



HAL
open science

Diversité des variétés forestières améliorées du Douglas (*Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco var. *menziesii*) en France : Intérêts et perspectives dans le contexte du changement climatique. Mémoire de fin d'études pour la dominante d'approfondissement Gestion Forestière

Baptiste Antoine

► **To cite this version:**

Baptiste Antoine. Diversité des variétés forestières améliorées du Douglas (*Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco var. *menziesii*) en France : Intérêts et perspectives dans le contexte du changement climatique. Mémoire de fin d'études pour la dominante d'approfondissement Gestion Forestière. Biologie végétale. 2024. hal-04801997

HAL Id: hal-04801997

<https://hal.inrae.fr/hal-04801997v1>

Submitted on 25 Nov 2024

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

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



Distributed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License

Diversité des variétés forestières
améliorées du Douglas (*Pseudotsuga
menziesii* (Mirb.) Franco var.
menziesii) en France :
Intérêts et perspectives dans le
contexte du changement climatique.



Diversité des variétés forestières
améliorées du Douglas (*Pseudotsuga
menziesii* (Mirb.) Franco var.
menziesii) en France :
Intérêts et perspectives dans le
contexte du changement climatique.

Mémoire pour la dominante d'approfondissement Gestion Forestière

FICHE SIGNALÉTIQUE D'UN MÉMOIRE DE FIN D'ÉTUDES

AgroParisTech	Mémoire de fin d'études
Titre : Diversité des variétés forestières améliorées du Douglas (<i>Pseudotsuga menziesii</i>) (Mirb.) Franco var. <i>menziesii</i>) en France : Intérêts et perspectives dans le contexte du changement climatique.	Mots clés : <i>Pseudotsuga menziesii</i> ; douglas ; changement climatique ; verger à graines ; PME-002 Luzette ; PME-006 Californie ; dendromètres automatiques ; potentiel de production ; comparaison de provenance
Auteur : Baptiste ANTOINE	Année : 2024
Caractéristiques : 1 volumes ; 80 pages ; 9 figures ; 7 annexes ; 0 cartes ; bibliographie	

CADRE DU TRAVAIL

Organisme de stage : Institut national de recherche pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement (INRAE)		
Nom du responsable : Aurore DESGROUX		
Fonction : Ingénieure ressources génétiques forestières		
Nom de l'enseignant référent d'AgroParisTech : Myriam LEGAY		
<input type="checkbox"/> 1A <input type="checkbox"/> 2A <input checked="" type="checkbox"/> 3A	<input type="checkbox"/> Stage entreprise <input type="checkbox"/> Stage assistant ingénieur <input checked="" type="checkbox"/> Stage fin d'études Date de remise :	<input type="checkbox"/> Autre

SUITE À DONNER (à compléter par AgroParisTech)

<input type="checkbox"/> Consultable et diffusable <input type="checkbox"/> Confidentiel de façon permanente <input type="checkbox"/> Confidentiel jusqu'au/...../..... , puis diffusable

Engagement de non-plagiat

❶ Principes

- Le plagiat se définit comme l'action d'un individu qui présente comme sien ce qu'il a pris à autrui.
- Le plagiat de tout ou partie de documents existants constitue une violation des droits d'auteur ainsi qu'une fraude caractérisée.
- Le plagiat concerne entre autres : des phrases, une partie d'un document, des données, des tableaux, des graphiques, des images et des illustrations.
- Le plagiat se situe plus particulièrement à deux niveaux : ne pas citer la provenance du texte que l'on utilise, ce qui revient à le faire passer pour sien de manière passive ; recopier quasi intégralement un texte ou une partie de texte, sans véritable contribution personnelle, même si la source est citée.

❷ Consignes

- Il est rappelé que la rédaction fait partie du travail de création d'un rapport ou d'un mémoire ; en conséquence lorsque l'auteur s'appuie sur un document existant, il ne doit pas recopier les parties l'intéressant mais il doit les synthétiser, les rédiger à sa façon dans son propre texte.
- Vous devez systématiquement et correctement citer les sources des textes, parties de textes, images et autres informations reprises sur d'autres documents, trouvés sur quelque support que ce soit, papier ou numérique en particulier sur internet.
- Vous êtes autorisés à reprendre d'un autre document de courts passages *in extenso*, mais à la stricte condition de les faire figurer entièrement entre guillemets et d'en citer la source.

❸ Sanctions


- En cas de manquement à ces consignes, la direction des études et de la pédagogie ou le correcteur se réservent le droit d'exiger la réécriture du document sans préjuger d'éventuelles sanctions disciplinaires.

❹ Engagement

Je soussigné **Baptiste ANTOINE** reconnais avoir lu l'engagement de non-plagiat et je m'engage à le respecter.

À Nogent-sur-Vernisson, le 27 août 2024.

Signature :



Commanditaire

Ce travail a été mené sous l'égide de l'Institut national de recherche pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement et du réseau d'évaluation et d'homologation des variétés issues des vergers à graines de l'État.

Jury de soutenance

Président du jury :

Max BRUCIAMACCHIE (AgroParisTech)

Enseignante référente :

Myriam LEGAY (AgroParisTech)

Référente dans l'organisme :

Aurore DESGROUX (INRAE)

Personnalité extérieure :

Marin CHAUMET(FCBA)

Responsables de la dominante :

Max BRUCIAMACCHIE (AgroParisTech)

Eric LACOMBE (AgroParisTech)

Mémoire

soumis pour satisfaire aux conditions requises pour l'obtention du titre d'ingénieur diplômé de l'Institut des sciences et industries du vivant et de l'environnement, et défendu le 11 septembre 2024 à 10 h sur le campus de Nancy.

Forestry isn't rocket science. It is much more complicated.

Fred L. Bunnell (1999)

Remerciements

Ainsi s'approche la dernière ligne droite de plus de trois années passées au domaine des Barres. Une dernière ligne droite pour le moins chaotique, ressemblant peut-être davantage à une courbe issue d'un dendromètre automatique avec ses nombreuses fluctuations caractérisant la croissance radiale des arbres.

Je voulais avant exprimer ma profonde gratitude à Aurore, ma responsable d'apprentissage de ces trois dernières années. Merci pour la confiance que tu m'as témoignée en me permettant d'intégrer la feu et regrettée équipe GeeDAAF. Aurore, merci pour tes conseils qui m'ont guidé et éclairé tout au long de ces trois années, ainsi que pour le temps que tu m'as consacré, entre réunions de suivi, échanges informels et relectures de rapports.

Stéphane, Nathan, merci à vous pour toutes les heures passées à discuter de cette drôle de bête qu'est le douglas. Merci d'avoir toujours été volontaires chaque fois que je proposais de retourner, pour une énième fois, sur le dispositif de la route d'Adon pour réaliser des mesures. Manon, Sylvia, Théo, merci pour les discussions et conseils sur l'analyse des données, les nombreuses relectures, et tant d'autres choses encore.

Un grand merci également au réseau VFA – Douglas, tout particulièrement à Rémy, Jean-Charles, Sabine, Yves et Didier. Merci à vous pour le temps que vous m'avez accordé, pour tous les conseils et idées que vous m'avez transmis. Cette étude n'aurait pas été possible sans les données produites dans le cadre de ce réseau. Un immense merci à toutes les personnes impliquées de près ou de loin dans l'installation des plus de 40 000 douglas constituant la base du réseau, ainsi qu'à celles ayant participé aux campagnes de mesures. Plus de 245 000 données de hauteurs et circonférences ont été récoltées depuis 2009, un travail de longue haleine, sans lequel beaucoup de choses ne seraient pas réalisables.

Cécile, Vincent, Charles, Mathilde, Sandrine, Thomas, Jean-Pierre, Olivier, Sonia, Isabelle, Nathalie, Aviva, Lisa, Agnès, Carl, Hilaire, Philippe, Marion, Frédéric, Sylvie : merci pour les échanges que nous avons eus, souvent pendant les temps de pause ou au détour d'un couloir, et qui ont nourri mes réflexions. Des oublis se glisseront malheureusement dans cette énumération, mais j'ai une pensée particulière pour les moments de sport, de jeux de société, et de vie partagés avec Théo, Guilhem, Claire, Aristide, Manon, Nathan, Aurore, Cécile, Léa, Marie, Mathéo, Agathe, Antoine, Grégoire, Raphaëlle, Julia, Vincent, et toutes celles et ceux que j'oublie bien

malencontreusement. Merci aux membres de l'unité EFNO, à ceux qui ont pris le temps de me faire découvrir leurs domaines d'études. Ces trois années parmi vous m'auront fait grandir.

Merci également à Philippe Riou-Nivert, Leopoldo Sanchez-Rodriguez, et Thierry Ameglio pour les échanges enrichissants que nous avons eus dans le cadre de cette étude.

Je souhaite aussi remercier Myriam Legay pour son suivi attentif tout au long de ma scolarité à AgroParisTech, ainsi que pour ses précieuses relectures qui ont tant contribué à mon travail.

Enfin, un grand merci à Max Bruciamacchie d'avoir accepté de présider mon jury de soutenance, et à Marin Chaumet pour sa participation en tant que membre extérieur.

Merci à vous tous !

Baptiste ANTOINE

Domaine des Barres, Nogent-sur-Vernisson

29 août 2024

Résumé

Le douglas est la seconde essence la plus plantée en France. Huit vergers à graines ont été installés en France entre 1978 et 1989 pour assurer la production en graines. La descendance d'un des vergers (*Californie* – origine sud de l'aire naturelle) a montré des différences de phénologie et de croissance juvénile comparativement aux autres vergers (origine nord de l'aire naturelle).

L'étude vise à évaluer l'intérêt que représente cette diversité génétique (entre les vergers) dans le contexte du changement climatique. Deux dispositifs comparant les descendants des vergers *Californie* et *Luzette*, purs ou en mélange pied à pied, ont été mesurés entre 2020 et 2023 pour le débourrement et avec des dendromètres automatiques.

Les résultats de quatre années au climat contrasté montrent que les descendants des deux vergers semblent avoir des stratégies différentes en réponse à une sécheresse, en fonction de sa période d'occurrence et de son intensité, sans pouvoir conclure à une meilleure tolérance. La descendance du verger *Californie* subie une concurrence accrue en mélange du fait de sa croissance juvénile inférieure, tout en permettant de constituer un peuplement de qualité en placeaux purs.

Cette étude permet d'étendre les connaissances sur le potentiel d'adaptation à la sécheresse des ressources génétiques de douglas françaises et de mieux définir les limites d'utilisation.

Mots clefs : *Pseudotsuga Menziesii*, douglas, changement climatique, vergers à graines, PME-VG-002 Luzette, PME-VG-006 Californie, dendromètres automatiques, sécheresse, potentiel de production, comparaison de provenance

Abstract

Douglas-fir is the second most planted species in France. Eight seed orchards were established in France between 1978 and 1989 to ensure seed production. The progeny of one of the orchards (California – from the southern part of the natural range) has shown differences in phenology and juvenile growth compared to the other orchards (from the northern part of the natural range). The study aims to assess the value of this genetic diversity (between orchards) in the context of climate change. Two experiments comparing the progeny from the California and Luzette orchards, either pure or mixed on a tree-by-tree basis, were measured between 2020 and 2023 for bud break and with automatic dendrometers. The results from four years of contrasting climates show that the progeny from the two orchards seem to have different strategies in response to drought, depending on its timing and intensity, without concluding a better tolerance. The progeny from the California orchard experiences increased competition in mixtures due to its inferior juvenile growth, while allowing for the establishment of a high-quality stand in pure plots. This study expands knowledge on the drought adaptation potential of French Douglas-fir genetic resources and helps define the limits of their use. Keywords: *Pseudotsuga menziesii*, Douglas-fir, climate change, seed orchards, PME-VG-002 Luzette, PME-VG-006 California, automatic dendrometers, drought, production potential, provenance comparison

Table des matières

Liste des figures	xii
Liste des tableaux	xiii
Glossaire	xiv
Introduction	1
1 Enjeux et problématique	2
1.1 Le douglas en France	2
1.2 Intérêt du douglas face au changement climatique	7
1.3 Problématique de travail	13
2 Matériel et méthodes	15
2.1 Description des matériels de reproduction utilisés dans l'étude	15
2.2 Les données climatiques	17
2.3 Dispositifs des Barres et Battées	19
2.4 Suivi de la phénologie du débourrement végétatif	20
2.5 Des dendromètres automatiques pour mesurer la dynamique de croissance journalière	21
2.6 Données de phénotypage	24
2.7 Désignation dans le dispositif des Barres	25
2.8 Analyses statistiques	26
3 Résultats	28
3.1 Un décalage de la phénologie végétative	28
3.2 Un comportement différent des variétés selon les conditions climatiques	30
3.3 Les performances des variétés sont impactées par le facteur <i>composition</i>	36
3.4 Désignation du dispositif des Barres	38

