèces alternatives au douglas et dans lesquels les provenances Luzette-VG et Californie-VG font office de témoins.

En amont des analyses de données, il est indispensable de disposer de moyens pour assurer le suivi de tels dispositifs qui sont par ailleurs des lieux privilégiés pour transmettre et diffuser les résultats. C'est en effet grâce au suivi et à la vigilance des équipes, que des campagnes d'observation et de mesures particulières ont été déclenchées suite à des événements exceptionnels et que des informations sur l'état sanitaire des arbres ont été récoltées (rougissement et pertes foliaires après l'été 2015, phénomène de « rouge physiologique » en mars 2017, apparition de coulures de résines, décollement d'écorce...).

En effet, les dispositifs mis en place, à condition qu'ils puissent être régulièrement suivis, constituent de véritables parcelles « vigie » susceptibles d'alerter la filière sur l'apparition de symptômes et dégâts, mais aussi d'apporter rapidement des informations sur le comportement des variétés utilisées en reboisement et, le cas échéant, d'adapter au plus vite les conseils d'utilisation donnés aux propriétaires et gestionnaires. Il serait particulièrement intéressant d'échanger avec le département Santé des Forêts à propos des observations déjà réalisées et de l'associer aux prochaines campagnes de mesures.

Opportunément, ces dispositifs permettront la réalisation d'études et ainsi l'acquisition de nouvelles connaissances. Citons à titre d'exemple, l'étude réalisée dans le cadre de ce PEI par l'UMR PIAF de l'INRAe de Clermont-Ferrand sur les dispositifs de Dettey et Autun, pour préciser les contraintes de développement (gel, stress hydrique, stress thermique...) des variétés Californie-VG et Luzette-VG dans deux contextes environnementaux contrastés. Un pas de plus vers la caractérisation éco physiologique des variétés de douglas et la confirmation ou non de l'intérêt de la variété Californie-VG dans le contexte de changements climatiques que nous connaissons.

3.5. Mesures écophysiological fines

Auteurs

Thierry Améglio, Christophe Serre – INRAE UMR PIAF

3.5.1. Objectifs de l'instrumentalisation

Certains des plus anciens essais de provenance bourguignons, détaillés précédemment en partie 3.4, ont été instrumentalisés pour y réaliser des mesures écophysiological fines.

L'objectif est de suivre et enregistrer à un pas de temps horaire les variations de diamètre du tronc d'arbres de différentes variétés, grâce à l'installation de micro-dendromètres. Associé à des mesures de températures, ceci permettra de suivre, en conditions réelles, l'activité d'arbres (démarrage et arrêt d'activité) ainsi que l'impact de gels, canicules et de périodes sèches sur cette activité. En comparant le comportement d'arbres de la variété Californie-VG et d'autres de la variété Luzette-VG ou Washington-VG, il serait possible de préciser les zones du territoire bourguignon où ces variétés seront les mieux adaptées.

La partie du projet concernée appartient à la sous-Tâche 3.4 du Projet : **Expérimentation des nouvelles variétés de douglas**. Actuellement, 8 variétés de douglas sont disponibles sur le marché. L'ensemble de ces variétés fait l'objet d'une évaluation à l'échelle du territoire national sur une trentaine de sites. En Bourgogne, 6 sites sont installés en forêt privée et publique dont les plus anciens sont aujourd'hui âgés de 9 ans. Les résultats obtenus à 5 ans au niveau national ne montrent pas de différence de croissance selon les variétés considérées sauf pour la variété Californie-VG. Cette dernière présente une croissance en hauteur plus faible que les autres dans les secteurs les plus favorables au douglas, différence de croissance qui s'amenuise lorsque les secteurs deviennent plus secs (Rousselle & al, 2018). La variété Californie-VG, initialement créée pour les reboisements de la façade sud du Massif central, a été constituée à partir d'individus originaires de la partie sud de l'aire naturelle de l'espèce. Jusqu'à présent, aucun élément n'a permis d'établir que cette variété était mieux adaptée que les autres à des conditions estivales plus chaudes et sèches.

Notre travail a donc consisté à suivre la croissance fine en diamètre de 2 variétés en conditions naturelles sur 2 sites appartenant aux plus anciennes plantations bourguignonnes. Ces 2 sites et variétés ont été instrumentalisés pour des mesures écophysiological de micro-dendrométrie, afin de suivre et enregistrer, à un pas de temps semi-horaire, les variations de diamètre du tronc de 4 arbres par variétés et par site (16 arbres suivis au total) associées à chaque fois à des mesures de températures de l'air. Ces mesures en temps réel permettent de suivre, la phénologie des arbres (démarrage et arrêt de la croissance secondaire) ainsi que les contraintes hydriques et thermiques durant l'ensemble du cycle de croissance et développement. En comparant le comportement d'arbres de la variété Californie et de la variété Luzette, il sera possible de préciser sur deux sites contrastés du territoire bourguignon, le comportement de ces variétés et leurs adaptations au climat des deux années de suivi (2021 et 2022).

3.5.2. Matériel et Méthodes

Les mesures de micro-dendrométrie des variations de diamètre du tronc ont été réalisées en continu à l'aide du système e-PépiPIAF (Capt-Connect, Clermont-Fd, France). Ce système permet d'établir des diagnostics de vitalité des arbres (cf. annexe 1) en temps réel. Le e-PépiPIAF est un système électronique sans fil de surveillance et d'expertise de l'état physiologique des plantes et des arbres. Sa technologie est basée sur le suivi de la déformation d'organe (variation micrométrique du diamètre des organes) par capteur de déplacement linéaire (LVDT : Linear Variable Differential Transformer) et logiciel de transmission à distance (radio et réseau Sigfox ou LoRa) et de visualisation des données (température et diamètre). Cette méthode est non destructive et non intrusive pour la plante observée. Ces mesures se font en continu à intervalles de temps réguliers (30 minutes dans notre étude) et sont transmises régulièrement sur un Cloud (toutes les 2 heures) et visualisable sous Grafana à l'aide d'un login et mot de passe.



Outre l'évolution de la croissance au cours du temps, deux principaux paramètres peuvent être calculés : la croissance journalière apparente (CJ) d'un jour à l'autre et l'amplitude maximale de contraction journalière (AMC).

Le suivi de la dynamique de variation de diamètre en continu et de ces paramètres permet de visualiser à la fois la croissance de l'arbre, les diverses contraintes pouvant l'affecter (contraintes hydriques, contraintes thermiques, développement de la surface foliaire, croissance secondaire, attaques parasitaires, ...). L'expertise réside dans la capacité à interpréter la variation de ces mesures en continu, en les associant à des données climatiques complémentaires (température de l'air *a minima* directement mesurée par le système PépiPIAF) pour apporter d'une part un diagnostic sur les causes des divers stress, et d'autre part des préconisations en matière de pilotage agronomique ou d'adaptation de la culture dans son milieu.

Nous avons ainsi installé dès fin février 2020, 16 systèmes e-PépiPIAF au total dont 8 arbres sur une parcelle près d'Autun (4 arbres variété Californie vs. 4 arbres variété Luzette) et 8 autres sur une parcelle à Dettey (4 arbres variété Californie vs. 4 arbres variété Luzette). Ces capteurs resteront en place jusqu'à fin décembre 2022 afin d'avoir l'enregistrement du fonctionnement des arbres sur deux années complètes.

Par ailleurs, une station météo portable, prêtée par l'INRAE de Nancy a été positionnée sur le site de Dettey et permet d'obtenir des données météorologiques complémentaires à celles des capteurs placés sur les arbres (température, hygrométrie, direction et force du vent, radiation, pluviométrie).



3.5.2.1. Site de Dettey : (Propriété de M de Contenson)

Caractéristiques de la parcelle :

-3,5 ha (dont 0.25 ha environ occupé par chaque dispositif)

-Altitude : 440 m Orientation : SW et SE Région forestières IFN :

-Haut de versant Pente : de 15 à 25 %

-T° moy min : 5.8°C T° moy max : 14.4°C T° moy annuelle : 10.1°C

Station météo de référence : St Symphorien de Marmagne

-929 mm d'eau / an dont 367 mm entre Mai et Septembre

-Sol cryptopodzolique peu profond (pH : 4.5) très chargé en éléments grossiers, formé sur granite

Variété	N° CRPF/IDF	# e-PépiPIAF Installation 23/02/2021 (1)	Diamètre au niveau du LVDT (mm)	Maintenance 30/06/2021 (2)	# e-PépiPIAF Ré-installation + maintenance 28/02/2022	Circ. LVDT (cm) (3)
Californie	1	225	62.30	Recalage / changt. Piles M02125AK50-09	225	30.2
Californie	16	226	65.55	Recalage / M02125AK50-07	226	40.5
Californie	18	227	57.62	Recalage / changt. Piles M02125AK50-05	227	41.8
Californie	23	228	64.24 (1) 61.29 (2)	déplacement porte- capteur /M02125AK50-30	228	37.6
Luzette	14	232	64.98 (1) 56.61 (2)	déplacement porte- capteur / changt. Piles M02125AK50-12	232	37.3
Luzette	15	229	69.15	Abandon Trop gros M02125AK50-21	249	44.4
Luzette	18	230	71.53 (1) 64.35 (2)	déplacement porte- capteur / changt. Piles M02125AK45-01	230	37.3
Luzette	22	231	67.62 (1) 62.03 (2)	déplacement porte- capteur / changt. Piles M02125AK46-08	231	34.1

3.5.2.2. Site d'Autun : (Propriété du Groupement Forestier des Essarons)

Caractéristiques de la parcelle :

-77 ha (dont 0.6 ha environ occupé par le dispositif)

-Altitude : 600 m Orientation : NNO Région forestières IFN : Plateau de l'Autunois

-Milieu de versant Pente : 23 %

-T° moy min : 5,5°C T° moy max : 15,1°C T° moy annuelle : 10,3°C (Ref: 1971-2000, St Symphorien de Marnagne)

-1 030 mm d'eau / an dont 495 mm entre Avril et Septembre (Ref: 1971-2000, Uchon)

-Sol cryptopodzolique brun acide (pH : 4.5) à texture SL, formé sur granite

Variété	N° CRPF/IDF	# e-PépiPIAF Installation 24/02/2021 (1)	Diamètre au niveau du LVDT (mm)	Maintenance 1/07/2021 (2)	# e-PépiPIAF Ré-installation + maintenance 01/03/2022	Circ. LVDT (cm) (3)
Californie	2	281 (1) 229 (2)	62.30	Problème Sigfox remplacement / Recalage / changt. Piles M02125AK50-09	229	29.8
Californie	7	278	47.36	Recalage / M02125AK50-17	265	34.2
Californie	14	277	41.45	Recalage / changt. Piles M02125AK46-11	277	35.2
Californie	22	276	52.62	Recalage/M02125AK50- 15	276	44.4
Luzette	8	272	57.30	Sans Sigfox / changt. Piles M02125AK48-05	272	33.5
Luzette	14	255	56.18	Recalage M02125AK46-02	255	35.2
Luzette	24	254	66.59	Recalage M02125AKXX-XX	254	43.3
Luzette	28	253	59.85	Recalage/ M02125AK46-24	253	43.6

3.5.2.3. Suivi en temps réel et récupération des données

Les systèmes e-PépiPIAF nous permettent d'avoir un enregistrement continu de l'évolution du diamètre pour 4 arbres de chaque variété (Californie et Luzette) par site. Comme nous l'avons brièvement décrit au §3, les e-PépiPIAF installés stockent à la fois leurs données dans la mémoire interne du système (téléchargement en mode radio à proximité des arbres ≈ 50 m des arbres) et transmettent en même temps toutes les 2 heures les 4 dernières mesures par le réseau Sigfox (ou LoRa) directement sur internet et visualisables en temps réel sur Grafana. Pour notre cas d'étude, nous avons choisi le réseau Sigfox qui ne nécessite pas d'installation à proximité des deux sites d'une passerelle de connexion au réseau internet contrairement au réseau LoRa, mais qui utilise les antennes du réseau Sigfox déjà installées sur le territoire. Cette transmission des données en temps réel était néanmoins un pari, car la zone couverte *a priori* par le réseau Sigfox était « correcte » pour le site de Dettey et « faible » pour celui d'Autun proche des pépinières Naudet (cf. Figure 2).