4 Discussion	41
4.1 La phénologie	41
4.2 Les dendromètres	42
4.3 Intérêt du mélange des variétés <i>Luzette</i> et <i>Californie</i>	47
4.4 Avenir du douglas en France dans le contexte du changement climatique	48
Conclusion	50
Bibliographie	51

Liste des figures

1.1	Zone de compatibilité climatique du douglas. Adapté de ClimEssences.	10
2.1	Dynamique journalière de croissance et du flux de sève pour un arbre (Fernandez et al., 2010)	21
3.1	Corrélation et amplitude des périodes de débourrement entre 2020 et 2024	29
3.2	Représentation du modèle de Harrington (2010) avec les données phénologiques du dispositif des Barres	30
3.3	Evolution de la réserve relative en eau pour le dispositif des Barres entre 2020 et 2023	31
3.4	Variation du diamètre en millimètre (a) et pourcentage de variation du diamètre par rapport au diamètre du début de saison (b). Les valeurs représentées sont celles de chaque jour à minuit.	32
3.5	Pourcentage de variation du diamètre par rapport au diamètre du début de saison pour Luzete (a) et Californie (b)	34
3.6	Déficit hydrique des arbres (TWD) cumulé en fonction de l'intensité de la sécheresse (ISH)	35
3.7	Amplitude de contraction maximale journalière du tronc en fonction de réserve en eau relative	36

Liste des tableaux

1.1	Caractéristiques des vergers à graines français de douglas.	11
2.1	Caractéristiques des données climatiques utilisées dans l'étude.	17
2.2	Caractéristiques dendrométriques moyennes des arbres instrumentés en 2020 . . .	22
2.3	Plan de mesure des dispositifs 'Barres' et 'Battées' pour différentes variables en fonction des années de végétation	25
3.1	Caractéristiques des arbres désignés selon la provenance	28
3.2	Conditions climatiques moyennes pour le dispositif des Barres entre 2020 et 2023	31
3.3	Caractéristiques des périodes de sécheresse considérées dans l'étude	32
3.4	Statistiques descriptives des valeurs brutes de croissance à l'arrêt des mesures . .	33
3.5	Statistiques descriptives des valeurs normalisées de croissance à l'arrêt des mesures	33
3.6	Comparaison de la croissance normalisée entre les années et les variétés	34
3.7	Résultats des modèles linéaires mixtes pour le dispositif des Barres	37
3.8	Résultats des modèles linéaires mixtes pour le dispositif des Battées	37
3.9	Caractéristiques des provenances dans chaque modalité de composition pour le dispositif des Barres à 15 ans	38
3.10	Caractéristiques des provenances dans chaque modalité de composition pour le dispositif des Battées à 12 ans	38
3.11	Caractéristiques des provenances dans le dispositif des Barres.	38
3.12	Caractéristiques des compositions pour le dispositif des Barres.	38
3.13	Caractéristiques par composition et provenance pour les arbres désignés	39
3.14	Comparaison statistiques pour la circonférence des arbres désignés	39
3.15	Comparaison statistiques pour la hauteur des arbres désignés	39

Glossaire

CNPF	Centre national de la propriété forestière.
CEMAGREF .	Centre national du machinisme agricole, du génie rural, des eaux et des forêts.
DSF	Département de la santé des forêts
EFNO	Écosystèmes forestiers
FBF	France bois forêt
FCBA	Institut Technologique FCBA
FFN	Fonds forestier national
GIEC	Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat
IFN	Inventaire forestier national
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
MASA	Ministère de l'agriculture et de la souveraineté alimentaire
MFR	Matériel forestier de reproduction
ONF	Office national des forêts
RGF	Ressources génétiques forestières
UR	Unité de recherche
VFA	Variétés forestières améliorées

Introduction

Dans le cadre de mon cursus d'ingénieur AgroParisTech par apprentissage, j'ai effectué mon stage de fin d'études à INRAE (Institut national de recherche pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement). J'ai été accueilli au sein de l'unité de recherche Écosystème Forestier Nogent-sur-Vernisson (UR EFNO). Une partie des missions de l'unité entre dans le cadre de l'appui aux politiques publiques et concernent notamment (i) la conservation des ressources génétiques forestières (RGF) (ii) la sélection des peuplements porte-graines (iii) la réalisation de fiches conseils pour l'utilisation des essences de reboisement (iv) l'étude de l'évolution du marché national des graines et des plants forestiers et (v) l'évaluation des variétés forestières améliorées (VFA).

L'étude présentée dans ce mémoire se concentre sur l'évaluation des variétés améliorées de douglas dans le contexte du changement climatique. Cependant, ce travail s'inscrit dans une démarche plus globale initiée dans les années 1960 par le ministère en charge de la forêt (ministère de l'Agriculture et de la Souveraineté alimentaire (MASA)) et portant sur la création et l'évaluation de variétés forestières améliorées. Historiquement, ces variétés concernaient de nombreuses essences, allant de l'épicéa au merisier en passant par le douglas. Plus récemment, et dans le contexte du changement climatique, la démarche s'est diversifiée vers de nouvelles essences telles que le cèdre ou le chêne pubescent. Pour effectuer ce travail, un réseau de partenaires a vu le jour dans les années quatre-vingt-dix et regroupe aujourd'hui l'Office national des forêts (ONF), le Centre national de la propriété forestière (CNPF) ainsi qu'INRAE. Entre 2009 et 2016, ces trois partenaires ont mis en place un réseau d'évaluation de 43 dispositifs pour évaluer les performances des variétés améliorées de douglas dans différents contextes pédoclimatiques en France métropolitaine. Ce mémoire a pour vocation de valoriser des données portant sur la variété issue du verger *PME-006 Californie* et la variété issue du verger *PME-002 Luzette*.

Ce mémoire examine dans un premier temps les enjeux actuels et futurs liés à l'utilisation du douglas en France et au changement climatique. La seconde partie est consacrée à la méthodologie employée dans le mémoire et est suivie par la présentation des résultats obtenus. La dernière partie permet quant à elle de prendre du recul sur les résultats et de mettre ces derniers en perspective avec les enjeux développés dans la première partie.

L'état de l'art et la discussion sont basés à la fois sur des références bibliographiques, et également sur des entretiens bilatéraux que j'ai pu avoir avec des professionnels de la filière, notamment en ce qui concerne leur perception des enjeux du douglas en France.

Partie 1

Enjeux et problématique

Sommaire de la partie

1.1 Le douglas en France	2
1.1.1 Description de l'essence	2
1.1.2 Importance du douglas dans la forêt française	3
1.1.3 Enjeux économiques	4
1.1.4 Enjeux sociaux et paysagers	5
1.1.5 Enjeux environnementaux	5
1.1.6 Enjeux politiques	6
1.2 Intérêt du douglas face au changement climatique	7
1.2.1 Le changement climatique	7
1.2.2 Impacts du changement climatique sur la douglasaie française	7
1.2.3 Évolution des aires de répartition potentielle du douglas	9
1.2.4 Potentiel d'adaptation de la douglasaie française	10
1.3 Problématique de travail	13

1.1 Le douglas en France

1.1.1 Description de l'essence

Le douglas, *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco est une essence forestière¹ originaire d'Amérique du Nord. Son aire de répartition s'étend sur le long de la côte ouest, de la Colombie-Britannique jusqu'à la Californie (Ferron, 2021). On trouve trois sous-espèces, *Pseudotsuga menziesii* var. *menziesii*, *Pseudotsuga menziesii* var. *glauca* et *Pseudotsuga menziesii* var. *caesia* (Spiecker et al., 2019). Découvert à la fin du XVIII^e siècle par Archibald Menzies, le douglas a été dans un premier temps importé en Europe en 1827 par David Douglas avant d'être introduit en France vers 1840 en tant qu'essence ornementale. L'utilisation du douglas en tant qu'essence de reboisement a commencé à la fin du XIX^e siècle en France avant de prendre de l'ampleur au cours du XX^e siècle et notamment après la seconde guerre mondiale. Le Fonds forestier national (FFN) actif entre 1947 et 1999 a grandement contribué à l'utilisation forestière du douglas,

¹Espèce d'arbre retrouvé en milieu forestier.

particulièrement entre 1969 et 1999 (Legay & Le Bouler, 2014) dans l’optique de dynamiser la forêt française et de développer la filière forêt-bois tout en produisant du bois d’œuvre de qualité. Le douglas a ainsi été introduit partout en France en dessous de 1 200 m à l’exception de quelques zones telles que les Landes de Gascogne et le pourtour méditerranéen (Sanchez-Rodriguez & Bastien, 2022) ; (Oswald & Pardé, 1984). Ses bassins de production principaux sont le Morvan, le Beaujolais, le Limousin, le Massif central, les Vosges et la Normandie (Sanchez et Bastien, 2022 ; (Ferron, 2021)). Parmi les trois sous-espèces de douglas, on trouve presque exclusivement du *Pseudotsuga menziesii* var. *menziesii* (Sergent et al., 2014) en France, sous-espèce qui présente un taux de croissance plus élevé et une sensibilité moindre à des champignons tel que *Rhabdocline pseudotsugae* (Sanchez-Rodriguez & Bastien, 2022) ; (Spiecker et al., 2019).

Le douglas est une essence couvrant un large panel de contextes pédoclimatiques dans son aire naturelle et pouvant se trouver jusqu’à 1 500 mètres d’altitude. Il nécessite un bon éclaircissement même s’il peut supporter un léger ombrage lors de ses premières années. C’est une essence qui résiste plutôt bien au froid hivernal ainsi qu’aux gelées tardives, mais il est sensible au vent et aux chutes de neige (Rameau et al., 2018). Concernant son régime hydrique, il a besoin d’au moins 700 mm d’eau, bien répartis dans l’année (Ricodeau et al., 2019), avec un optimum situé entre 800 et 1 200 mm pour une bonne production en bois. Il peut cependant supporter des précipitations moins importantes (pas moins de 200 mm pendant la période estivale). Le gradient optimal de température moyenne annuelle pour le douglas varie de 8 °C à 11 °C (Rameau et al., 2018). Le douglas peut dépérir dans son jeune âge (25 ans) en cas de déficit hydrique prolongé durant la période estivale. Il en est de même avec les sécheresses hivernales (Spiecker et al., 2019). Concernant les conditions pédologiques, le douglas préfère les sols profonds, bien drainés. Il ne se plaît pas sur les sols superficiels, trop compacts et argileux, avec du calcaire actif ou hydromorphes (Oswald & Pardé, 1984). On le trouve donc en général sur des sols plutôt frais et ayant un pH variant de 4,5 à 6 (Rameau et al., 2018).

1.1.2 Importance du douglas dans la forêt française

Le douglas est présent sur plus d’un million d’hectare dont 440 000 où il est l’essence principale et 302 000 où cette essence est considérée comme étant en peuplement pur et c’est en forêt privée que se situe la grande majorité du volume de bois du douglas (80 %) (IFN, 2023). Le douglas étant présent sur plus de 800 000 hectares en Europe, la France est le pays avec la majorité des surfaces européennes de douglas (Spiecker et al., 2019) et est le pays produisant le plus de douglas en dehors de l’aire naturelle de ce dernier (Ferron, 2021). D’après l’inventaire forestier national (IFN), on trouve 138 millions de m³ de bois vivant de douglas en France constitué à 57 % par des bois moyens et 29 % par des gros bois (IFN, 2023). La ressource de douglas française est donc jeune, avec un âge médian compris entre 30 et 40 ans ((Ferron, 2021)). A titre de comparaison, il est fait mention d’un âge d’exploitabilité allant de 60 à 70 ans par Angelier (2007). Le CNPF évoque de son côté des âges de récolte finale possible allant de 40 à 70 ans suivant l’itinéraire sylvicole retenu (Riou-Nivert, 2020). Les itinéraires les plus dynamiques et assez courants dans le Massif Central conseillent des âge d’exploitabilité plus proches des 40 que des 70 ans (Riou-Nivert, 2020).

En France, le volume moyen par tige de douglas est de 0,7 m³, valeur la plus élevée parmi les principales essences forestières (IFN, 2023). Sur la période de référence allant de 2013 à 2021, la production biologique a été de 6,3 millions de m³/an, les prélèvements de 4,4 millions de m³/an et la mortalité de 0,2 millions de m³/an. Le bilan des flux résultant est de 1,8 millions de m³/an plus ou moins 1,6 millions de m³/an ; la ressource en douglas augmente donc en France (IFN, 2023). Le douglas est concerné annuellement par 4 000 hectare de coupes prélevant au moins 50 % du couvert (derrière le pin maritime, les chênes sessile et pédonculé, l'épicéa commun, le châtaignier et le peuplier) (IFN, 2023)

Il est la seconde essence forestière la plus utilisée pour le reboisements en France (Joyeau & Duverger, 2023) et cela depuis de nombreuses années.

1.1.3 Enjeux économiques

Le douglas est planté dans l'objectif de produire du bois d'œuvre de qualité pour alimenter la filière bois. Il peut être utilisé en charpente, bois lamellé-collé, menuiserie intérieure ou extérieure, panneaux de fibres, panneaux de particules et emballages (Angelier, 2007). Il possède une très bonne résistance mécanique, meilleure que celle des résineux utilisés classiquement en France ((Ferron, 2021)). Il a également la particularité de posséder un duramen naturellement résistant à la plupart des insectes et champignons, lui garantissant ainsi une très bonne résistance sans traitement du bois pour un usage en extérieur (Angelier, 2007). La contribution du douglas à la récolte de bois d'œuvre en France n'a cessé d'augmenter depuis 30 ans pour atteindre 3,2 Mm³ actuellement et des prévisions de récolte d'environ 6 Mm³ en 2030, avant de diminuer et se stabiliser à l'horizon 2050 (Sanchez-Rodriguez & Bastien, 2022) ; (Bazot, 2020). La production de sciage de douglas à partir de 2030 est estimée entre 2 et 2,5 Mm³ ce qui représentera environ 30 % de la production française en sciages résineux ((Ferron, 2021)). Actuellement, le débouché principal est le bois de structure (Angelier, 2007) et la demande concerne principalement la classe des bois moyens (27,5 à 47,5 cm), même si l'on observe un regain d'intérêt pour les gros bois (47,5 à 67,5 cm) ces dernières années (Sevrin, 2020). En effet, il serait intéressant de développer la production de gros bois de douglas qui possède une proportion de duramen plus importante, augmentant la valeur économique de l'arbre. Cela permettrait d'une part de diversifier les débouchés par rapport aux pays scandinaves en se positionnant sur un autre marché que le bois de structure et d'autre part d'améliorer la valeur ajoutée du douglas (Defays, 2020).

En 2022, le douglas a représenté 19 % du bois d'œuvre résineux commercialisé et 16,7 % de la production résineuses des scieries (FCBA, 2024). D'après l'observatoire économique de France Bois Forêt (FBF), le douglas a connu une forte baisse de son prix de vente au m³ en 2023 (-17 % par rapport à 2022). On trouve donc pour un volume unitaire moyen de 1,2 m³ un prix de vente de 72 €/m³ (FBF, 2024). Le prix moyen des sciages varie quant à lui de 375 à 415 €/m³ d'après le FCBA pour l'année 2022 (FCBA, 2024).

1.1.4 Enjeux sociaux et paysagers

La perception du douglas par la société est également un enjeu important de par la place qu'il occupe actuellement et qu'il aura dans un futur proche au sein de la forêt française. Son utilisation massive dans le Morvan est une bonne illustration des tensions qu'il peut cristalliser. En effet, le douglas a été implanté sur des surfaces importantes dans cette région, notamment pour se substituer à des peuplements feuillus surexploités auparavant (Bolac & Deconninck, 2020) et entraîne un fort rejet de cette essence par les populations locales. Cependant, les tensions liées à l'utilisation du douglas s'inscrivent plus généralement dans un contexte de rejet des peuplements résineux qui ont été installés de manière massive et rapide avec le FFN. En effet, la proportion de résineux dans le Morvan atteint presque les 50 % (Morvan, 2016), ce qui a conduit à un changement radical des paysages (Sanchez-Rodriguez & Bastien, 2022). De nombreuses voix s'élèvent donc contre l'utilisation massive du douglas, notamment au travers d'associations regroupant des citoyens, des scientifiques et réalisant diverses actions dans ce massif de moyenne montagne (Bolac & Deconninck, 2020).

1.1.5 Enjeux environnementaux

Un des arguments principaux des associations dénonçant l'utilisation du douglas est l'impact négatif que le douglas aurait sur l'environnement. On associe régulièrement le terme « enrésinement » avec « acidification des sols ». Cependant, des études scientifiques ont montré que le douglas acidifie moins les sols que les autres résineux et même moins que le hêtre ((Augusto et al., 1998) mais voir (Angelier, 2007)). Les exports d'éléments minéraux présents dans le sol sont modérés (mis à part le phosphore) vis-à-vis des volumes de bois produits (Sanchez-Rodriguez & Bastien, 2022) et diminuent lorsque l'on choisit un âge d'exploitabilité dépassant les 40 à 60 ans (Angelier, 2007). D'après plusieurs études (Schmid et al., 2014) ; (Sanchez-Rodriguez & Bastien, 2022), le douglas n'a pas un impact très différent sur son environnement des essences résineuses indigènes, mis à part pour la biodiversité fongique qui semble être réduite. Néanmoins, pour essayer de réduire ses impacts sur l'environnement, il est conseillé de favoriser le mélange avec d'autres essences, limiter l'export des rémanents, exploiter les arbres plus tard ou encore procéder à un amendement une fois par révolution (Sanchez-Rodriguez & Bastien, 2022). Enfin, d'une manière générale, ce n'est pas le douglas en lui-même qui a le plus gros impact sur la biodiversité, mais plutôt la sylviculture mise en place et l'âge du peuplement (Sanchez-Rodriguez & Bastien, 2022). On peut également citer l'étude menée par Bailly (2002) et ayant montré que la diversité floristique dépendait, entre autres, de la densité des peuplements de douglas et indirectement de la surface de ces derniers. D'une part, si le facteur station restait un déterminant important de la diversité floristique, la mise en place d'éclaircie a permis le développement de la flore présente et les dispositifs qui n'étaient pas éclaircis se démarquaient clairement des autres avec une faible diversité végétale. D'autre part, cette étude a également montré que la diversité floristique était aussi importante voire supérieure pour un peuplement de douglas éclairci en comparaison de peuplements feuillus proche d'un point de vue géographique (Bailly, 2002).

Par ailleurs, les forêts jouent un rôle important dans l'atténuation au changement climatique et la quantité de dioxyde de carbone (CO₂) absorbée par les forêts européennes pourrait encore augmenter (Nabuurs et al., 2015). Les forêts françaises participent grandement à la compensation des émissions de CO₂ en séquestrant environ soixante-dix millions de tonnes de CO₂ chaque année (Roux et al., 2017). D'autres leviers d'actions que le principe de séquestration existent également, tels que le stockage de CO₂ dans les produits bois récoltés ou la substitution qui consiste à utiliser du bois en lieu et place de certaines énergies fossiles (Fortin et al., 2016).

À la lumière de ces enjeux et des leviers d'actions disponibles, le douglas apparaît comme étant une essence d'intérêt pour la séquestration et le stockage de CO₂. En effet, le douglas est l'essence forestière la plus performante en ce qui concerne la séquestration de carbone (par hectare et par an) en France métropolitaine (Sanchez-Rodriguez & Bastien, 2022).

1.1.6 Enjeux politiques

La gestion de la forêt française est un enjeu politique important. En effet, la production de bois d'œuvre de qualité est une préoccupation de longue date, comme en a témoigné le FFN par le passé. Cet enjeu est toujours d'actualité, avec la volonté de réduire le déficit commercial de la filière forêt-bois (MASA, 2016). Pour cela, il est nécessaire de dynamiser la filière forêt-bois, de l'échelle de la plantation jusqu'à celle de la transformation (MASA, 2016).

Par ailleurs, des travaux importants ont été lancés pour adapter la forêt française au changement climatique comme peuvent en témoigner différentes stratégies au niveau national. On peut notamment citer France 2030 (précédé de France Relance) pour le renouvellement forestier, le label bas carbone ou encore la feuille de route pour l'adaptation des forêts au changement climatique.

De son côté, le douglas caractérisé par sa croissance rapide et sa place de seconde essence pour le reboisements en France a également une dimension politique importante. En effet, sa bonne résistance mécanique et ses qualités de résistances en bois d'extérieures en font une essence d'intérêt. De plus, cette essence fait partie intégrante de la filière forêt-bois dans certaines régions françaises et contribue à la dynamisation de ces dernières (Sanchez-Rodriguez & Bastien, 2022). Cette importance se traduit notamment par les investissements importants de l'État français dans la création de variétés forestières améliorées (VFA) de douglas à partir des années 1960 (Sanchez-Rodriguez & Bastien, 2022). Un nouveau programme d'amélioration a par ailleurs vu le jour en 2015 (Douglas-Avenir) et dans laquelle l'État français participe financièrement, marquant ainsi son intérêt à long terme (Sanchez-Rodriguez & Bastien, 2022).

Par ailleurs le douglas est l'une des seules essences forestières présentes en France à avoir une association dédiée à son intérêt. En effet, France Douglas est une association interprofessionnelle créée en 1993 dans l'optique de promouvoir et valoriser la ressource de douglas en France (Bazot, 2020).

1.2 Intérêt du douglas face au changement climatique

1.2.1 Le changement climatique

Dans le cadre de cette étude, la notion de changement climatique sera définie comme étant « une variation de l'état du climat qu'on peut déceler [...] par des modifications de la moyenne ou de la variabilité de ses propriétés et qui persiste pendant une longue période, généralement des décennies ou plus » d'après le Groupe d'expert intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC), (IPCC, 2023a). La notion de sécheresse correspond quant à elle à une « période anormalement sèche, suffisamment prolongée pour que l'absence de précipitations provoque un grave déséquilibre hydrologique » (Masson-Delmotte et al., 2019).

La dernière décennie s'est révélée être particulièrement chaude et celle entamée depuis 2021 devrait l'être encore plus. En effet, sur les 13 dernières années, huit font partie des années les plus chaudes en France depuis 1900 d'après Météo France. D'après le GIEC, les températures mondiales moyennes pour la période 2001-2020 étaient plus élevées de 0,99 °C (respectivement 0,84 °C et 1,10 °C pour les deux décennies) par rapport à la période 1850-1900 (IPCC, 2023b). Ces valeurs sont encore plus élevées en France avec des températures plus élevées de 1,7 °C aujourd'hui en comparaison à la période 1961 - 1990 ; portées par des années records comme 2022, 2023 et 2020 qui constituent le podium des années les plus chaudes en France depuis 1900 (Météo France). Un phénomène que l'on peut qualifier de changement climatique a donc débuté et s'avère être d'origine humaine (IPCC, 2023c).

Le changement climatique pourrait avoir de nombreux impacts sur les essences forestières, que ce soit au niveau de leur aire de répartition, leur potentiel de survie ou encore leur productivité. De nombreuses questions se posent donc, notamment dans le choix des essences et provenances² qui seraient le mieux adaptées au climat futur. Le douglas, *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco 1950, est également concerné par ces questions.

1.2.2 Impacts du changement climatique sur la douglasaie française

Dépérissements

Les premiers dépérissements importants de douglas en France ont eu lieu à la suite des sécheresses de 1989-1991, 1996 et 2003. La sécheresse de 2003 a été particulièrement intense avec des températures très élevées pendant l'été. Suite à cet épisode de sécheresse, de nombreux dépérissements ont été signalés. Le douglas représentait 35 % des arbres morts cette année-là (Sergent et al., 2014). Les sécheresses des dernières années ont également impacté le douglas d'après le Département de la Santé des Forêts (DSF) avec notamment les épisodes de 2017 à 2020, même si les dégâts ont pu être moins importants que chez d'autres essences (sapin pectiné, épicéa, pin sylvestre, etc.). Les principales observations sont des rougissements, des pertes foliaires (Q. Girard, 2009), des écoulements de résine et des nécroses cambiales (Carouille, 2024). Ces différents symptômes peuvent entraîner des mortalités qui surviennent plus particulièrement à basse altitude, sur les stations superficielles et lorsque le peuplement est exposé au sud (Carouille,

²Origine géographique du peuplement dont proviennent les graines.

2022). Ce phénomène de mortalité décrit comme isolé en 2020 et 2022 a tendance à prendre de l'ampleur avec un taux de mortalité pouvant aller de 10 à 20 % (Carouille, 2024).

Concernant la réussite des plantations, les dernières années ont été plutôt difficiles pour le douglas : 33 % de ces dernières se sont soldées par des échecs³ en 2020, 30 % en 2019 et plus de 40 % en 2022 (DSF, 2024). Ces échecs résultent de facteurs biotiques et abiotiques (Boutte, 2021).

Causes possibles des dépérissements

Les dépérissements peuvent résulter de nombreuses causes, par exemple des événements climatiques comme la sécheresse, la foudre, la grêle ou encore des ravageurs. Il est également fréquent qu'à la suite de tels événements, l'arbre se trouve affaibli et soit attaqué par un ravageur secondaire qui peut alors provoquer sa mort (Angelier, 2007).

Les dépérissements qui ont touchés le douglas, notamment dans certains peuplements français en 2003, seraient directement liés aux sécheresses (Ruiz Diaz et al., 2014). Le rôle que joue la sécheresse dans les dépérissements a également pu être montré à travers des modélisations de la probabilité de survie du douglas en Allemagne suivant l'influence du climat. En effet, il semblerait que les stress hydriques et thermiques augmentent le risque de cavitation⁴ et réduisent la photosynthèse ; réduisant ainsi le potentiel de survie du douglas (Brandl et al., 2020).