Néanmoins la transmission des données a été globalement très satisfaisante avec 8/8 arbres communicants sur le site de Dettey et 6/8 sur le site d'Autun. De plus la « perte » de données pour les arbres communicants a été assez restreinte, n'excédant jamais 48h et le plus souvent que quelques heures dans la journée, avec plus de 80% de journée complète. Ces pertes sont liées au réseau, où la couverture peut varier dans le temps, en raison de nombreux facteurs : les conditions météorologiques, le nombre d'utilisateurs, l'apparition d'un obstacle, ...

Elles sont secondées par la sauvegarde des données en interne qui sont récupérées lors des déplacements sur le terrain et la compilation finale des données peuvent être alors finalisée.

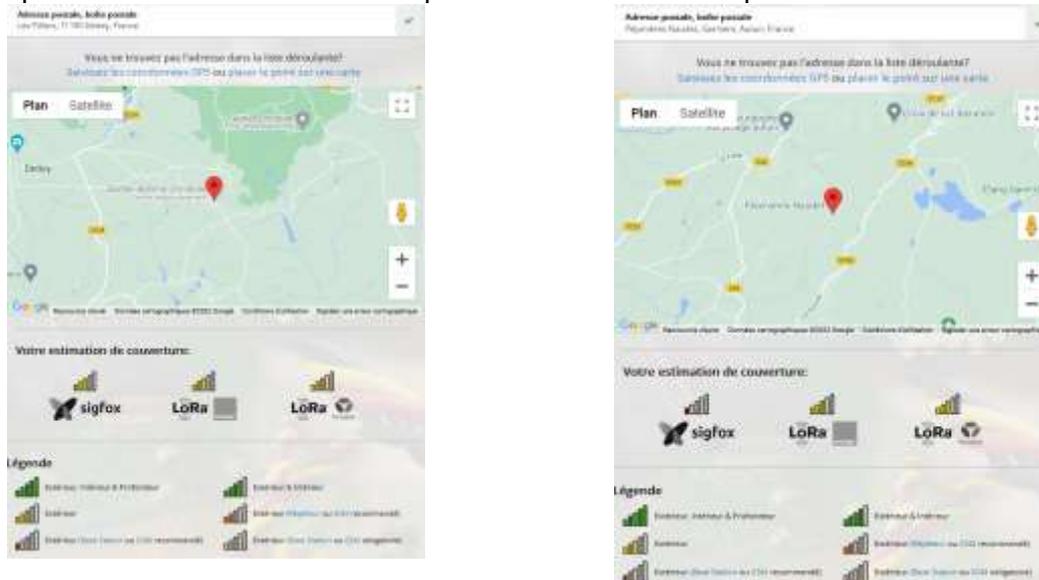


Figure 2 : Zone de couverture des réseaux officiels : <https://dashboard.fuel-it.io/tester-couverture-lora-sigfox-lpwan>



Figure 3 : Exemple de suivi en temps réel sur Grafana (logiciel libre open source qui permet la visualisation de données et la réalisation de tableaux de bord à partir d'une base de données sur internet).

On peut voir sur la fenêtre du haut à gauche le diamètre en mm du 1 mars 2021 au 31/08/2022. Les 2 diminutions très fortes du diamètre début juillet 2021 et début mars 2022 correspondent au recalage du dendromètre LVDT (plage de mesure de 15 mm seulement). La fenêtre du haut à droite présente la température interne du boîtier (proche de la température de l'air sous abris). La fenêtre basse gauche, indique la tension des piles sur les 24 dernières heures et le graphique du bas à droite montre l'évolution de la consommation des piles avec 2 renouvellements de ces dernières aux mêmes dates que le recalage des dendromètres.

Ce suivi en temps réel a été très important pour cette campagne de terrain. En effet nous n'avions aucun *a priori* sur la dynamique de croissance en diamètre des Douglas suivis. Nous avons vu dès juin 2021 que la croissance très forte des arbres allait conduire à un blocage en fin de course (± 7.5 mm) pour les dendromètres. Nous avons dû programmer ainsi une opération de maintenance pour recalibrer les dendromètres LVDT. Nous avons aussi pu anticiper la maintenance des batteries pour

certaines capteurs, dont les piles installées n'étaient pas neuves et dont la charge risquait d'être insuffisante pour passer l'hiver jusqu'à la prochaine maintenance (février-mars 2022). Nous avons été enfin contraints de déplacer certains systèmes plus en hauteur, car la croissance étant si forte, il deviendrait difficile de la mesurer au même endroit sans bloquer le LVDT.

Cette contrainte de dimension des portes-capteurs (pour des troncs de 10 cm de diamètre), nous a contraints à renoncer à la mesure à partir de juillet 2021 sur un Douglas Luzette à Dettey (#15). Enfin nous avons décidé de faire usiner pour l'année 2022, des nouveaux portes-capteurs pour des diamètres de tronc jusqu'à 20-22 cm, portes-capteurs qui ont été mis en place fin février 2022 et permis de redescendre la mesure sur le tronc de l'arbre et d'installer avec moins de risques (travail en hauteur) et moins de contraintes, les dendromètres.

3.5.3. Résultats

3.5.3.1. Evolution de la température sous frondaison

Les systèmes e-PépiPIAF installés à Autun (n=8) et à Dettey (n=8) nous permettent ainsi d'avoir un enregistrement continu de l'évolution de la température sous frondaison pour ces deux sites expérimentaux. La température enregistrée correspond à la température interne du boîtier d'acquisition relativement bien protégé du rayonnement direct par la couronne de l'arbre et ainsi proche d'une température de l'air sous abris. L'étude de ces températures sur un an (25/02/2021 au 23/02/2022) montre des évolutions semblables (cf. Figure 4) pour la température moyenne journalière pour les 2 sites.

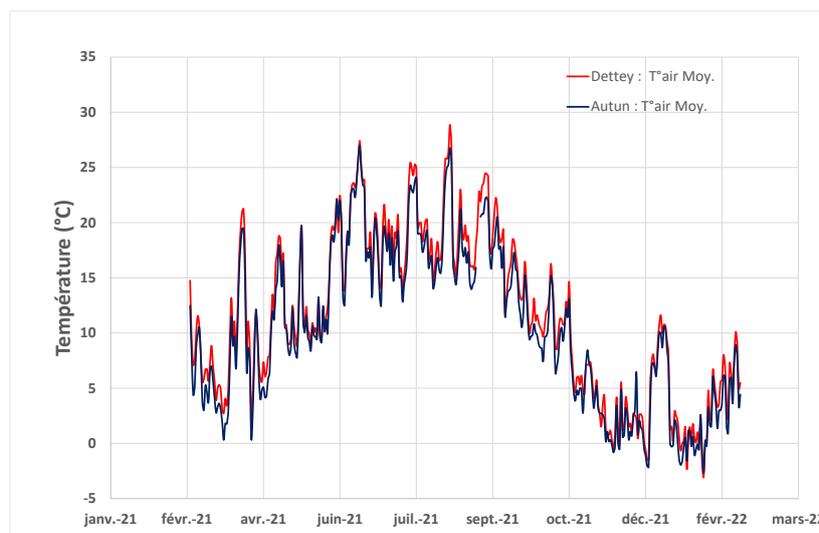


Figure 4 : Evolution de la température moyenne journalière des sites de Dettey (n=8) et Autun (n=8) de février 2021 à Février 2022.

Nous avons donc extrait pour chaque jour et pour chaque site, les températures minimales, moyennes et maximales. Il n'y a pas de différence significative de températures minimales entre les 2 sites ($p=0.253$), mais des différences significatives pour les températures maximales ($p=0.034$) et moyennes ($p=0.043$) plus élevées à Dettey qu'à Autun sont observées.

Variable	Observations	Minimum	Maximum	Moyenne	Ecart-type
Dettey : T°air Min.	361	-4.313	20.875	7.045	6.079
Autun : T°air Min.	361	-4.300	20.583	6.555	6.022

Variable	Observations	Minimum	Maximum	Moyenne	Ecart-type
Dettey : T°air Moy.	361	-3.068	28.871	11.517	7.341
Autun : T°air Moy.	361	-2.652	26.982	10.422	7.192

Variable	Observations	Minimum	Maximum	Moyenne	Ecart-type
Dettey : T°air Max.	361	-2.000	40.375	18.072	9.865
Autun : T°air Max.	361	-1.300	37.688	16.439	9.771

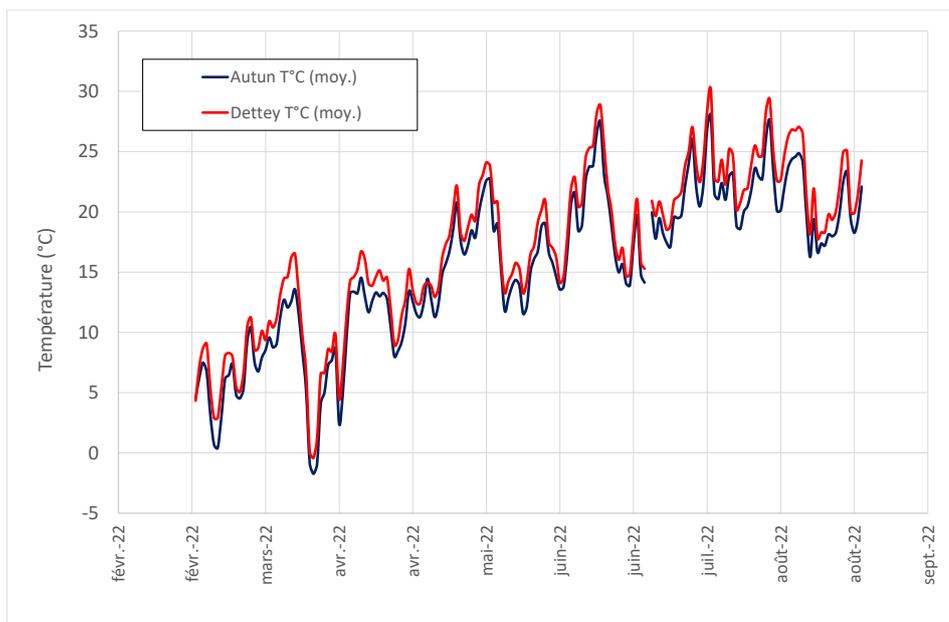


Figure 5 : Evolution de la température moyenne journalière des sites de Dettey (n=6) et Autun (n=6) de février 2022 au 30 août 2022.