De plus, le douglas présente un enracinement assez superficiel (Rameau et al., 2018). Moser et al. (2016) ont montré qu'au stade de semis, le système racinaire du douglas s'étend beaucoup moins en profondeur en comparaison avec le pin sylvestre, notamment en situation de sécheresse. Par ailleurs, le développement des parties aériennes et racinaires est beaucoup moins important (environ 40 % de moins chez le douglas en période de sécheresse). Les semis de douglas étaient plus sujets à la mortalité que ceux de pin sylvestre en condition de sécheresse dans cette étude et un bon apport en eau dans les premières années apparaît donc comme étant nécessaire (Moser et al., 2016).

D'autre part, certaines mortalités de douglas peuvent s'expliquer par des attaques de scolytes habituellement inféodés à d'autres essences tels que *Pityogenes chalcographus* (sur l'épicéa), *Pityokteines sp* (sur le sapin) ou encore *Ips acuminatus* (sur les pins) (Carouille, 2022) ; (Ricodéau et al., 2019). Chez les jeunes plantation, *Hylobius abietis* peut également provoquer de fortes mortalités, tout comme le chermès qui reste plutôt rare (Angelier, 2007). La cécidomyie des aiguilles (*Contarinia pseudotsugae*), un insecte originaire des États-Unis a également fait son apparition en Europe et en France ces dernières années. Elle est responsable de l'apparition de galles sur les aiguilles pouvant provoquer la chute de ces dernières (DSF, 2019). Il apparaît que cet insecte a colonisé une part importante de la douglasie française. Les premiers résultats de suivi indiquent une absence de mortalité imputable à ces attaques, mais peut entraîner une baisse de croissance d'au plus 25 % d'un jeune peuplement en comparaison d'un jeune peuplement indemne (DSF, communication personnelle via Nathan Fornes). En plus des insectes,

³Taux de reprise < 80 %.

⁴Phénomène désignant l'embolie des vaisseaux (xylème) transportant la sève brute dans l'arbre. Peut entraîner la mort de l'arbre.

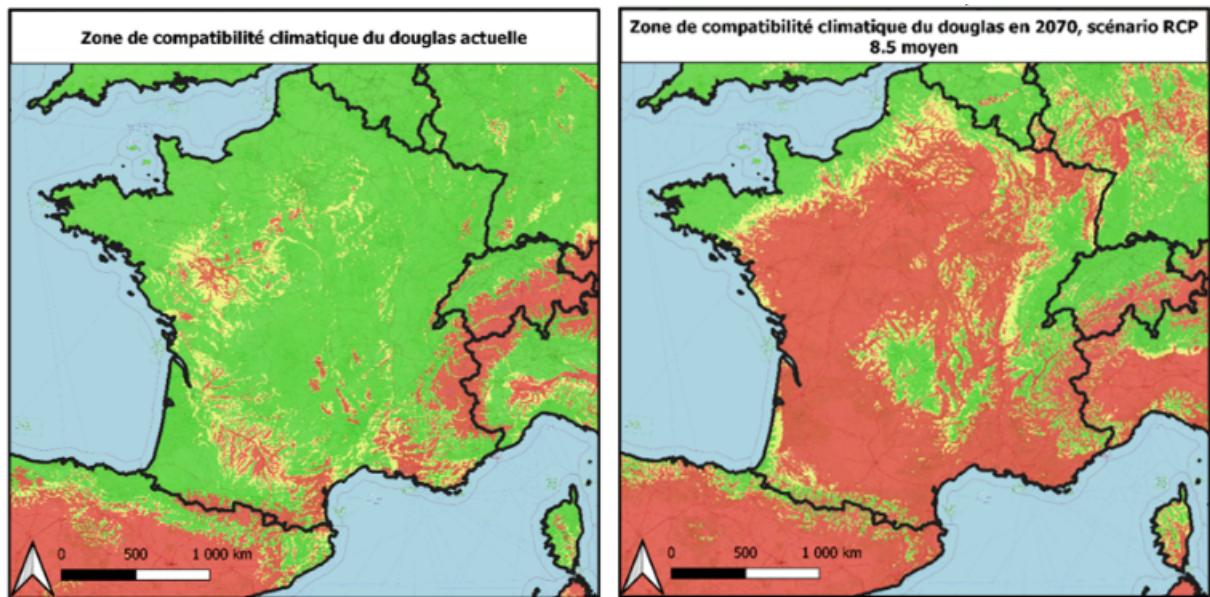
on trouve un certain nombre de champignons pouvant s'attaquer au douglas. Ces derniers sont principalement des ravageurs secondaires. Parmi eux, on peut citer *Armillaria sp* qui peut provoquer des mortalités diffuses. Un autre ravageur secondaire est *Heterobasidion annosum* connu pour provoquer de nombreux dépérissements chez d'autres résineux et qui entraîne des tâches d'altération dans le bois du douglas et parfois des mortalités dans les jeunes plantations. Enfin, on peut trouver des rouilles foliaires telles que *Phaeocryptopus gaeumannii* et *Rhizosaphaera pseudotsugae*. Elles peuvent entraîner des jaunissements et des défoliations pouvant provoquer une perte de croissance (Angelier, 2007).

Le changement climatique pourrait entraîner une modification des aires de répartitions de certains ravageurs, ainsi que de leurs cycles biologiques, mais cela reste difficile à prédire (La Porta et al., 2008). Une étude en Allemagne a par exemple montré qu'en suivant le scénario climatique le plus critique, les risques d'occurrence des incendies et de certains ravageurs pourraient augmenter (Lasch-Born et al., 2015).

1.2.3 Évolution des aires de répartition potentielle du douglas

Avec le changement climatique, on peut s'attendre à ce que l'aire de distribution du douglas évolue, que ce soit dans son aire naturelle ou en Europe. D'une manière générale, on peut penser que certaines zones ne seront plus adaptées pour l'accueillir, alors que d'autres qui ne le sont pas actuellement pourraient le devenir, notamment en lien avec l'augmentation des températures moyennes. Par exemple, l'aire de distribution du douglas en Amérique du Nord devrait se réajuster en direction du nord-est (Weiskittel et al., 2012). En effet, d'après les modélisations, d'ici 2090, 60 % des zones de répartition actuelles ne seraient plus exploitables par le douglas, mais de nouvelles le deviendraient. Ces différentes évolutions devraient conduire à une diminution (zones gagnées moins les zones perdues) de 4 % de la surface de l'aire de distribution possible du douglas en Amérique du Nord (Weiskittel et al., 2012). En France et plus généralement en Europe, on devrait assister à des changements similaires dans l'aire de répartition potentielle du douglas. L'outil Climessences permet par exemple de modéliser l'aire de compatibilité climatique probable d'une essence pour un climat futur. Concernant le douglas, on obtient les résultats présentés dans la figure 1.1.

Avec le scénario climatique RCP 8.5 et un modèle moyen qui semble le plus probable actuellement, l'aire de compatibilité climatique du douglas en France diminue de manière importante. Les zones de basse altitude seraient peu compatibles alors que d'autres en altitude, actuellement trop froides le deviendraient. Les grands bassins de production actuels devraient encore être compatibles à l'horizon 2070 avec ce scénario ainsi que les régions situées dans le Nord-Ouest de la France. Ce modèle Climessence prend en compte les trois indicateurs IKS (déficit hydrique annuel, température minimale annuelle et la somme des degrés jours annuelle) en relation avec les zones de présence actuelles du douglas (ClimEssences, 2024). Ces différents éléments permettent de donner une idée des zones de compatibilité potentielles du douglas dans le futur en prenant en compte l'évolution du climat, mais ces modèles restent des représentations simplifiées d'évènements particulièrement complexes et ne prennent pas en compte un nombre important de facteurs.



Zone de compatibilité climatique du douglas actuelle (à gauche) et en 2070 selon le scénario RCP 8,5 moyen (à droite). En vert les zones compatibles, en jaune celles non compatibles à 97.5% et en rouge celles non compatibles à 99%.

Figure 1.1: Zone de compatibilité climatique du douglas. Adapté de ClimEssences.

Par ailleurs, les prévisions de changement d’aire de répartition ne concernent pas uniquement le douglas. De nombreux questionnements existent en effet pour l’avenir du sapin pectiné (*Abies alba*) et l’épicéa commun (*Picea abies*). En effet, ces deux essences forestières ayant une place importante dans la production de bois d’œuvre résineux, à la fois en France et en Europe font face à des dépérissements importants (Carouille, 2024) ; (Caudullo et al., 2016) ; (Mauri et al., 2016). Le douglas est ainsi souvent cité dans la littérature comme étant une essence moins sensible à la sécheresse (Eilmann & Rigling, 2012) ; (Vitali et al., 2017) ; (Lévesque et al., 2014) ; (Manise & Vincke, 2014) et qui pourrait être une alternative aux résineux indigènes (Vitali et al., 2017) ; (Stangler et al., 2022) ; (Vacek et al., 2021).

Le douglas apparaît donc comme étant une essence ayant d’ores et déjà une place importante dans le paysage et l’économie forestière européenne et française. Son importance est par ailleurs appelée à prendre de l’ampleur dans le contexte du changement climatique.

1.2.4 Potentiel d’adaptation de la douglasaie française

Matériel forestier de reproduction du douglas en France

Lors des reboisements en France, les graines et plants forestiers utilisés sont désignés par le terme réglementaire de matériel forestier de reproduction⁵ (MFR). Durant de nombreuses années, les MFR utilisés pour les reboisements en douglas provenaient de peuplements⁶ américains ou français (Rousselle et al., 2022). En parallèle, l’État a décidé dans les années 1960 de développer un vaste programme d’amélioration des ressources génétiques forestière françaises,

⁵Défini dans l’article D153-2 du code forestier.

⁶Peuplements forestiers sélectionnés sur des critères de vigueur et forme et dont les graines peuvent être récoltées pour la production de plants forestiers.

autant qualitativement que quantitativement. La mise en œuvre de ce programme a été confié à INRAE (à l’époque INRA et Cemagref) pour la conception et à l’ONF pour la gestion (Philippe et al., 2012a). Ce programme a mené à la création de huit vergers à graines⁷ pour le douglas entre 1978 et 1989 (tableau 1.1) (Sanchez-Rodriguez & Bastien, 2022).

Table 1.1: Caractéristiques des vergers à graines français de douglas.

Code et nom de verger	Année de plantation	Surface	Nombre de clones	Origine des clones
PME-VG-001 Darrington	1978 + 1990	14 ha	70	Provenance Darrington (États-Unis, Washington)
PME-VG-002 La Luzette	1980/81	34 ha	226	États-Unis (surtout Washington) + France (17 peuplements)
PME-VG-003 Washington	1984/87	8 ha	289	États-Unis (ouest Washington)
PME-VG-004 France 1	1990	6 ha	110	France (24 peuplements)
PME-VG-005 Washington 2	1983	8 ha	106	États-Unis (Washington)
PME-VG-006 Californie	1986	5 ha	108	États-Unis (essentiellement Californie)
PME-VG-007 France 2	1989	5 ha	138	France (24 peuplements)
PME-VG-008 France 3	1989	10 ha	150	France (24 peuplements)

Les clones constituant ces huit vergers à graines ont été sélectionnés dans des tests de provenances et descendances, parmi des individus d’origine américaine (mission IUFRO des années 1960) et parmi des individus originaires de peuplements français. Ces clones ont été sélectionnés sur divers caractères tels que la vigueur, l’architecture, la tardiveté de débourrement, etc. (Sanchez-Rodriguez & Bastien, 2022). La majorité des clones constituant les vergers trouvent leur origine dans l’État de Washington (État-Unis) et dans le nord de l’État d’Oregon. C’est le cœur de l’aire naturelle de la variété *menziesii*. Seul un verger se démarque des autres ; c’est la variété *Californie* qui était pressentie pour les reboisement en zone méditerranéenne (Philippe et al., 2012a) ; (S. Girard et al., 2013).

Ainsi, les vergers *Darrington* et *Luzette* sont respectivement entrés en production en 1987 et 1996 pour suppléer l’apport en MFR de douglas (Philippe et al., 2012a), suivi par les six autres vergers dans les années 2000 (Sanchez-Rodriguez & Bastien, 2022). Avec la montée en puissance de la production de MFR français de qualité et face aux risques d’introduction de parasites et pathogènes non endémiques ainsi que les craintes liées à la canicule de 2003, l’État français a interdit les importations de graines de l’aire naturelle à partir de 2010 (Philippe et al., 2012a) ; (Rousselle et al., 2022). Une étude du FCBA (Chaumet, 2017) menée dans le cadre du nouveau programme d’amélioration Douglas-Avenir a par ailleurs souligné l’importance que les personnes ayant répondu à l’enquête accordaient aux traits de résistance au changement climatique. Cette importance était d’autant plus forte dans les zones où l’avenir du douglas pourrait être compromis par le changement climatique (Chaumet, 2017).

⁷Plantation de clones ou descendances sélectionnées conduite pour la production de graines. Le terme réglementaire est défini dans l’article D153-2 du code forestier.