Nous retrouvons sur l'année 2022, la même tendance des températures enregistrées par le e-PépiPIAF (n=6 par site pour l'instant : récupération des données uniquement sur le site Sigfox). Là encore, les températures moyennes journalières (Figure 5) sont plus élevées à Dettey qu'à Autun.

3.5.3.2. Croissance secondaire journalière des Douglas durant l'année 2021

Nous avons également extrait pour chaque arbre et pour chaque site, la croissance cumulée journalière à minuit et le graphique ci-dessous présente la moyenne de croissance cumulée pour chaque variété par site. On observe ainsi une réactivation cambiale de la variété Californie un peu avant la variété Luzette en particulier sur le site le plus chaud : Dettey. Il n'y a pas vraiment de ralentissement de la croissance secondaire jusqu'au mois d'août en absence de contrainte hydrique en 2021. La croissance en diamètre se ralentit ensuite jusqu'à la mi-novembre où elle est stoppée. Une plus forte croissance cumulée, pour les 2 variétés est obtenue sur le site de Dettey (24 mm pour Californie vs. 18 mm pour Luzette) en regard du site d'Autun (15 mm pour Californie vs. 14 pour Luzette).

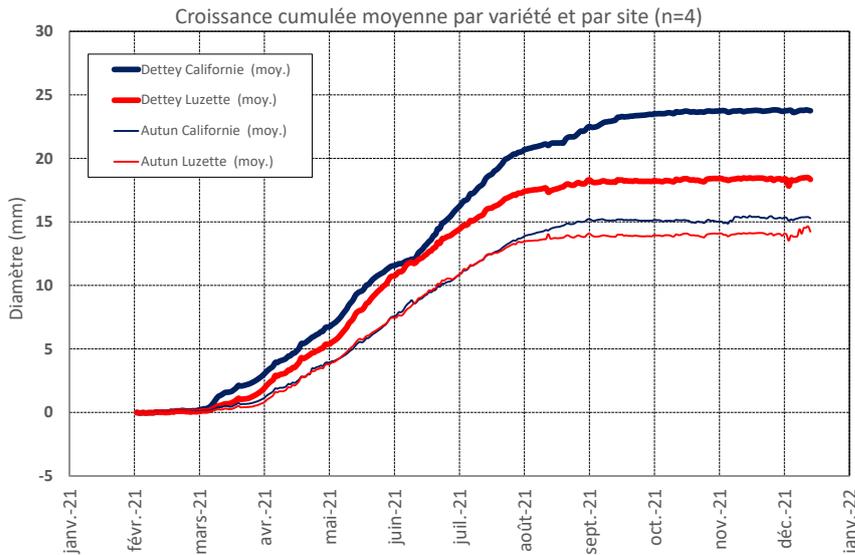


Figure 6 : Evolution de la croissance journalière cumulée moyenne par variété (Californie en bleu en Luzette en rouge) et par site (Dettey en trait épais et Autun en trait fin) en 2021.

3.5.3.3. Croissance secondaire journalière des Douglas durant l'année 2022 (résultats provisoires)

Nous avons réalisé la même extraction jusqu'au 31 août 2022 en utilisant que les données Sigfox. Elles comprennent donc quelques données manquantes (absence de transmission et seul le site de Dettey pour la variété Luzette est complet avec 4 arbres, les autres combinaisons ne permettent que de travailler pour l'instant sur 3 arbres sur les 4 par faute de connexion Sigfox suffisante. L'ensemble des données sera complété pour tous les arbres en fin d'année lors du téléchargement par radio sur chaque site.

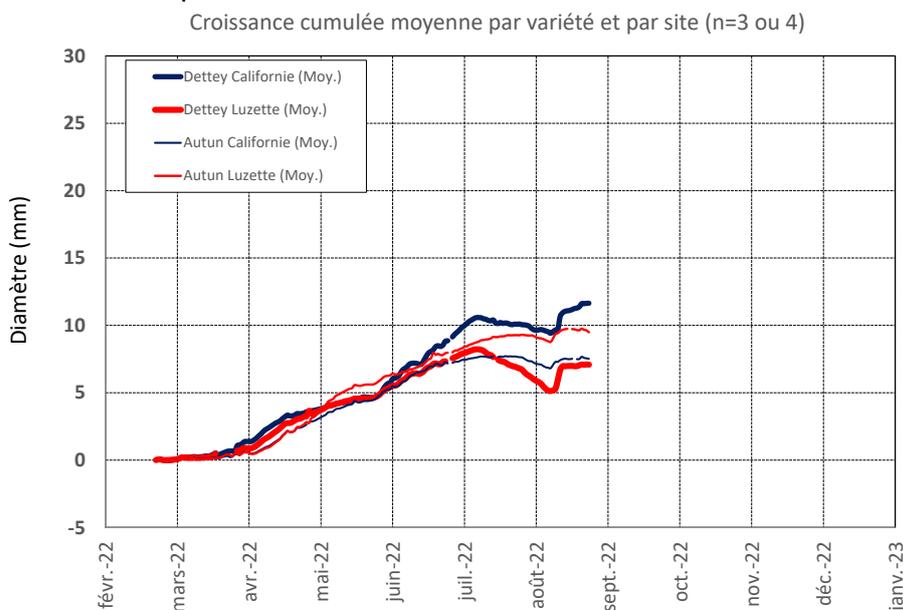


Figure 7 : Evolution de la croissance journalière cumulée moyenne (Californie en bleu en Luzette en rouge) et par site (Dettey en trait épais et Autun en trait fin) en 2022.

Même si nous n'avons pas encore une dynamique complète, le graphique ci-dessus montre de grandes différences par rapport aux résultats 2021. La réactivation cambiale semble plus homogène qu'en 2021 et légèrement plus tardive (fin avril). Les trois premiers mois de croissance semblent également assez semblables, par contre dès début juillet, la croissance se stoppe et on observe même une diminution du diamètre, indiquant clairement une forte contrainte hydrique en particulier pour les Douglas du site de Dettey. Cette diminution du diamètre est un peu plus tardive sur le site d'Autun et un peu moins marquée pour les deux variétés. Les orages de la mi-août permettent de récupérer l'eau cédée par les tissus de l'écorce pour la transpiration. Cette récupération n'est pas totale pour la variété Luzette à Dettey, alors que la variété Californie semble plus résiliente avec une croissance cambiale qui semble même repartir fin août après ces pluies d'orage.

Le graphique ci-dessous illustre cette différence de contrainte hydrique avec des amplitudes maximales de contraction (AMC) de 1 400 microns (Californie #16) contre 3 700 microns (Luzette #18) avec une récupération immédiate pour le premier arbre contre une récupération différée de plus d'une semaine pour le second arbre sur le site de Dettey.

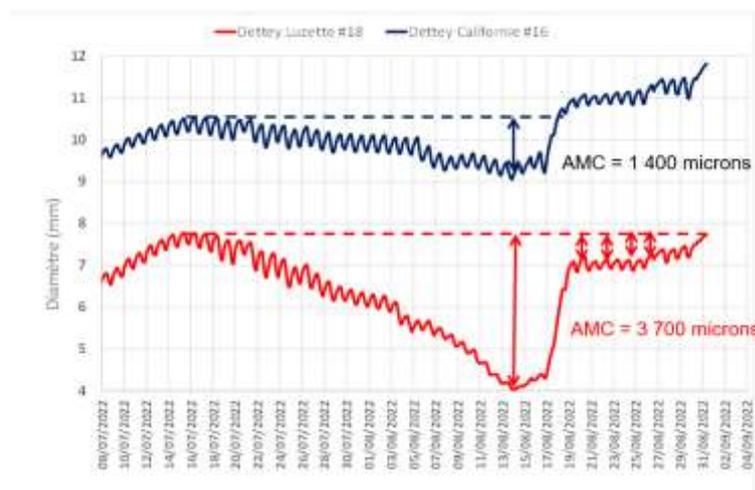


Figure 8 : Zoom sur les variations de diamètre du 8 juillet au 31 août 2022.

On observe une diminution chaque jour du diamètre des 2 arbres (Luzette #18 et Californie #16). Les réserves hydriques de l'écorce ne se reconstituent pas d'un jour sur l'autre et l'amplitude maximale de contraction augmente de jour en jour pour atteindre un niveau extrême de 1 400 microns pour Californie #16 et 3 400 microns pour le Luzette #18. Ce dernier arbre ne récupère pas la totalité des réserves hydrique perdues après les pluies d'orage (flèches rouges). Ce comportement est un indicateur de dommages cellulaires sur les tissus de l'écorce et il sera intéressant de voir comme se comporte cet arbre dans le reste de l'année et les prochaines années.

Fin août, le déficit de croissance pour la variété Californie est de 50 % pour le site de Dettey (24 mm en 2021 vs. 12 mm en 2022) contre 58 % pour Luzette (18 mm en 2021 vs. 7.5 mm) par rapport à l'année précédente à la même date. Pour le site d'Autun la diminution de croissance est équivalente (50%) pour Californie (15 mm en 2021 vs. 7.5 mm en 2022), alors que pour Luzette, la réduction (46%) à Autun est plus réduite (14 mm en 2021 vs. 7.5 mm en 2022).

3.5.3.4. Variations infra-journalière du diamètre du Douglas en fin d'hiver et au printemps.

La mesure continue du diamètre des troncs avec le système PépiPIAF nous donne accès au fonctionnement physiologique fin de cette espèce sempervirente. Nous pouvons ainsi en déduire que la température extérieure, même basse, n'a pas d'effet marqué sur le fonctionnement stomatique, avec des arbres qui continuent de transpirer en fonction de la demande climatique. Ainsi fin février, alors qu'on ne note aucune croissance du diamètre, l'arbre transpire tous les jours comme en atteste les contractions journalières de la figure ci-dessous. On observe chaque jour, une contraction du diamètre en opposition de phase avec la température, montrant que les stomates doivent s'ouvrir et que l'arbre transpire et mobilise ses réserves hydriques de l'écorce au profit de cette transpiration afin de maintenir au mieux son équilibre hydrique. Cette déshydratation journalière liée à la transpiration peut ainsi s'estomper par des pluies qui permettent alors la réhydratation de l'arbre, comme on peut l'observer le 5 mars 2021, journée où la température est restée autour de +5.0°C indiquant des conditions très couvertes à pluvieuses. On observe par la suite autour de la mi-mars une augmentation régulière du diamètre qui s'accélère à la fin mars avec des conditions thermiques très favorable à la croissance.