En parallèle, un réseau d'essais a été installé à partir de 2009 sous l'impulsion conjointe de l'ONF, INRAE (INRA et Cemagref en 2009), du CNPF et du MASA dans l'optique d'évaluer les performances des descendants des vergers à graines de douglas français (Philippe et al., 2012a). Ce réseau d'évaluation (dénommé réseau VFA - Douglas dans la suite de l'étude) est financé par le MASA. Les objectifs principaux du réseau sont (i) l'évaluation des performances et des limites des variétés de douglas, (ii) l'homologation des vergers à graines en catégorie testée⁸ lorsque les conditions nécessaires sont remplies et (iii) la mise en place d'actions de vulgarisation grâce à des dispositifs de démonstration. Au total, 43 dispositifs d'évaluation ont été installés entre 2009 et 2016 pour couvrir un large panel de contextes pédoclimatiques.

Les dispositifs ont été classés dans quatre grands contextes écologiques :

- Cœur de l'aire : grands bassins de production, avec des conditions pédoclimatiques actuelles⁹ optimales pour le douglas et qui le seront encore pour 50 à 80 ans¹⁰ ;
- Altitude : dispositifs entre 1 000 et 1 300 m d'altitude ;
- Marge 1 : zones géographiques actuellement adaptées pour le douglas, mais qui ne le seront plus d'ici 2050⁹ ;
- Marge 2 : zones géographiques qui ne sont pas adaptées pour l'installation de douglas⁹ et ne le seront pas dans les 50 à 80 ans¹⁰.

Les premiers résultats du réseau VFA - Douglas ont apporté de premiers enseignements. La survie est bonne dans la majeure partie des dispositifs avec un taux de survie supérieur à 80 %, mis à part pour quelques sites (Rousselle et al., 2022) ; (Bastien et al., 2021). Aucune différence significative n'a pour le moment été montrée pour le taux de survie entre les différentes variétés dans le réseau, contrairement aux accroissements annuels moyens en hauteur. En effet, les descendants d'un des huit vergers à graines montrent des accroissements en hauteur faible par rapport aux sept autres (qui ne présentent pas de différences significatives entre eux) ainsi que le témoin¹¹. Le verger dont la descendance est concernée par cette faible croissance en hauteur est le verger *PME-VG-006 Californie* (Rousselle et al., 2022) ; (Bastien et al., 2021).

Cependant, cette différence n'est pas stable spatialement. En effet, les analyses regroupant les dispositifs d'évaluation par contextes écologiques ont montré que la différence de croissance entre les descendants du verger *PME-VG-006 Californie* et celles des autres vergers diminuaient de manière importante lorsque l'on se situe dans des milieux plus chauds et secs (marge 1 et marge 2) (Rousselle et al., 2022) ; (Bastien et al., 2021). Dans ces deux contextes écologiques plus chauds et secs, les différences significatives d'accroissement entre les descendants du verger *PME-VG-006 Californie*, le témoin ainsi que certains autres vergers n'existent plus (Rousselle et al., 2022) ; (Bastien et al., 2021).

⁸De meilleures performances des descendants du verger doivent avoir été montrées par rapport à un témoin comme défini dans l'article D153-3 du code forestier.

⁹En considérant les données climatiques historiques de 1971 à 2000.

¹⁰Depuis 2009 et d'après les projections climatiques du projet CARBOFOR (*Projet CARBOFOR, 2001*) selon le scénario B2 du GIEC.

¹¹Provenant de la zone de provenance 403 de l'aire naturelle, État de Washington.

Des mesures du débourrement végétatif ont également été réalisées. Le verger dont les descendants sont les plus précoces est le *PME-VG-006 Californie*. Le verger *PME-VG-005 Washington 2* est le plus tardif pour le débourrement végétatif (Rousselle et al., 2022) ; (Bastien et al., 2021). Un écart moyen de 15 à 20 jours est observé entre les descendants de ces deux vergers selon les sites et l'année (Bastien et al., 2021). Le verger *PME-VG-002 Luzette* se classe quant à lui en troisième position (en partant du plus tardif vers le plus précoce) sur neuf (les descendants des huit vergers à graines de douglas et le témoin).

La différence de comportement entre les descendants du verger Californie et ceux des autres vergers avait été une hypothèse lors de l'installation du réseau en 2009, en raison de son origine géographique différente. En effet, les clones composant le verger à graines *PME-VG-006 Californie* proviennent de cet État (des États-Unis), à l'exception de quatre arbres du verger (État de Washington pour trois d'entre eux et État du Nouveau-Mexique pour le dernier). Les autres vergers sont quant à eux constitués de clones provenant du nord de l'aire de répartition naturelle (État d'Oregon, Washington et Colombie-Britannique), mais aussi de clones issus de peuplements français et dont les graines provenaient de peuplements américains du nord de l'aire naturelle (annexe A).

Par ailleurs, des différences de comportement ont également été montrées entre des provenances de l'aire naturelle. En effet, les provenances moins productives seraient également plus tolérantes à la sécheresse (Eilmann et al., 2013). À une échelle plus globale, plusieurs études ont montré une tendance pour la tolérance à la sécheresse dans l'aire naturelle du douglas selon un premier gradient nord-sud et un second gradient ouest-est (Eilmann et al., 2013) ; (Bansal et al., 2015) ; (Sergent et al., 2014) ; (Chauvin et al., 2019).

1.3 Problématique de travail

La problématique générale de cette étude sera la suivante : Comment valoriser la diversité génétique des matériels forestiers de reproduction français de douglas pour réaliser des reboisements adaptés au changement climatique ?

Cette problématique générale peut être divisée en plusieurs sous-problématiques qui seront traitées dans ce mémoire :

- (i) Quels mécanismes peuvent expliquer ces différences de comportement entre *Californie* et les autres vergers ?
- (ii) Quel est l'intérêt de la variété *Californie* dans le contexte du changement climatique ?
- (iii) Le mélange de variétés peut-il être bénéfique d'un point de vue sylvicole et dans le contexte du changement climatique ?

Pour répondre à ces questions, l'étude sera restreinte à la descendance du verger *PME-VG-006 Californie* (désigné par variété *Californie* dans la suite de l'étude) et à la descendance du verger *PME-VG-002 La Luzette* (désigné par variété *Luzette* dans la suite de l'étude). Le choix d'utiliser la variété *Luzette* en comparaison de la variété *Californie* repose sur deux constats :

- D'une part, la variété *Luzette* a des performances comparables à celles des descendants des autres vergers (sauf *Californie*) et est donc représentative des six autres vergers
- D'autre part, la variété *Luzette* représente 56 % des récoltes nettes de graines (en kg) depuis 2003 (Nathan Fornes, communication personnelle). Elle occupe ainsi la première place parmi les ventes de MFR de douglas et est donc la plus représentative des douglasaies françaises plantées ces dernières années.

Partie 2

Matériel et méthodes

Sommaire de la partie

2.1	Description des matériels de reproduction utilisés dans l'étude . . .	15
2.1.1	Origine géographique	15
2.1.2	Récoltes utilisées	16
2.2	Les données climatiques	17
2.2.1	Données générales	17
2.2.2	Evapotranspiration potentielle	17
2.2.3	Calcul du bilan hydrique	17
2.3	Dispositifs des Barres et Battées	19
2.4	Suivi de la phénologie du débourrement végétatif	20
2.5	Des dendromètres automatiques pour mesurer la dynamique de croissance journalière	21
2.5.1	Principe de fonctionnement des dendromètres	21
2.5.2	Description du dispositif	22
2.5.3	Indicateurs de stress de l'arbre	23
2.5.4	Définition des périodes de stress hydrique	23
2.5.5	Préparation des données	23
2.6	Données de phénotypage	24
2.7	Désignation dans le dispositif des Barres	25
2.8	Analyses statistiques	26

2.1 Description des matériels de reproduction utilisés dans l'étude

2.1.1 Origine géographique

Comme expliqué dans la [partie 1.3](#), la présente étude se concentrera sur les variétés *Luzette* et *Californie*.

Les clones composant le verger à graines *PME-VG-006 Californie* proviennent majoritairement du sud de l'aire naturelle du douglas (cf. [partie 1.3.4](#)). Les clones ont été sélectionnés dans des tests de provenances implantés en France, dans le Var et les Hautes-Alpes. Les caractères principaux pour leur sélection était la vigueur, la forme et la survie dans des conditions de sécheresse estivale.

Le verger *Luzette* est principalement composé de clones provenant de l'État de Washington, mais également de clones provenant de peuplements français (17 % des clones). Les clones ont été sélectionnés dans des test de provenances implantés en France, dans les Vosges, la Haute-Vienne, la Meurthe-et-Moselle et la Dordogne. Les caractères de sélection principaux étaient la vigueur, la forme et la tardiveté de débourrement¹.

2.1.2 Récoltes utilisées

Plusieurs récoltes différentes ont été utilisées pour les plantations des dispositifs étudiés, pouvant impacter la composition des peuplements et la diversité génétique représentée. Nous expliquons ici pourquoi ces différentes récoltes peuvent être considérées comme équivalentes.

Des travaux d'inductions florales ont été réalisés au printemps 2006 à la demande du Cemagref pour les verger *PME-VG-006 Californie* et *PME-VG-002 Luzette* (parcelle 501B) dans l'optique de réaliser une récolte de graines en 2007. La floraison et fructification ont été abondantes dans ces deux vergers pour l'année 2007 (Gwenaël et al., 2010). Pour savoir si la floraison et la production de cône étaient représentatives des clones présents dans les vergers, des comptages de fleurs et cônes ont été réalisés. Pour qualifier la représentativité de la fructification, différents indicateurs ont été calculés (annexe B)

La fructification du verger *Luzette* étant suffisamment représentative de la composition génétique du verger, le lot de graines a été prélevé dans la récolte commerciale de 2007. Une récolte spécifique a été organisée pour le verger *Californie* en 2007 puisque la fructification n'était pas satisfaisante. Ainsi, tous les clones présentant des cônes ont été récoltés, au prorata du nombre de ramets présent dans le verger. Ainsi, les cônes de 88 clones sur 116 ont été prélevés (Gwenaël et al., 2010).

La récolte du verger *Luzette* est donc qualifiée de *commerciale* alors que la récolte du verger *Californie* est qualifiée de récolte *expérimentale*. La récolte expérimentale correspond à une récolte ayant eu lieu sur l'ensemble des clones du verger, c'est-à-dire que l'ensemble de la diversité génétique disponible est représentée dans la récolte. La récolte commerciale a quant a-t-elle eu lieu seulement sur les clones ayant produits le plus de cônes ; la diversité génétique est donc moins importante dans cette récolte. Une récolte commerciale a également été réalisée en 2007 pour le verger *Califonie*.

Un lot de graines récolté en 2004 dans le verger *Luzette* avant éclaircie génétique a également été utilisé pour les plantations du réseau VFA - Douglas. Le verger *Luzette* non éclairci comportait plus de clones que le verger éclairci, augmentant sa diversité génétique potentielle. Dans la suite de l'étude, les récoltes commerciale et expérimentale du verger *Californie* ainsi que les récoltes du verger *Luzette* non-éclairci et éclairci sont considérées comme équivalentes (annexe B)

L'élevage des plants a quant à lui été effectué par la pépinière de l'État de Cadarache située à Saint-Paul-lès-Durance (Gwenaël et al., 2010).

¹Un débourrement tardif assure une sensibilité au gel tardif moindre.

2.2 Les données climatiques

2.2.1 Données générales

Les données climatiques utilisées dans cette étude proviennent de deux sources différentes dont les caractéristiques sont présentées dans le tableau 2.1 :

Table 2.1: Caractéristiques des données climatiques utilisées dans l'étude.

Caractéristiques	SAFRAN	Station météo du domaine des Barres
Échelle	France entière (maille 8 km x 8 km)	Ponctuelle (Domaine des Barres, Nogent-sur-Vernisson)
Variables	25 variables dont 8 mesurées directement	Précipitations journalières et températures moyennes journalières
Références	(Durand et al., 1993) (Habets et al., 2008) (Quintana et al., 2008)	
Années	2009 - 2024	2009 - 2024

2.2.2 Evapotranspiration potentielle

L'évapotranspiration potentielle (ETP) permet d'estimer la demande transpiratoire, c'est-à-dire la quantité d'eau maximale (mm/jour) que la végétation peut rejeter dans l'atmosphère en l'absence de conditions limitantes (Thornthwaite, 1948). Cette variable est particulièrement importante dans le cadre de l'établissement d'un bilan hydrique (Lebourgeois & Piedallu, 2005).

Pour le calcul du bilan hydrique, il est conseillé d'utiliser l'ETP de Penman qui est lui-même très corrélé avec l'ETP de Penman-Monteith (*Biljou - Modèle de Bilan Hydrique*, 2024). Ces formules sont cependant complexes à utiliser (Lebourgeois & Piedallu, 2005) et font intervenir de nombreux paramètres pour prendre en compte au mieux les principes physiques du bilan d'énergie (Allan et al., 1998).