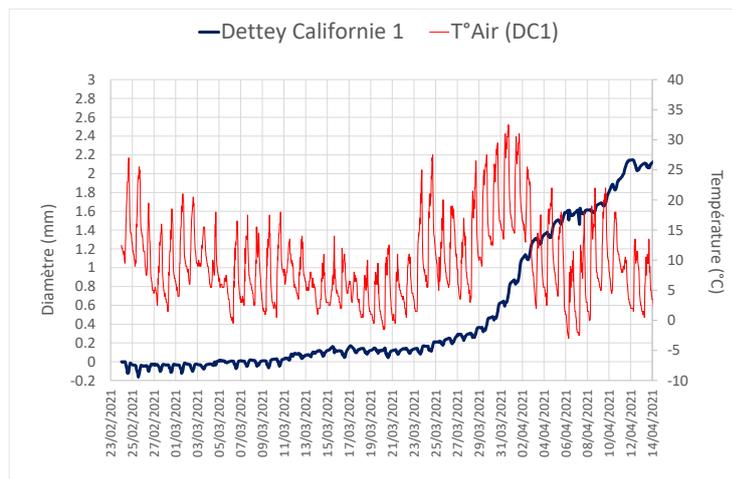


Figure 9 : Variations du diamètre de l'arbre Californie 1 sur le site de Dettey au début du printemps 2021.

Cette période est suivie le 6 et 7 avril 2021 de 2 jours où la température de l'air chute sous -3°C provoquant une contraction du diamètre d'environ 200 µm avec un dégel à la mi-journée suivi d'un nouveau gel jusqu'au jour suivant. Il est intéressant de noter que ce gel tardif, souvent problématique pour les cultures en pleine croissance, ne présente aucun dommage pour le Douglas, avec récupération totale du diamètre dès le dégel et une nouvelle contraction dans la même journée montrant que l'arbre transpire à nouveau. On peut noter d'ailleurs que la croissance en diamètre repart fortement après ces événements.

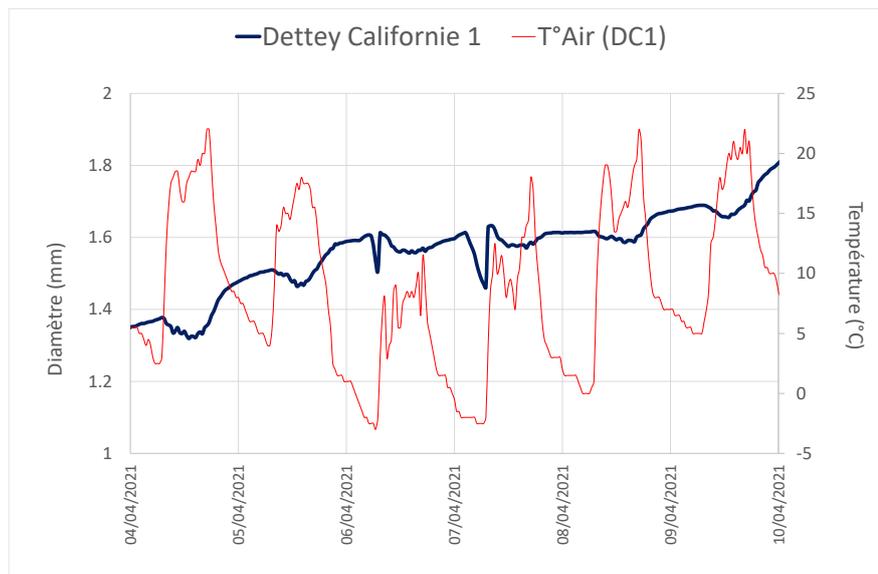


Figure 10 : Variations du diamètre de l'arbre Californie 1 sur le site de Dettey durant les 2 jours de gel tardif du 6 et 7 avril 2021.

3.5.4. Conclusions provisoires et perspectives

Cette étude a porté sur **2 variétés de douglas (Californie et Luzette)** sur les 8 disponibles sur le marché. Deux sites en Bourgogne, parmi les plus anciens des 6 sites existants (30 au niveau national) ont été installés le 21 avril 2009 à Autun et 24 avril 2009 à Dettey avec des plants d'un an. Nous avons donc suivi la 13^{ème} et 14^{ème} année de croissance, **deux années, très contrastées au niveau climatique.**

Comme nous l'avons écrit en introduction, les résultats antérieurs à cette étude (obtenus en 6^{ème} année de croissance) montraient une différence de croissance en hauteur pour la variété Californie dans les secteurs les plus favorables au Douglas, différence de croissance qui s'amenuisait lorsque les secteurs deviennent plus secs.

Dans le cadre de ce programme, nous avons donc cherché à préciser l'adaptation de cette variété, en comparaison avec la variété traditionnelle Luzette aux conditions climatiques de la Bourgogne. Nous nous sommes donc appuyés, non pas sur la croissance primaire, mais sur la mesure fine de la croissance secondaire en continu, ce qui nous permet de sortir différents paramètres écophysologiques à l'échelle infra-horaire et journalière, associés à des mesures de températures aux mêmes pas de temps.

Ce rapport préliminaire illustre quelques sorties possibles de ces mesures fines, comme la reprise d'activité cambiale, l'arrêt de cette activité cambiale, la réponse de l'arbre au gel hivernal ou de printemps, comme en 2021 et surtout la réponse de croissance en diamètre des arbres aux conditions édaphiques et aux périodes de sécheresse.

Il apparaît clairement, qu'une différence de réserve utile doit exister entre nos deux terrains expérimentaux. Le site de Dettey, le plus chaud dans nos mesures sur les 2 années 2021 et 2022 est aussi le plus sec au niveau du sol et l'année 2022 nous permet de bien le percevoir, avec un arrêt de croissance secondaire plus de 15 jours avant le site d'Autun et une contrainte hydrique très forte se

traduisant par une diminution forte du diamètre (jusqu'à 38% de la croissance en diamètre de l'année à la fin août).

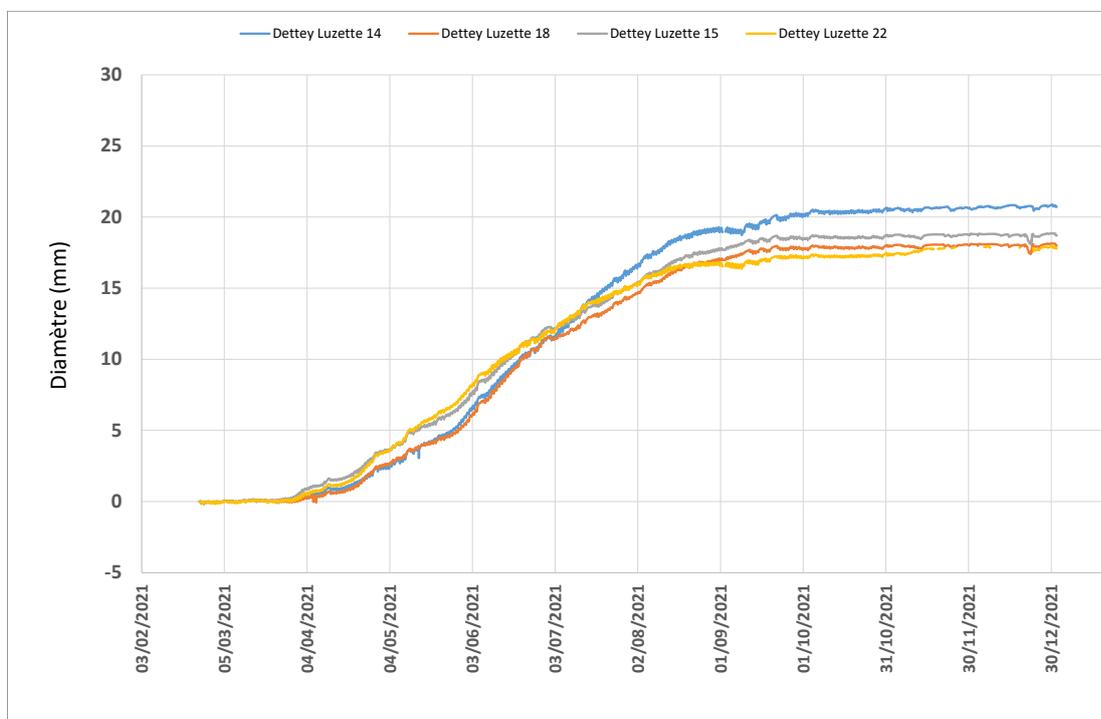
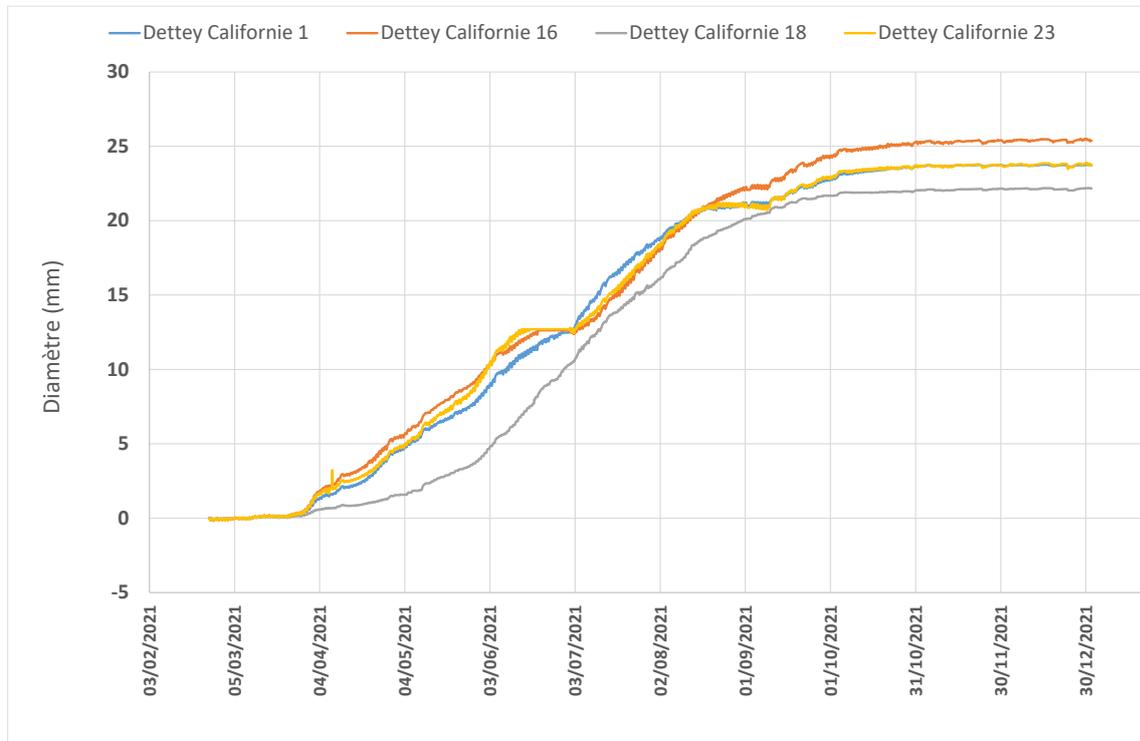
Il apparaît aussi clairement une différence de sensibilité à la contrainte hydrique des 2 variétés mesurées. *La variété Californie sur le site le plus contraint, résiste mieux à la contrainte hydrique et présente la meilleure croissance secondaire. Elle semble surtout être plus résiliente après le retour des pluies (redémarrage de la croissance) contrairement à la variété Luzette.*

Même si ces données restent à compléter et si l'analyse reste à parfaire, il nous semble en tout cas que ce suivi fin par micro-dendrométrie répond totalement aux objectifs, de comparer le comportement d'arbres de différentes variétés (Californie vs. Luzette) et de préciser les zones du territoire bourguignon où ces variétés seront les mieux adaptées (Autun vs. Dettey).