L'ETP utilisée pour les calculs de bilan hydrique dans cette étude est calculée à partir d'une formule dite « empirique » (Choisnel et al., 1992) et proposée par Oudin et al. (2005). Cette formule n'intègre qu'une seule variable d'entrée : la température moyenne (Oudin et al., 2005). L'utilisation de cette formule à l'avantage de permettre l'utilisation des données climatiques de la station météo du domaine des Barres, et ainsi de s'affranchir des données calculées à l'échelle de la maille SAFRAN. Il est cependant à noter que les quantités d'ETP résultant de cette formules sont inférieures à celle fournie par la formule de Penman-Monteith.

2.2.3 Calcul du bilan hydrique

Le bilan hydrique correspond à la variation de la quantité en eau disponible dans le sol entre deux dates. La capacité maximale de rétention en eau du sol dépend de la réserve utile (RU)²

²Quantité d'eau maximale que le sol peut contenir et qui est disponible pour les végétaux.

du sol étudié. Ce bilan va dépendre des flux d'eau entrant (précipitations) dans le sol et des flux d'eau sortant (évapotranspiration, interception des précipitations, drainage, ruissellement) (Bertin et al., 2016). Plusieurs méthodes plus ou moins complexes permettent de calculer le bilan hydrique. Pour cette étude, la formule utilisée a été mise au point par Philippe Balandier (INRAE) et est mise en œuvre dans un script R développé par Thomas Perot (INRAE, communication personnelle).

Le bilan hydrique sera calculé de la manière suivante pour chaque jour :

$$\text{Si } P_n \geq ETP_n$$

$$SWC_n = \max(0, \min(RU, SWC_{n-1} + P_n - ETP_n))$$

$$ETR_n = ETP_n$$

$$\text{Si } P_n < ETP_n$$

$$ETR_n = \max\left(0, ETP_n \times \left(\frac{\log(1 + \min(RU, SWC_{n-1} + P_n))}{\log(1 + RU)}\right) \times \text{coef}\right)$$

$$SWC_n = \max(0, \min(RU, P_n + SWC_{n-1} - ETR_n))$$

Si les précipitations (P) du jour n sont supérieures à l'évapotranspiration potentielle (ETPn) de ce même jour, alors le contenu en eau du sol (SWC, Soil Water Content) est égal au contenu en eau du sol du jour précédent (SWCn-1) auquel on rajoute Pn et auquel on soustrait ETPn. L'évapotranspiration réelle (ETRn) est alors égale à ETPn.

Dans le cas où Pn est inférieur à ETPn, alors on utilise ETRn qui est calculée à partir d'une fonction logarithme et d'un coefficient cultural (coef) adapté à la forêt. Ce dernier est défini comme étant égal à 0,75 (Granier et al., 1999).

Le script développé par Thomas Perot permet également de calculer la réserve relative en eau (REW) et un indice de stress hydrique (ISH) suivant le principe du modèle *Biljou* (Granier et al., 1999). La réserve relative en eau est calculée comme suit :

$$REW_n = \frac{SWC_n}{AWC}$$

où : - SWC_n est le stock d'eau du sol à l'instant n, - AWC, est la capacité maximale d'eau du sol (la réserve d'eau maximale).

Cette REW est une valeur comprise entre 0 (point de flétrissement permanent) et 1 (quand le sol a atteint sa réserve maximale). En dessous d'un seuil fixé à 0,4 par Granier et al. (1999), la consommation en eau des arbres est fortement régulée par la fermeture des stomates. C'est notamment le cas pour le douglas, qui arrête sa croissance radiale une fois ce seuil atteint. Ce seuil sera désigné par le terme « seuil de régulation stomatique » dans la suite de l'étude. En dessous du seuil de régulation stomatique défini par Granier et al. (1999), il est considéré que les arbres sont en situation de stress hydrique. L'indice de stress hydrique (ISH) se calcule de la manière suivante pendant ces périodes :

$$\text{ISH} = \sum \frac{0.4 - \text{REW}}{0.4}$$

2.3 Dispositifs des Barres et Battées

Dans le cadre de cette étude, deux dispositifs du réseau VFA - Douglas seront utilisés. Le premier sera désigné par l'indicatif « Barres » et le second par l'indicatif « Battées ». Les caractéristiques de ces deux dispositifs sont décrits dans le tableau @ref(tab:caract_dispo). Ils ont été installés spécifiquement pour comparer les variétés *Luzette* et *Californie*, notamment pour voir l'intérêt de les planter en mélange. Chaque dispositif comporte quatre blocs constitué de chacune des trois modalités du facteur « Composition » (annexe C) :

- *ce* : un sous-bloc d'individus *Californie* ;
- *le* : un sous-bloc d'individus *Luzette* ;
- *me* : un sous-bloc d'individus *Californie* et *Luzette* en mélange pied à pied.

Dispositif	Barres	Battées
Année d'installation	2009	2012
Département	Loiret (45)	Saône-et-Loire (71)
Roche mère	Argile à silex	Composée de schistes, grès, arkoses et conglomérat du Stéphanien
RU	81 mm	105 mm
Climat annuel	12,1 degré Celsius et 730 mm	10,6 degré Celsius et 903 mm
Climat végétation	18 degré Celsius et 303 mm	16,8 degré Celsius et 360 mm
Altitude	145 m	520 m
Contexte écologique	Marge 2	Marge 1
Nombre d'arbres	296 CAL & 295 LUZ	252 CAL & 252 LUZ
Lot de graines	Expérimentale (CAL) & Verger éclairci (LUZ)	Commerciale (CAL) & Verger non éclairci (LUZ)
Hauteur dominante	11,8 m	

Les données climatiques sont calculées depuis l'installation des dispositifs, soit une période de 15 ans pour le dispositif des Barres et une période de 12 ans pour le dispositif des Battées. La ligne « climat végétation » correspond aux conditions climatiques moyennes sur la période de végétation (premier mai au 30 septembre). La RU du dispositif des Barres a été calculé sur un mètre avec les données de la fosse numéro une. La RU du dispositif de Battées est issue du modèle DIGITALIS (UMR Silva). CAL est l'abréviation pour Californie et LUZ est l'abréviation pour Luzette.

2.4 Suivi de la phénologie du débourrement végétatif

Le débourrement végétatif est suivi sur 18 individus *Luzette* et 18 individus *Californie* dans le bloc 2 du dispositif des Barres. Cinq années de mesures sont utilisées pour cette étude (2020 à 2024). Ces arbres font l'objet d'une notation régulière entre fin mars et fin mai sur la base du protocole en annexe D. L'arbre est considéré comme débourré lorsque les aiguilles de l'année ont percé l'enveloppe d'au moins 50 % des bourgeons de l'arbre. Plusieurs opérateurs ont été amenés à réaliser cette notation au cours des cinq années.

Ces données ont également été utilisées dans un modèle développé par Harrington et al. (2010). Ces derniers ont étudié le débourrement végétatif du douglas de cinq provenances différentes (des États de Washington et d'Oregon) et ont mis au point un modèle pour prédire le débourrement végétatif. Ce modèle est basé sur le principe selon lequel le débourrement résulte à la fois de besoin en froid et en chaleur. Considérant cela, ils ont paramétré deux équations. La première (1) est utilisée pour calculer les unités de refroidissement (aussi appelé chilling units (CU)). La seconde (2) est utilisée pour calculer les unités de réchauffement (aussi appelé forcing units (FU)) (Harrington et al., 2010).

La valeur de CU traduit la durée d'exposition à des températures horaires comprises entre -4.7 °C et 16 °C entre le 1^{er} novembre de l'année n-1 et le 21 mars de l'année n.

$$(1) \text{ CU} = 3.13 \left(\frac{T + 4.66}{10.93} \right)^{2.10} e^{-\left(\frac{T+4.66}{10.93} \right)^{3.10}}$$

Si la température est inférieure à $-4,7\text{°C}$ ou supérieure à 16°C , la valeur de CU est égale à 0. La valeur de CU est quant à elle plafonnée à 1 pour chaque itération.

La valeur de FU traduit la durée d'exposition à des températures horaires supérieures à 5 °C entre le 1^{er} novembre de l'année n-1 et la date de débourrement de l'année n.

$$(2) \text{ FU} = \frac{1}{1 + e^{-0.477(T+6.49)}}$$

Le modèle final prend en compte la somme des CU et FU horaires. Pour une même année et une localisation identique, 2 arbres auront donc la même valeur de CU, mais il pourra y avoir une variation de FU en fonction de la date de débourrement. Si l'hiver n'est pas assez rigoureux, cela risque de compromettre la capacité de débourrement. Plus l'hiver sera froid (en restant au-dessus de -4.7 °C), moins le nombre d'heures chaudes (supérieur à 5 °C après le 1er novembre n-1) devra être important pour induire le débourrement. Inversement, plus l'hiver sera doux, et plus il faudra d'heures chaudes pour induire le débourrement d'un même arbre.

2.5 Des dendromètres automatiques pour mesurer la dynamique de croissance journalière

2.5.1 Principe de fonctionnement des dendromètres

La croissance radiale des arbres est un indicateur permettant de mieux comprendre l'influence des conditions climatiques sur la physiologie des arbres. En effet, au cours de la journée, le tronc de l'arbre va connaître des phases d'expansions et de contractions (figure 2.1. Fernandez (2010) divise ces fluctuations journalières en cinq phases (Fernández & Cuevas, 2010) :

- I : période nocturne avec la recharge en eau du cambium et du phloème ;
- II : augmentation du diamètre de l'arbre et atteinte d'un maximum ;
- III : contraction du tronc au cours de la journée dû à la transpiration. Le flux de sève atteint également son maximum lors de cette phase ;
- IV : ralentissement de la vitesse de contraction du tronc allant de paire avec la réduction du flux de sève. Atteinte du diamètre minimum du tronc ;
- V : expansion du tronc à la nuit tombée.

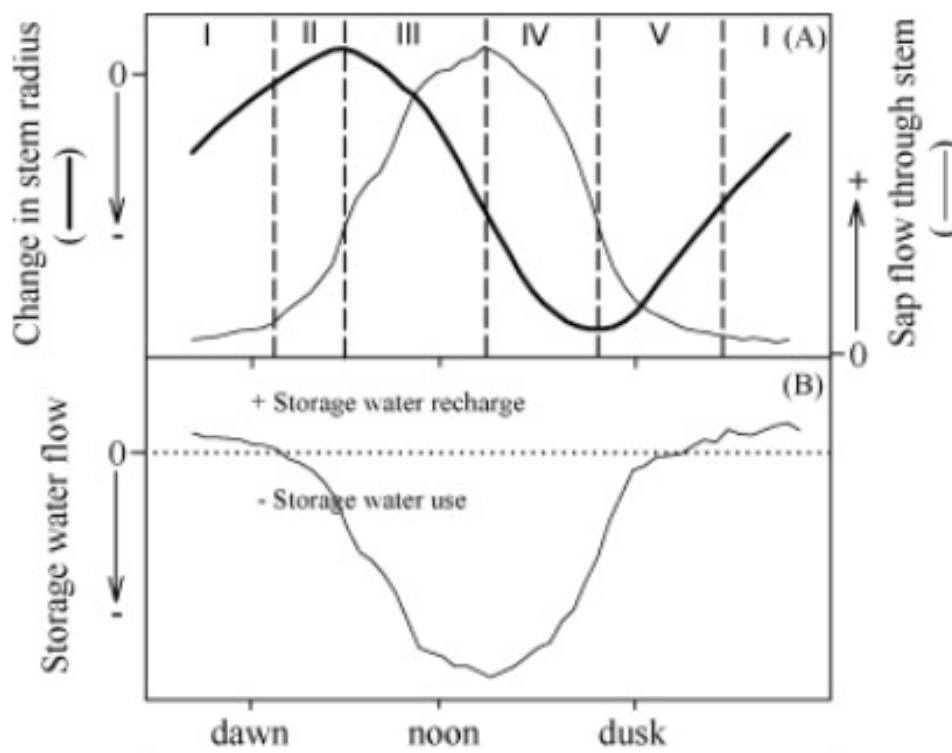


Figure 2.1: Dynamique journalière de croissance et du flux de sève pour un arbre (Fernandez et al., 2010)

On peut simplifier ce schéma en considérant trois phases définies par Downes et al. (1999) et Deslauriers et al. (2003) : (i) une période de contraction entre le diamètre maximum et

minimum de la journée ; (ii) une période de récupération (jusqu'à atteindre le maximum précédent) ; (iii) une période de croissance (jusqu'au maximum suivant) (Downes et al., 1999) ; (Deslauriers et al., 2003).

L'étude de ces fluctuations quotidiennes peut également permettre de mieux comprendre les facteurs influant sur la saisonnalité de la croissance ou les dynamiques de cette dernière (Keymeulen et al., 2024).

Pour le suivi de ces fluctuations, on peut utiliser un outil appelé « dendromètre automatique » (Drew & Downes, 2009). Les dendromètres automatiques sont des outils permettant de suivre et stocker en temps réel les évolutions de la circonférence des arbres (Keymeulen et al., 2024). Plusieurs types de dendromètres automatiques existent ; ceux qui seront utilisés dans cette étude sont des dendromètres à point de la marque Ecomatik (modèle DRW) (Gwenaël et al., 2020). On fera référence à ces derniers par le terme de « dendromètre » dans la suite de ce document. Ils se présentent sous la forme de boîtiers et sont fixés aux arbres à l'aide de vis (annexe E). Les variations du tronc sont mesurées à l'aide d'une pointe et d'un ressort qui sont en appui sur le tronc et reliés à un potentiomètre à l'intérieur du boîtier. Lorsque l'arbre connaît une phase de croissance et donc une expansion de son tronc, une pression s'exerce sur le ressort et le potentiomètre permet d'en déduire une valeur de croissance. Le mécanisme est le même lorsque l'arbre se contracte (Keymeulen et al., 2024).

Les dendromètres permettent un suivi très fin de la croissance des arbres et peuvent notamment être utilisés pour identifier les périodes de stress hydrique (Zweifel et al., 2016). Dans la suite de cette étude, les dendromètres seront donc principalement utilisés pour mieux appréhender les réactions écophysologiques des variétés *Luzette* et *Californie*.

2.5.2 Description du dispositif

Il y a 37 dendromètres à point installés dans le dispositif des Barres (18 sur des individus *Californie* et 18 sur des individus *Luzette*). Le dernier capteur, bloqué au maximum du déplacement possible (2500 mV) sert de témoin et à vocation à détecter d'éventuelles interférences dans le signal et mesures aberrantes (Gwenaël et al., 2020). Les arbres équipés de dendromètres sont également suivis pour la phénologie végétative.

Les dendromètres sont installés sur les troncs à une hauteur de 1,3 m au-dessus du sol. La plupart des arbres équipés de dendromètres se situent dans la modalité « mélange » du bloc 2. Cependant, huit arbres ont été équipés dans les parties pures en *Californie* (*ce*) et *Luzette* (*le*), toujours dans le bloc 2 et en périphérie de la partie en mélange (annexe F).

Table 2.2: Caractéristiques dendrométriques moyennes des arbres instrumentés en 2020

Variété	Circonférence moyenne (cm)	Hauteur moyenne (m)
<i>Luzette</i>	38,3	8,55
<i>Californie</i>	34,0	7,55

Les données présentées ici sont celles mesurées en 2020.

La comparaison des caractéristiques dendrométriques a montré des différences significatives entre la circonférence et la hauteur des deux variétés lors de l'installation des dendromètres en 2020 (test de Kruskal-Wallis, p-values respectives de 0,011 et 0,001 pour la circonférence et la hauteur).

2.5.3 Indicateurs de stress de l'arbre

Ils existent de nombreux indicateurs pour analyser les variations mesurées par les dendromètres. Cette étude utilise un indicateur présenté par Zweifel et al. (2016) et appelé *tree water deficit* (TWD) (Zweifel et al., 2016).

Le TWD est défini comme suit :

$$\text{TWD}_t = \begin{cases} SR_{\max} - SR_t & \text{si } SR_t < SR_{\max} \\ 0 & \text{si } SR_t \geq SR_{\max} \end{cases}$$

Où :

- SR_t (*Stem radius*, rayon du tronc) est la valeur mesurée par le dendromètre à l'instant t .
- SR_{\max} est la valeur maximale mesurée par le dendromètre depuis le début de la saison de végétation.

Le TWD représente donc la différence entre la valeur mesurée la plus élevée et la valeur actuelle si cette dernière est inférieure à la plus élevée.

Un second indicateur est également utilisé dans cette étude et sera désigné par *amplitude de contraction maximale* (AMC). Il ressemble fortement au TWD dans le sens où l'on calcule une amplitude de contraction, mais on le fait pour chaque jour suivant la formule suivante :

$$\text{AMC} = \text{valeur SR max du jour} - \text{valeur SR min du jour}$$

2.5.4 Définition des périodes de stress hydrique

Dans le cadre de cette étude, il est considéré que nous sommes dans une période de stress hydrique si la valeur de la REW est inférieure à 0,4. Le début des périodes de stress hydrique correspond donc au passage sous cette valeur. La fin de ces périodes de stress hydrique correspond au moment où l'on repasse au-dessus de cette valeur seuil.

2.5.5 Préparation des données

Les données issues des dendromètres sont des déplacements en millivolts (mV) sur le rayon. Les données brutes sont dans un premier temps transformées en millimètres (

$$\text{Déplacement (mm)} = \frac{\text{Mesure (mV)} \times 11}{2500}$$

). Ce déplacement sur le rayon est ensuite multiplié par deux pour obtenir le déplacement sur le diamètre de l'arbre.

Les variations du diamètre de l'arbre étant liées à la circonférence initiale de ce dernier, les données sont ensuite « normalisées » par rapport à la taille de l'arbre au début de la saison de végétation suivant la formule suivante :

$$\text{Variation}_{\text{normalisée}} = \frac{\text{Variation}_{\text{brute}}}{\left(\frac{\text{Circ} \times 10}{\pi}\right)}$$

où :

- $\text{Variation}_{\text{normalisée}}$: variations normalisées du diamètre.
- $\text{Variation}_{\text{brute}}$: variations brutes initiales.
- Circ : circonférence en centimètres.
- 10 : conversion de la circonférence de centimètres en millimètres (1 cm = 10 mm).
- π : conversion de la circonférence en diamètre.

2.6 Données de phénotypage

Différentes variables phénotypiques issues des dispositifs des Barres et Battées sont utilisées dans cette étude :

- Hauteur : distance du sol à la cime de l'arbre en centimètres. Mesurée à l'aide d'une perche télescopique. Les hauteurs sont désignées par H_x dans la suite de l'étude avec x le nombre d'années après la plantation.
- Accroissement en hauteur : gain en hauteur en centimètres entre l'année x et l'année y après la plantation. Les accroissements en hauteur sont désignés par Acc_{x_y} .
- Circonférence : circonférence du tronc de l'arbre à 1,30 m du sol en centimètre. Mesurée à l'aide d'un ruban gradué. Les circonférences sont désignées par C_x dans la suite de l'étude avec x le nombre d'années après la plantation.
- Taux de survie : le pourcentage d'arbres vivants x année par la plantation. On le calcule en divisant le nombre d'arbres vivants par le nombre d'arbres installés, puis en multipliant le résultat par 100 pour obtenir un pourcentage. On considère que le taux de survie est correct s'il est supérieur ou égal à 80 % (DSF, 2022).

Ces variables ont été mesurées selon le plan pluriannuel présenté dans le tableau 2.3 :

Pour le site de Battées, seul un nombre restreint d'arbres ont été mesurées pour la hauteur à 12 ans. Une forte corrélation existant entre la circonférence et la hauteur, ces dernières ont été reconstituées dans l'ensemble du dispositif à partir d'un modèle (cf. partie 2.8) établi pour chacune des deux variétés.

Table 2.3: Plan de mesure des dispositifs 'Barres' et 'Battées' pour différentes variables en fonction des années de végétation

Variable	Années de végétation
Barres	
Hauteur et Taux de survie	Installation, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 12, 15
Circonférence	8, 12, 14, 15
Hauteur	12
Battées	
Hauteur et Taux de survie	Installation, 1, 2, 3, 5, 8, 12
Circonférence	8, 12

2.7 Désignation dans le dispositif des Barres

D'après le CNPF, il faut enclencher la première éclaircie d'un peuplement de douglas pour une hauteur dominante comprise entre 12 et 14 m. Il est conseillé d'effectuer cette dernière avant d'atteindre une hauteur dominante de 14 m dans le guide des Douglasaies françaises de l'ONF (Angelier, 2007). Pour le dispositif des Barres, l'éclaircie n'est pas encore faisable techniquement (hauteur dominante de 11,8 m). Pour les besoins de la présente étude, il a été décidé d'effectuer une désignation de tiges d'avenir plutôt que la première éclaircie. Cette dernière est en générale effectuées avant le marquage de la première éclaircie (Angelier, 2007). Pour cette opération, le CNPF préconise la désignation de 180 à 250 tiges d'avenir de douglas par hectare.

Le dispositif de démonstration des Barres est planté avec un espacement de 2,5 m sur la ligne et de 3 m entre les lignes. La densité à l'hectare est donc 1 333 tiges à l'hectare. L'objectif de 200 tiges désignées à l'hectare a été retenu pour le dispositif des Barres, ce qui représente un espacement moyen de 7 m par 7 m. Comme 591 tiges sont présentes, la surface théoriquement plantées est de 0,443 hectare ce qui nous fait un objectif de 89 tiges à désigner dans le dispositif (7 à 8 tiges par sous-bloc). Les consignes pour la désignation des arbres étaient les suivantes :

- La vigueur (diamètre de l'arbre et équilibre du houppier)
- La qualité (pas de fourche en-dessous de 8 m, pas de grosses branches et baïonnettes et absence de blessures) ;
- La répartition dans le dispositif (espacement minimum de 4 m).

Il est normalement nécessaire de créer des cloisonnements d'exploitation (couramment une ligne sur 5) pour permettre la mécanisation des exploitations (CNPF). Nous en avons fait abstraction ici. Cette désignation a été réalisées à « l'aveugle » par les opérateurs Stéphane Matz, Manon Dassé, Nathan Fornes et Baptiste Antoine le 25 juillet 2024. Le terme « à l'aveugle » signifie ici que la désignation s'est déroulée sans que les opérateurs connaissent la modalité (*ce*, *le* ou *me*) dans laquelle ils se trouvaient.

2.8 Analyses statistiques

Les analyses statistiques ont été réalisées avec le logiciel R (version 4.3.3) et depuis l'interface RStudio (version Mountain Hydrangea - 2023.6.0.421).

Reconstitution des hauteurs à 12 ans du dispositif des Battées

Pour la reconstitution des hauteurs à 12 ans du dispositif des Battées, le modèle linéaire suivant a été utilisé :

$$\text{Hauteur} = \beta_0 + \beta_1 \times \text{Circonférence} + \epsilon$$

où :

- Hauteur est la hauteur de l'arbre.
- Circonférence est la circonférence de l'arbre.
- β_0 est l'ordonnée à l'origine (intercept)
- β_1 est le coefficient associé à la circonférence.
- ϵ représente l'erreur aléatoire.

Analyses des données issues des dendromètres

Les comparaisons non-paramétriques concernant les analyses des dendromètres ont été réalisées à l'aide du test de Kruskal-Wallis. L'utilisation de test non-paramétriques résulte du nombre d'individus trop faible pour chaque variété.

Analyses des facteurs *Provenance* et *Composition* pour les dispositifs des Barres et Battées

Les modèles utilisées pour la comparaison des modalités du facteur *composition* des dispositifs des Barres et Battées ont été réalisées avec un modèle linéaire mixte :

$$\text{Variable_réponse}_{ij} = \beta_0 + \beta_1 \times \text{Facteur}_i + u_j + \epsilon_{ij}$$

où :

- $\text{Variable_réponse}_{ij}$ est la hauteur ou la circonférence pour l'arbre i dans le bloc j .
- β_0 est l'ordonnée à l'origine (intercept).
- β_1 est le coefficient associé à la variété *Luzette*.
- Facteur_i est soit le facteur *Provenance*, soit le facteur *Composition*. Pour le premier facteur, cela indique si l'arbre i est de la variété *Luzette* ou *Californie*. Pour le second facteur, cela indique si l'arbre i se situe dans la modalité *ce*, *le* ou *me*.
- u_j est l'effet aléatoire pour le bloc j , $u_j \sim \mathcal{N}(0, \sigma_{\text{Bloc}}^2)$.
- ϵ_{ij} est l'erreur résiduelle, $\epsilon_{ij} \sim \mathcal{N}(0, \sigma_{\text{Residual}}^2)$.

Des transformations de la variable réponse, telles que la mise au carré, ont été effectuées afin de satisfaire aux hypothèses nécessaires à la mise en œuvre de ces modèles. C'est la variété *Californie* qui est utilisée comme référence par les modèles.

Partie 3

Résultats

Sommaire de la partie

3.1	Un décalage de la phénologie végétative	28
3.2	Un comportement différent des variétés selon les conditions climatiques	30
3.2.1	Étude du climat local entre 2020 et 2023 : quatre années contrastées . .	30
3.2.2	Des variations radiales hétérogènes suivant la variété et l'année	32
3.2.3	Comportement des deux variétés pendant les périodes de sécheresse . .	34
3.3	Les performances des variétés sont impactées par le facteur <i>composition</i>	36
3.4	Désignation du dispositif des Barres	38

3.1 Un décalage de la phénologie végétative

L'étude du débourrement végétatif montre une différenciation nette entre les deux variétés : *Californie* débourre systématiquement avant *Luzette* (tableau 3.1).