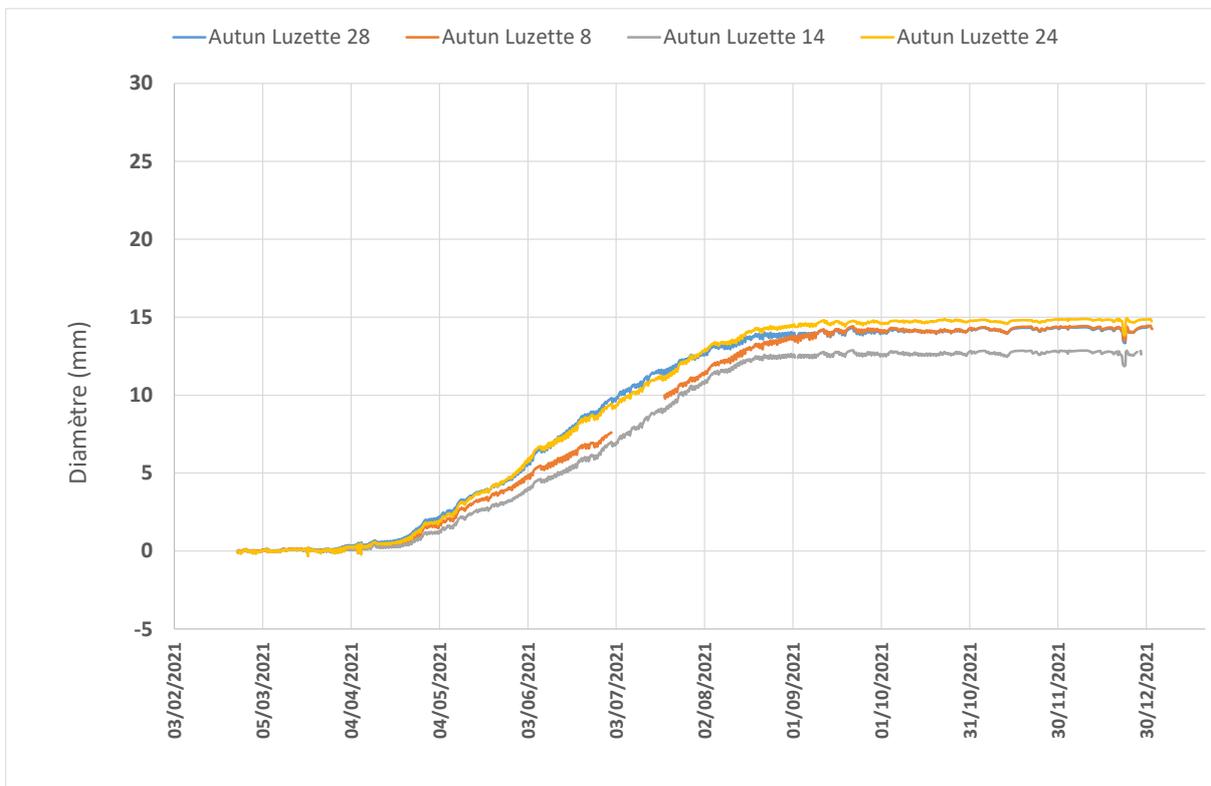
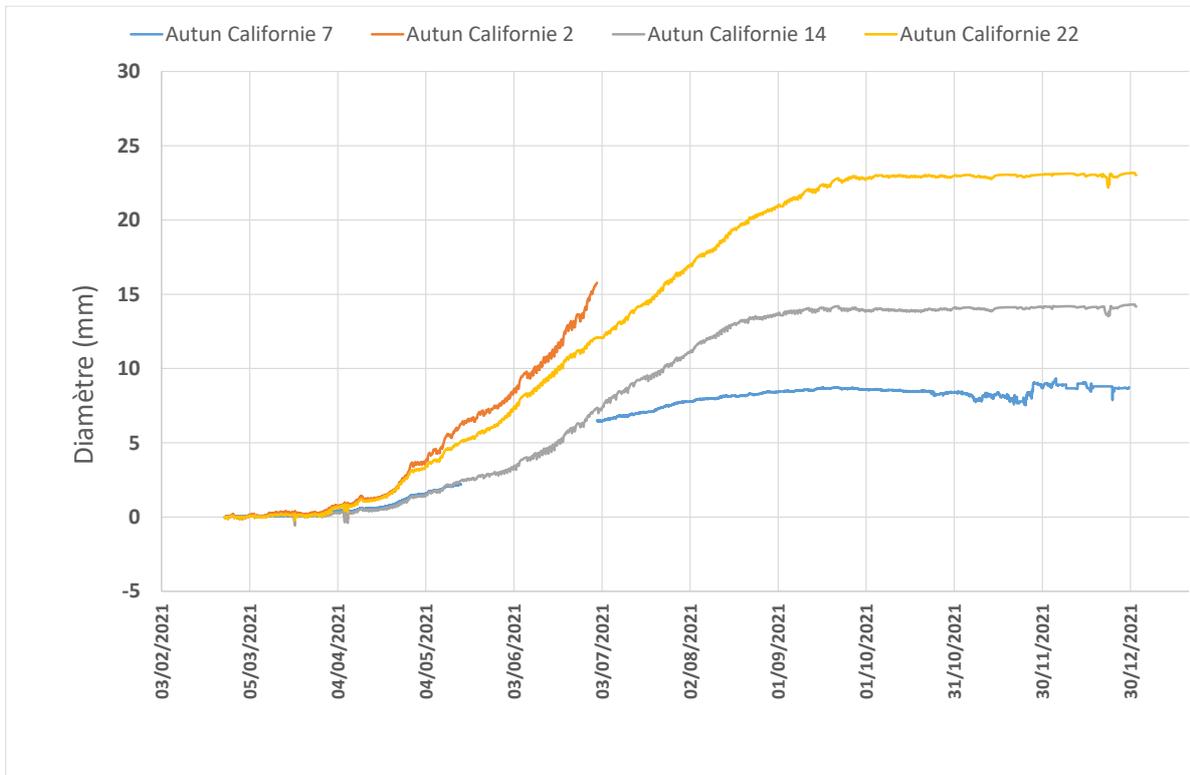
In fine, il nous semblerait intéressant de poursuivre ces mesures encore quelques temps pour observer les arrières effets de la sécheresse de 2022, particulièrement sévère sur la (les) année(s) de croissance suivante. Enfin la multiplication de ce type de mesures sur plus de variétés et plus de sites, permettraient certainement de mieux préciser les potentialités et limites du Douglas sur notre territoire national dans les climats futurs.

3.5.5. Courbes individuelles de croissance des différents arbres.

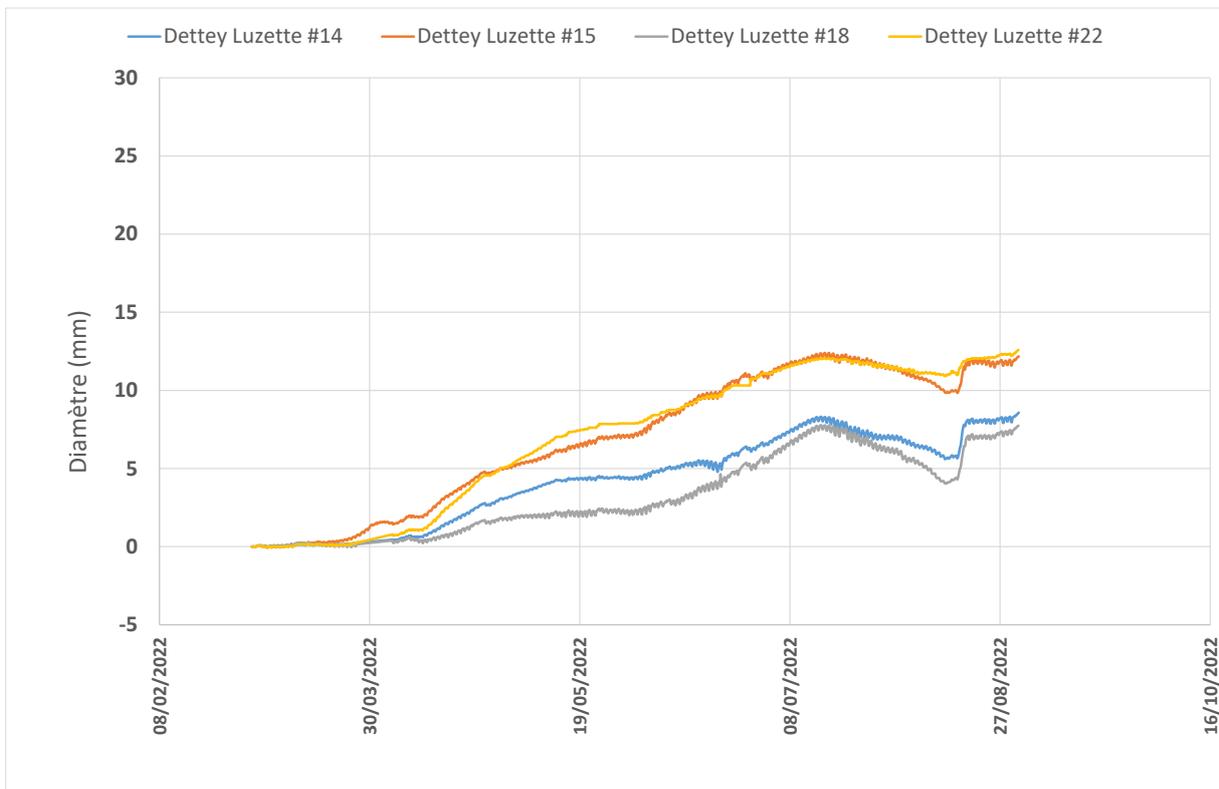
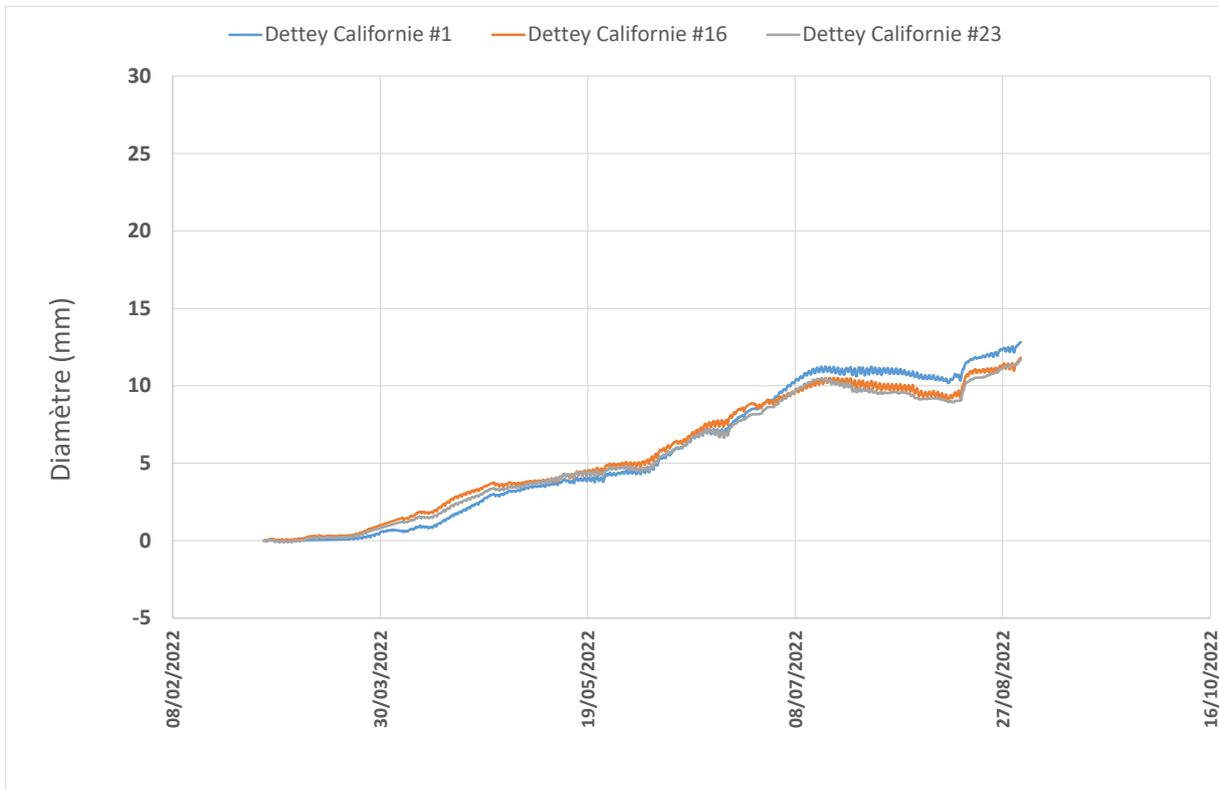
3.5.5.1. site de Dettey en 2021



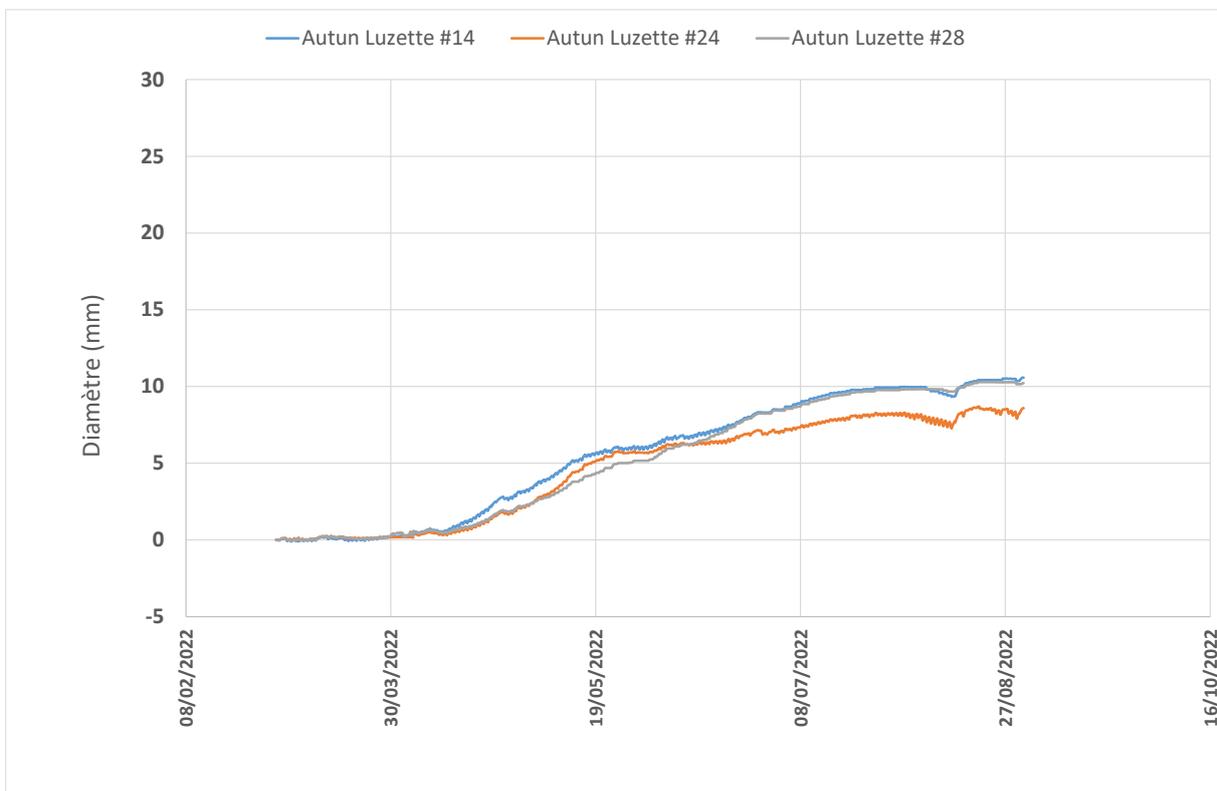
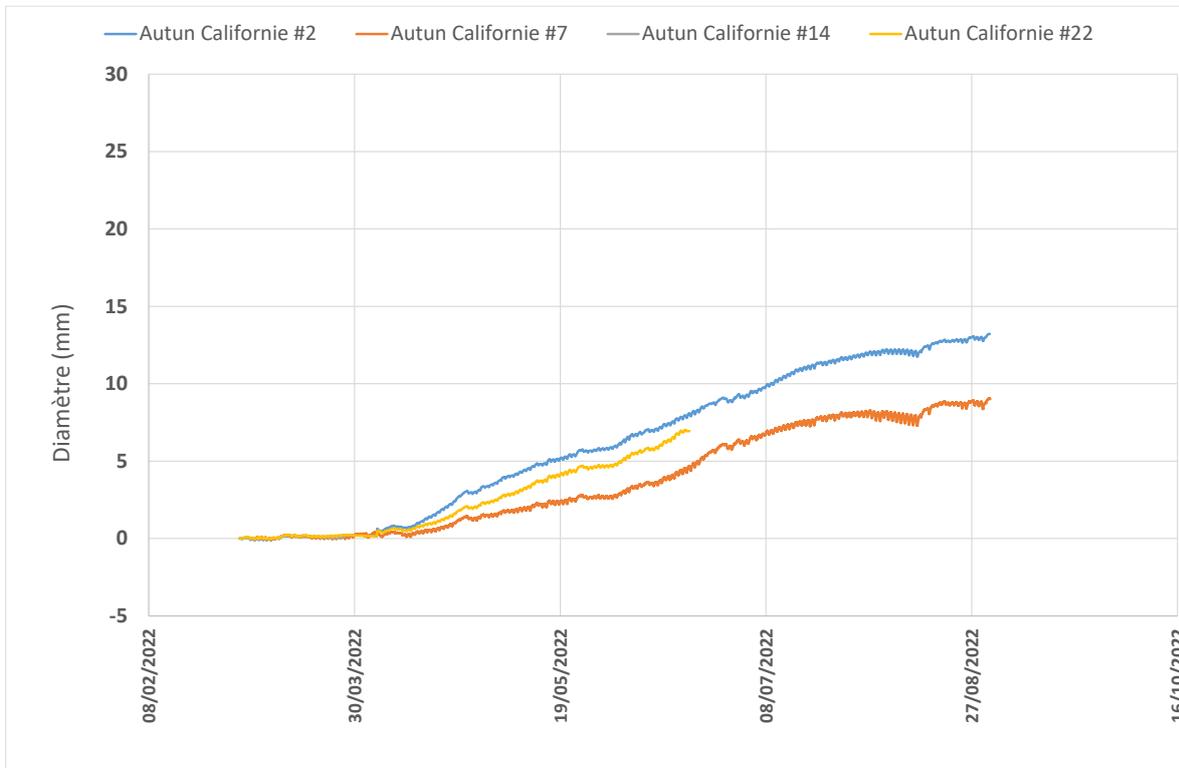
3.5.5.2. site d'Autun en 2021



3.5.5.3. site de Dettey en 2022



3.5.5.4. site d'Autun en 2022



Conclusion générale

Le projet « Changement climatique, quel avenir pour le douglas en Bourgogne ? » a permis d'approfondir notre connaissance du Douglas, ainsi que de lancer des expérimentations afin d'adapter cette production d'importance pour la filière bois Bourguignonne.

Le CNPF et ses partenaires (SF CDC, AFI) disposent dorénavant d'un **réseau** exhaustif de peuplements de référence, partout en Bourgogne. La connaissance fine de ces peuplements en leur état fin 2022 permettra de suivre attentivement leur évolution dans les années à venir, qui s'annoncent d'ores et déjà climatiquement difficiles. On note tout particulièrement que l'état sanitaire actuel des peuplements de Douglas est déjà assez dégradé en Bourgogne.

Le lancement d'une campagne de **plantations expérimentales** nous permet d'avoir de meilleures capacités à conseiller avec justesse propriétaires, gestionnaires et sylviculteurs qui s'inquiètent du renouvellement de leurs peuplements.

Les études de provenances menées par l'IDF nous encouragent à conseiller activement les sylviculteurs à mélanger les provenances de Douglas, et d'utiliser dans certaines conditions la **provenance Californie** qui, si elle n'a pas de performances forcément meilleures, permettra de diversifier le potentiel génétique des Douglas plantés en Bourgogne, notamment avec des capacités possibles de résistance aux fortes chaleurs.

Les travaux de l'INRAE BEF indiquent que la monoculture du douglas semble favoriser la **nitrification** dans les sols, et participe à l'augmentation des taux de nitrates dans les eaux de surface. Il serait recommandé de diversifier les plantations de Douglas en plein et d'avoir une approche mélangée à l'échelle des petits bassins versants.

BioClimSol, outil d'estimation du risque climatique a été testé au cours de cette campagne de mesures. Toutes ces mesures ont permis d'abonder la base de données du modèle de dépérissement du douglas. L'IDF a également produit des **cartes de vigilance**, destinées aux décideurs et aux aménagistes, qui permettent d'avoir une idée globale de la future aire de répartition du Douglas en Bourgogne si le réchauffement climatique se poursuit avec la même intensité.

Enfin, cette étude a permis de valider de nombreux concepts sylvicoles indiquant que l'augmentation de la **biodiversité** en forêt ainsi que l'augmentation du stock de **carbone** dans les sols forestier est favorable à l'adaptabilité des Douglasaies Bourguignonnes face au changement climatique.

Pour finir malgré tout sur une note optimiste : une grande majorité des acteurs de la filière Douglas avec qui nous avons pu travailler reste impressionnée par la **résistance du Douglas** face aux à-coups climatiques répétés qu'il subit depuis 2003.

Bibliographie partie 1 et 3.1 3.2 3.3

ALMEIDA ARAUJO Camille, CNPF Haut de France, 2020. Etude prospective sur les plantations mixtes en Hauts de France. Dominante d'approfondissement Gestion Forestière.

ANGELIER Ariane, 2007. Guide des sylvicultures Douglasaies françaises ONF.

ANGELIER Ariane, BAILLY Alain, 2004. Mise au point de scénarios de régénération naturelle du douglas pour le massif central. RDV technique n°6 2004, ONF, pp 64-68

BARBIER, Stéphane, GOSSELIN, Frédéric, BALANDIER, Philippe, 2008. Le mélange d'essences est-il favorable à la diversité végétale en forêt ? RFF LX, pp. 159-167.

BORDE Bruno, JAY Dominique, DIDELOT François, 2017. Le douglas dans le Massif Central : l'enjeu du renouvellement et considérations de sylvicultures. Forêt - entreprise No. 170, pp. 24-27.

BORDE Bruno, avril 2020. La régénération naturelle du douglas. Forêt de France No. 632, pp. 36-37.

BORDE Bruno, juillet 2020. Sylviculture du douglas en cycle long. Forêt entreprise No. 253, pp. 32-37.

BECQUEY, Jacques, 1992. A quelle densité planter des feuillus précieux ? : Quelques éléments de réflexion.... RFF XLIV, pp. 71-76.

BECQUEY, Jacques, 2006. L'accompagnement du planteur. Forêt - entreprise No. 170, pp. 56-57.

BECQUEY, Jacques, 2008. Les plantations mélangées par lignes remises au goût du jour. Forêt - entreprise No. 178, pp. 39-42.

BECQUEY, Jacques, 2008. Quelle plantation mélangée pour quel objectif ? Forêt - entreprise No. 178, pp. 10-11..

BECQUEY, Jacques, 2011. Retour sur un mélange... de connaissances et d'expériences. Forêt Wallonne No. 111, pp. 16-22.

BECQUEY, Jacques, 2013. Boisement mélangé : quand et comment ? Forêt - entreprise No. 209, pp. 18-19.

BLANCHIN, Julien, SINOU, Eric, 2017. La gestion des peuplements mélangés 1ère partie : concevoir

BOCK, Jérôme, RICHTER, Claudine, FRANC, Alain, 2005. Panorama : les forêts mélangées dans le Nord de la France. Rendez-vous techniques No.10, pp. 36-42.

BRANQUART, Étienne, DE KEERSMAEKER, Luc, 2010. Impact de la diversité ligneuse sur le fonctionnement des écosystèmes forestiers : Effet du mélange d'essences sur la biodiversité forestière. Forêt Wallonne No. 106, pp. 17-26.

BRISTOW, Mila, NICHOLS, Doland J, VANCLAY, Jérôme K, 2006. Mixed species plantations: prospects and challenges.

BRANG, BUGMANN, BÜRGI, MÜHLETHALER, RIGLING, SCHWITTER, 2008. Klimawandel del als waldbauliche herausforderungs. Journal forestier Suisse 159, pp. 362-373.

CALLAWAY, Ragan M, 1995. Positive interactions among plants. The Botanical Review 61, pp. 306-349.

CDAF, 2008. Guide n° 004 Normes de travaux forestiers : Méthodes de plantation.

CDAF, 2008. Guide n° 007 Orientation sylvicole : Peuplements mélangés Atouts, modalités, perspectives.

CIRAD, 2014. Plantations forestières : mélanger les espèces pour une meilleure exploration du sol par les racines.

CLAESSENS Hugues, 2016- Quelques considerations pour adapter nos forêts aux changements climatiques. SIVA BELGICA pp. 20-29.

CNPf, SEPTEMBRE 2022. BIOCLIMSOL référentiel technique.

CNPf, SEPTEMBRE 2022. BIOCLIMSOL aide à la décision.

CNPf, SEPTEMBRE 2022. BIOCLIMSOL notice de fonctionnement de l'outil.

CRPF BOURGOGNE, novembre 2008, La régénération du douglas en Morvan

CRPF BOURGOGNE, avril 2010, Quand récolter vos douglas ?

CRPF BOURGOGNE, septembre 2013, vers la futaie irrégulière de douglas.

CRPF PAYS DE LA LOIRE, 2011, Convention relative à la caractérisation des limites stationnelles et à la définition d'itinéraires sylvicoles pour le douglas en Pays de la Loire.

DEULEUZE, Christine, 2006. Plantations mélangées : une alternative aux plantations monospécifique d'épicéa ?. Forêt - entreprise No. 170, pp. 13.

DHÔTE, Jean-François, CORDONNIER Thomas, DREYFUS Philippe, LE GOFF Noël, Quelques enjeux autour des forêts hétérogènes tempérées. Rendez-vous techniques No. 10, pp. 22-31. ONF. 2005.

DI PLACIDO, Jonathan, BIGOT, Maryse, MICHAUD Daniel, DEULEUZE, Christine, PAIN Olivier, Plantations mélangées d'épicéa commun et de bouleau. Forêt - entreprise No. 170, pp. 19-20. CNPF. 2006.

DI PLACIDO, Jonathan, COLSON Vincent, MICHAUD Daniel, DEULEUZE, Christine, Plantations mélangées d'épicéa commun et de douglas. Forêt - entreprise No. 170, pp. 16-18. CNPF. 2006.

DOSSIER, Caroline, PAPLORAY, 2001. Vincent, Intérêt des mélanges d'essences en plantation : étude réalisée à partir de boisements mélangés en Basse-Normandie.

DRAFFs, 2014. Guide technique Réussir la plantation forestière : Contrôle et réception des travaux de reboisement 3ème édition.

DRENOU Christophe, ROSA Jerome, mai 2014. Comment le douglas réagit il aux sécheresses ?

DSF. Département Santé des Forêt, avril 2011. Bilan de la santé des forêts 2011, la nécrose cambiale en bandes en Bourgogne, un phénomène aux origines méconnues, pp. 1-7.

GOSSELIN Marion, KORBOULEWSKY Nathalie, IRSTEA, novembre 2018. Intérêt du mélange d'essences, productivité, résistance aux pathogènes, biodiversité, consommation en eau, pp 1-19.

IGN, 2019. Les forêts des Bourgogne Franche-Comté.

INRA, 2010. Les forêts mélangées moins infestées par les insectes ravageurs.

JACTEL, Hervé, BROCKERHOFF, Eckehard, 2007. Pourquoi les forêts mélangées sont plus résistantes aux attaques d'insectes ravageurs. REGEFOR 2007, Atelier Recherche et Gestion Forestière « Forêts mélangées : quels scénarios pour l'avenir? », 26-28 Juin 2007, Nancy (Champenois).

JACTEL, Hervé, 2018. Plaidoyer pour les forêts mélangées. Fondation pour la Recherche sur la Biodiversité. pp. 1-3.

KORBOULEWSKY, Nathalie, BALANDIER, Philippe, DUMAS Yann, GOSSELIN Marion, MARELL Anders, PEROT, Thomas, 2020. Quels intérêts et limites du mélange d'essence face aux changements globaux ? Forêt - entreprise No. 252, pp. 60-64.

LEMAIRE Jean, 2017. BIOCLIMSOL: un outil de vigilance climatique appliqué au douglas. Forêt - entreprise No. 170, pp. 28-32.

LEMAIRE Jean, janvier 2013. Comment intégrer le risque sécheresse dans la gestion du douglas ? Forêt - entreprise No. 208, pp. 37-42.

LANDEAU, Sandrine, LANDMANN, Guy, 2008. Les peuplements forestiers mélangés. Introduction aux ateliers Recherche et Gestion forestière (Regefor) 2007. RFF LX, pp. 99-105.

LANIER, Louis. 1992. La forêt doit-elle être mélangée ? RFF XLIV, pp. 105-128. 45

LEGAY, Myriam, CORDONNIER, Thomas, DHOTE, Jean-François, 2008. Des forêts mélangées pour composer avec les changements climatiques. RFF LX, pp. 181-190.

LEGAY, Myriam, LE BOULER Hervé, 2014. Éléments d'histoire et de répartition géographique des essences forestières introduites en France métropolitaine. Projet NOMADES - Fascicule 1.

MALLET, J, 1963. Réflexion et observation sur quelques mélanges résineux - feuillus. RFF, pp. 537-540.

MEREDIEU, Céline, BAILLY, Alain, BASTIEN, Jean-Charles, BERTHELOT, Alain, CAILLY, Priscilla, DANJON, Frédérique, FIQUEPRON Julien, GIRARD, Sabine, MARRON, Nicolas, MERZEAU, Dominique, ORAZIO, Christophe, PASTUSZKA, Patrick, RAFFIN, Annie, RICHTER Claudine, RIOU-NIVERT Philippe, 2019. Définir une densité de plantation comment et pour quels objectifs ? Colloque « Dernières innovation sur la plantation forestière », 19 mars 2019, Paris.

MICHALET, Richard, PAGES, Jean-Philippe, SACCONI, Patrick, BRUN, Jean-Jacques, 2008. Les interactions entre espèces d'arbres dans les mélanges illustrées par le cas des feuillus et des conifères dans les forêts de montagne. RFF LX, pp. 139-153.

MOISAN Chantale, BOUTTIER Léa, PAYEUR Marie-Ève, DAIGLE Stéphane, COGLIASTRO Alain, 2008. Plantations mélangées pour accompagner le feuillu noble. Institut de recherche en biologie végétale, université de Montréal, pp 1-99.

MORNEAU, François, DUPREZ, Cédric, HERVE, Jean-Christophe, 2008. Les forêts mélangées en France métropolitaine. Caractérisation à partir des résultats de l'Inventaire forestier national. RFF LX, pp. 107-120.

MORNEAU, François, VALLET, Patrick, TOÏGO, Maude, DALMASSO, Marine, 2016. Les forêts mélangées. L'IF La feuille de l'Inventaire Forestier National.

MOYSES, François, 2020. Les associations d'essence en plantations mélangées Approches fondamentales et illustrations chênes/résineux. Silva Belgica No.1, pp. 36-45.

PEROT, Thomas, DEULEUZE, Christine, JARRET, Pascal, MORNEAU, François, 2011. Mélange d'essences et productivité application au mélange chêne sessile – pin sylvestre en forêt domaniale d'Orléans. Rendez-vous techniques No. 33-34, pp. 11-17.

PEROT, Thomas, VALLET, Patrick, 2012. Des forêts mélangées. une stratégie pour produire du bois face aux enjeux énergétiques et climatiques ?. Sciences Eaux & Territoires – Cahier spécial No. 2, pp. 6-11.

PHILIP, Leanne, SIMARD, Suzanne, JONES, Melanie, 2010. Pathways for below-ground carbon transfer between paper birch and Douglas-fir seedlings. Plant Ecology & Diversity v.3, pp. 221-233.

PICHARD Gilles, CRPF Bretagne. Gestion des peuplements mélangés feuillus-résineux, pp1-8.

RAKOTOARISON, Hanitra, CAILLY, Priscilla, DELEUZE, Christine, RICHTER, Claudine, BERTHELOT, Alain, 2015. Plantations résineuses en conditions forestières : analyse économique des itinéraires dédiés et semi-dédiés pour augmenter la production de bois. RFF LXVII, pp. 515-538.

RASSE Nicolas, CRPF Bourgogne, 2012. Le traitement irrégulier appliqué aux peuplements de douglas ou de pins purs et mélangés en Bourgogne.

RIOU-NIVERT Philippe et le groupe des correspondants douglas du CNPF, 2020. Des itinéraires sylvicoles diversifiés pour le douglas.

SARDIN, Thierry, BOCK, Jérôme, BECQUEY, Jacques, 2008. Les peuplements mélangés : enjeux et interrogations des gestionnaires. RFF LX, pp. 121-128.

SCHÜTZ, Jean-Philippe, 1990. Sylviculture 1: principes d'éducation des forêts. Presses polytechniques et universitaires romandes.

SCHÜTZ, Jean-Philippe, 1997. Sylviculture 2: la gestion des forêts irrégulières et mélangées. Presses polytechniques et universitaires romandes.

SERGENT Anne-Sophie, BREDA Nathalie, NAGELEISEN Louis-Michel, janvier 2013. Chronique de dépérissements de douglas en France depuis 1989. Forêt - entreprise No. 208, pp. 16-18.

SERGENT Anne-Sophie, BREDA Nathalie, janvier 2013. Récent dépérissement du douglas : des sécheresses extrêmes et récurrentes en cause. Forêt - entreprise No. 208, pp. 19-23.

SERGENT Anne-Sophie, BREDA Nathalie, octobre 2010. Facteurs de vulnérabilité du douglas face aux aléas climatiques.

SRFB, 2018. Mieux Exploiter la diversité Le point sur les essais de damiers en mélanges associatif.

TOÏGO, Maude, PEROT, Thomas, COURBAUD Benoît, VALLET Patrick, 2016. Productivité des peuplements mélangés : quels effets des conditions environnementales dans les peuplements bi-spécifiques ?. Rendez-vous techniques No. 53, pp. 46-53.

ERHEYEN, Kris, BRANQUART, Étienne, 2010. La recherche sur la biodiversité et le fonctionnement des écosystèmes forestiers. Forêt Wallonne No. 106, pp. 6-16.

WILHELM, Georg Josef, RIEGER, Helmut, 2017. Stratégie QD. Une gestion de la forêt basée sur la qualité et les cycles naturels. CNPF et Forêt Wallonne asbl.

Bibliographie partie 2.2

- Augusto L (1999) Etude de l'impact de quelques essences forestières sur le fonctionnement biogéochimique et la végétation de sols acides. These de doctorat, Nancy 1
- Florio A, Marechal M, Legout A, et al (2021) Influence of biological nitrification inhibition by forest tree species on soil denitrifiers and N₂O emissions. *Soil Biol Biochem* 108164. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2021.108164>
- 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. *Ecol Model* 116:269–283. [https://doi.org/10.1016/S0304-3800\(98\)00205-1](https://doi.org/10.1016/S0304-3800(98)00205-1)
- Legout A, van der Heijden G, Jaffrain J, et al (2016) Tree species effects on solution chemistry and major element fluxes: A case study in the Morvan (Breuil, France). *For Ecol Manag* 378:244–258. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2016.07.003>
- Prietzl J, Bachmann S (2012) Changes in soil organic C and N stocks after forest transformation from Norway spruce and Scots pine into Douglas fir, Douglas fir/spruce, or European beech stands at different sites in Southern Germany. *For Ecol Manag* 269:134–148. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2011.12.034>
- Schuldt A, Scherer-Lorenzen M (2014) Non-native tree species (*Pseudotsuga menziesii*) strongly decreases predator biomass and abundance in mixed-species plantations of a tree diversity experiment. *For Ecol Manag* 327:10–17. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2014.04.036>
- Tschopp T, Holderegger R, Bollmann K (2014) Auswirkungen der Douglasie auf die Waldbiodiversität: Eine Literaturübersicht
- van der Heijden G, Belyazid S, Dambrine E, et al (2017) NutsFor a process-oriented model to simulate nutrient and isotope tracer cycling in forest ecosystems. *Environ Model Softw* 95:365–380. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2017.06.003>
- van der Heijden G, Legout A, Pollier B, et al (2013) Tracing and modeling preferential flow in a forest soil — Potential impact on nutrient leaching. *Geoderma* 195–196:12–22. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2012.11.004>
- Zeller B, Legout A, Bienaimé S, et al (2019) Douglas fir stimulates nitrification in French forest soils. *Sci Rep* 9:1–11. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-47042-6>

Bibliographie partie 2.3.1

Augusto, L., Saint-André, L., Bureau, F., Derrien, D., Pousse, N., Cécillon, L., 2019. Séquestration de carbone organique dans les sols forestiers : impacts de la gestion sylvicole. Forêt Entreprise 245, 62–66.

Harmon, M.E., Sexton, J., 1996. Guidelines for measurements for woody detritus in forest ecosystems (No. 20). LTER Network, College of Forest Resources, University of Washington, Seattle.

Harmon, M.E., Woodall, C.W., Fasth, B., Sexton, J., Yatkov, M., 2011. Differences between standing and downed dead tree wood density reduction factors: A comparison across decay classes and tree species. Res. Pap. NRS-15. Newtown Square, PA: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Northern Research Station. 40 p. 15, 1–40. <https://doi.org/10.2737/NRS-RP-15>

MAA et IGN, 2021. Indicateurs de gestion durable des forêts françaises métropolitaines. <https://foret.ign.fr/IGD/>

Roux, A., Dhôte, J.-F., Achat, D., Bastick, C., Colin, A., Bailly, A., Bastien, J.-C., Berthelot, A., Bréda, N., Cauria, S., Carnus, J.-M., Gardiner, B., Jactel, H., Leban, J.-M., Lobianco, A., Loustau, D., Meredieu, C., Marcais, B., Martel, S., Moisy, C., Picart, D., Rigolot, E., Saint-André, L., Schmitt, B., 2017. Quel rôle pour les forêts et la filière forêt-bois françaises dans l'atténuation du changement climatique ? Une étude des freins et leviers forestiers à l'horizon 2050. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.20800.12805>

Bibliographie partie 3.4

- e) Bastien J.C., Philippe G., Rousselle Y., Sanchez L., Chaumet M., Girard S., 2021. Les variétés améliorées de Douglas en France. *Schweis. Z. Forstwes* 172 (2) : 76-83<<;
- f) Boiffin, J., Badeau, V., Breda, N. 2017. Species distribution models may misdirect assisted migration: insights from the introduction of Douglas-fir to Europe. *Ecological Applications* 27(2): 446–457.
- g) Isaac-Renton, M., Roberts, D., Hamann, A., Spiecker, H. 2014. Douglas-fir plantations in Europe: a retrospective test of assisted migration to address climate change. *Global Change Biology* (2014) 20, 2607–2617.
- h) Lupi E. 2016. Performance of Douglas-fir provenances from California in France and other Atlantic Europe regions; opportunities and risks in a changing climate context. Master Thesis. Univ Freiburg. 82 p.
- i) Rousselle Y., Bastien J.C., François D., Girard S., Gobin R., Matz S., Veisse D., Philippe G. 2018. Evaluation des vergers à graines français de Douglas : résultats des tests à 5 ans. Présentation. 3èmes Assises Nationales du Douglas, Bordeaux, 20 & 21 septembre 2018.
- j) Sergent, A.S. 2011. Diversité de la réponse au déficit hydrique et vulnérabilité au dépérissement du Douglas. Thèse de doctorat – Université d'Orléans. 209 p.

Index des principaux sigles et abréviations

AFI : Association Futaie Irrégulière
BFC : Bourgogne Franche-Comté
BTA : Boisement de Terres Agricoles
CETEF : Centre d'Etudes Techniques et Economiques Forestières
CNPf : Centre National de la Propriété Forestière
CRPF : Centre Régional de la Propriété Forestière
DDT : Direction Départementale des Territoires
DRAAF : Direction Régionale de l'Alimentation, l'Agriculture et de la Forêt
DREAL : Direction Régionale de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement
DSF : Département santé des forêts
EG : Éléments Grossiers
FAO : Food and Agriculture Organization
FEADER : Font Européen Agricole pour le Développement Rural
FFN : Fonds Forestier National
FORBIO : Évaluation des effets de la diversité d'essence sur la biodiversité et le fonctionnement des écosystèmes forestiers
FORECCAsT : Forêt et Changements Climatiques
GRECO : Grande région écologique
GFP : Gestionnaire Forestier Professionnel
IDF : Institut pour le Développement Forestier
IGN : Institut national de l'information géographique et forestière
INRA : Institut National de la Recherche Agronomique
INRAE : Institut National de Recherche pour l'Agriculture, l'Alimentation et l'Environnement
MAAF : Ministère de l'Agriculture, de l'Alimentation et de la Forêt
MFR : Matériel forestier de reproduction
ONF : Office National des Forêts
PEI : Partenariat Européen pour l'Innovation
PSG : Plan Simple de Gestion
RFF : Revue Forestière Française
RU : Réserve utile
SER : Sylvoécocorégion
SF - CDC : Société Forestière de la Caisse des Dépôts et Consignations
WSL : Institut fédéral de recherches sur la forêt, la neige et le paysage