Table 3.1: Caractéristiques des arbres désignés selon la provenance

Variété	Variable	Année				
		2020	2021	2022	2023	2024
Californie	Min	11-avr	24-avr	12-avr	12-avr	06-avr
	Moy	18-avr	02-mai	18-avr	21-avr	13-avr
	Med	20-avr	04-mai	18-avr	22-avr	12-avr
	Max	26-avr	12-mai	30-avr	02-mai	29-avr
	Amplitude	15	18	18	20	23
Luzette	Min	25-avr	07-mai	22-avr	23-avr	16-avr
	Moy	06-mai	16-mai	01-mai	04-mai	05-mai
	Med	07-mai	15-mai	02-mai	05-mai	07-mai
	Max	15-mai	25-mai	09-mai	10-mai	15-mai
	Amplitude	20	18	17	17	29

Le classement est stable d'une année sur l'autre comme l'illustre la figure 3.1. L'amplitude totale de débourrement est quant à elle assez stable. Seule l'année 2024 se démarque avec une amplitude plus importante et cela particulièrement pour la variété *Luzette*. Le chevauchement des périodes de débourrement entre les deux variétés dépend des années. En effet, certaines années comme 2020 et 2021 se distinguent par des périodes de débourrement assez distinctes. C'est bien moins le cas pour les années 2022, 2023 et 2024 qui présentent plusieurs journées communes pour la période de débourrement.

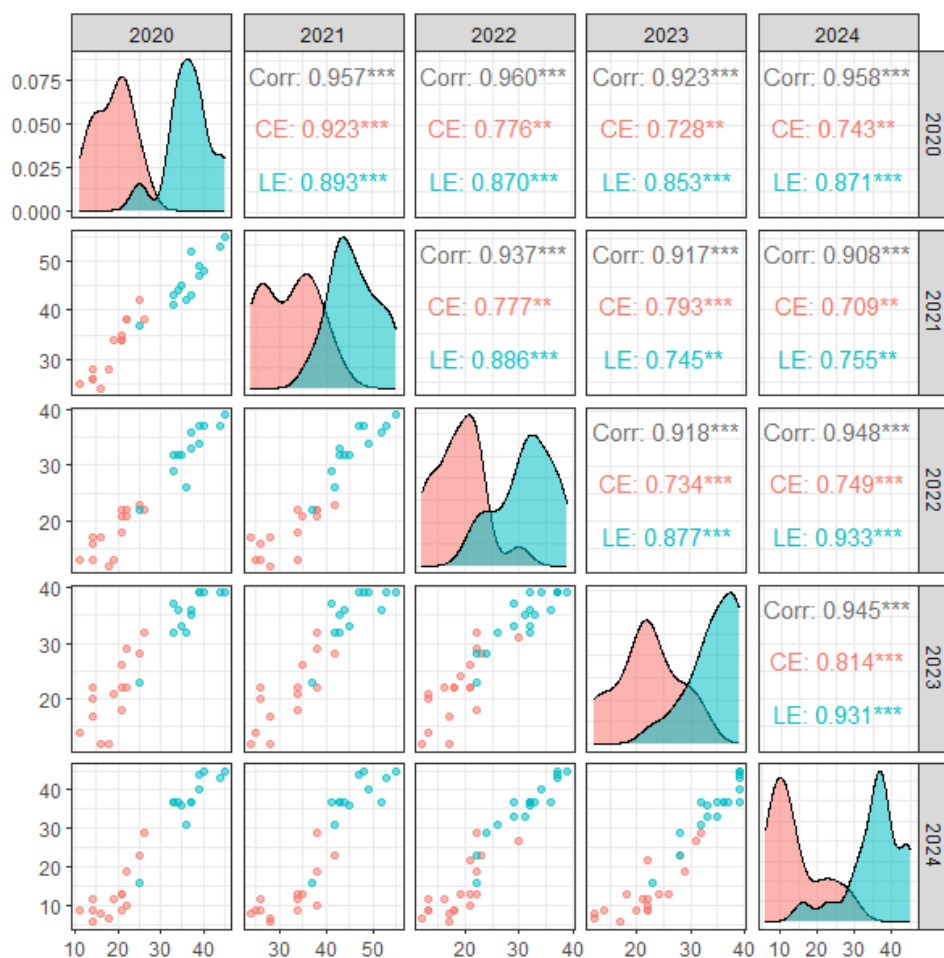


Figure 3.1: Corrélation et amplitude des périodes de débourrement entre 2020 et 2024

La couleur rouge représente les individus *Californie* et la couleur bleu les individus *Luzette*. La partie inférieure gauche de la figure montre la relation entre la date de débourrement de chaque année, avec sur les axes des abscisses et ordonnées le nombre de jour après le premier avril. La diagonale centrale représente la distribution des valeurs et permet d'appréhender les amplitudes de débourrement de chaque variété. La partie supérieure droite permet quant à elle de visualiser la corrélation.

Le modèle proposé par Harrington (figure 3.2) montre que la variété *Californie* nécessite systématiquement moins d'unités de forçage thermique (FU) pour débourrer, pour une quantité équivalente d'unités de froid (CU). Seul un individu de la variété *Californie* (le point rouge au milieu des points bleu) semble se regrouper avec les individus de la variété *Luzette* et

semble nécessiter plus de FU avant de débourrer. Enfin, des arbres (les points rouge sous la courbe noire) ont commencé à débourrer en 2022 et 2024 avant que la possibilité théorique de débourrement du modèle ne soit atteinte.

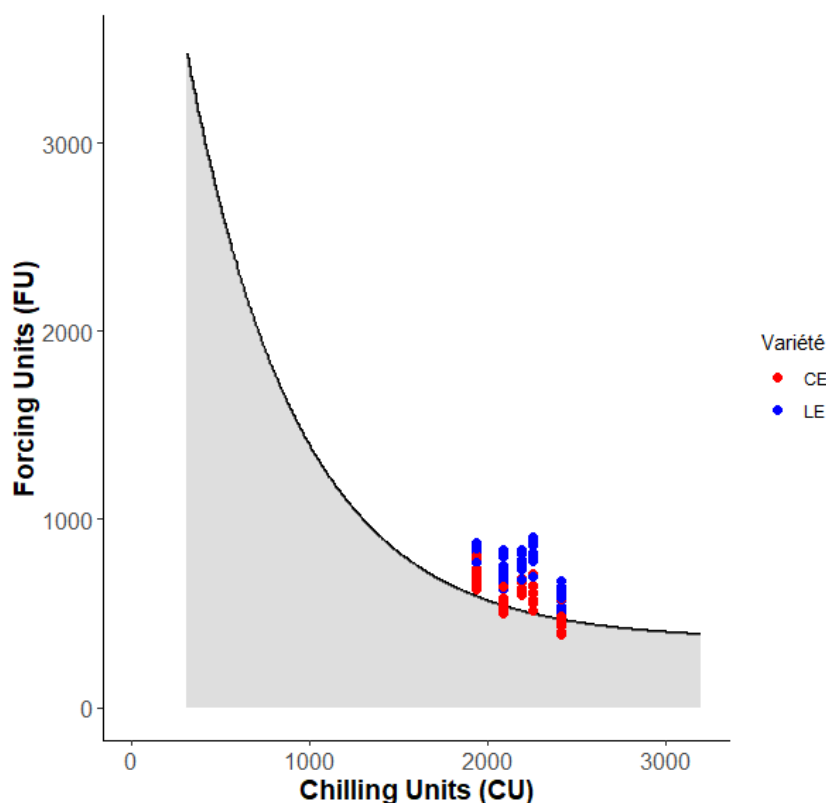


Figure 3.2: Représentation du modèle de Harrington (2010) avec les données phénologiques du dispositif des Barres

La couleur rouge représente les individus Californie et la couleur bleu les individus Luzette. La partie inférieure grisée sous la courbe noire représente la zone pour laquelle il est théoriquement impossible qu'un arbre ne débourre d'après le modèle. Chaque point représente le débourrement d'un arbre. Chaque barres verticales de points représentent une année. On retrouve de gauche à droite les années 2023, 2024, 2021, 2020 et 2022.

3.2 Un comportement différent des variétés selon les conditions climatiques

3.2.1 Étude du climat local entre 2020 et 2023 : quatre années contrastées

Les quatre années de mesures se révèlent être contrastées d'un point de vue climatique. En effet, les années 2020 et 2022 ont été chaudes et avec des déficits en pluviométrie, alors que 2021 est une année que l'on peut qualifier de « classique » (tableau 3.2). Le terme « classique » signifie ici que les conditions climatiques ont été meilleures en comparaison des conditions moyennes depuis

l'installation du dispositif (température moyenne inférieure et précipitations plus importantes, à la fois sur l'année et la saison de végétation.) C'est également l'année se rapprochant le plus des normales climatiques sur la période 1981-2010. Sur cette période de trente ans, la température moyenne annuelle était de 11,3 °C et les précipitations s'établissaient à 741 mm. L'année 2023 se situe quant à elle entre 2020 et 2021 d'un point de vue climatique.

En comparaison avec l'autécologie du douglas (cf. partie 1.1.1), le classement théorique de l'année la plus propice à sa croissance vers la moins propice s'établi de la manière suivante : 2021, 2023, 2020 et 2022.

Table 3.2: Conditions climatiques moyennes pour le dispositif des Barres entre 2020 et 2023

Année	Pluie (mm)	Température moyenne (°C)	Pluie mai-septembre (mm)	Température moyenne mai-septembre (°C)	Indice de stress	Longueur de stress (jours)
2020	728	13.1	254	18.6	91	114
2021	804	11.7	431	17.7	24	40
2022	571	13.3	269	19.5	47	107
2023	790	12.9	304	18.9	94	142

Les données climatiques (tableau 3.2) sont cohérentes avec les données de l'évolution de la réserve en eau relative entre 2020 et 2023 (figure 3.3). L'année 2021 a été peu stressante au regard de l'indice de stress hydrique, l'année 2023 a été marquée par un stress moyen (cumul de plusieurs petits stress) et les années 2020 et 2022 sont caractérisés par des stress importants et de forte amplitude (tableau 3.3).

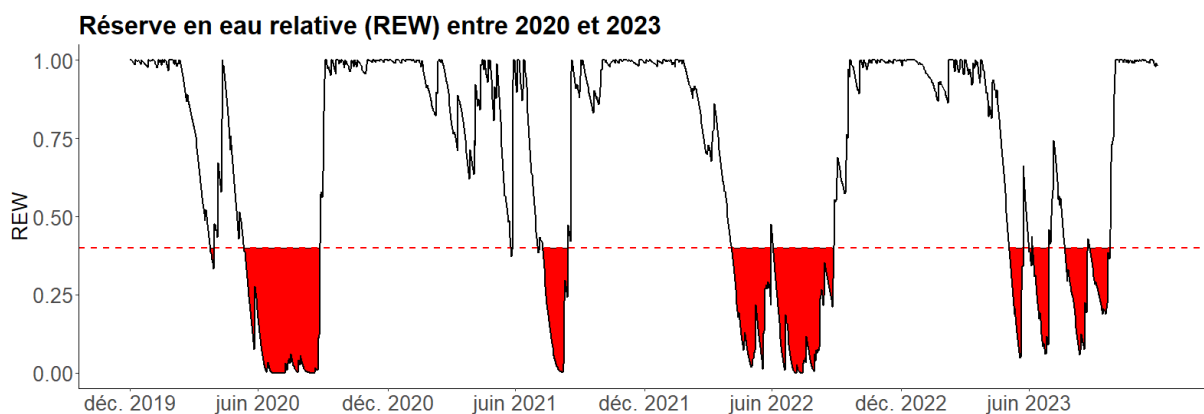


Figure 3.3: Evolution de la réserve relative en eau pour le dispositif des Barres entre 2020 et 2023

Le trait pointillé rouge représente le seuil théorique de régulation stomatique (0,4). Les zones en rouge représentent toutes les périodes de sécheresse.

Table 3.3: Caractéristiques des périodes de sécheresse considérées dans l'étude

Début	Fin	Indice de stress hydrique	Longueur de stress hydrique (jours)
2020			
2020-04-24	2020-04-29	0,51	6
2020-06-11	2020-09-26	90,82	108
2021			
2021-06-26	2021-06-27	0,08	2
2021-08-03	2021-09-13	23,76	38
2022			
2022-05-05	2022-06-29	34,36	56
2022-07-03	2022-09-26	59,30	86
2023			
2023-06-03	2023-06-22	9,28	20
2023-07-01	2023-07-28	12,57	26
2023-08-21	2023-09-22	16,12	33
2023-09-26	2023-10-23	8,92	28

3.2.2 Des variations radiales hétérogènes suivant la variété et l'année

Les deux figures ci-après montrent les données de croissance moyenne par provenance pour les quatre années mesurées. La figure 3.4 (a) représente les variations moyennes du diamètre en millimètres pour chaque année et variété.

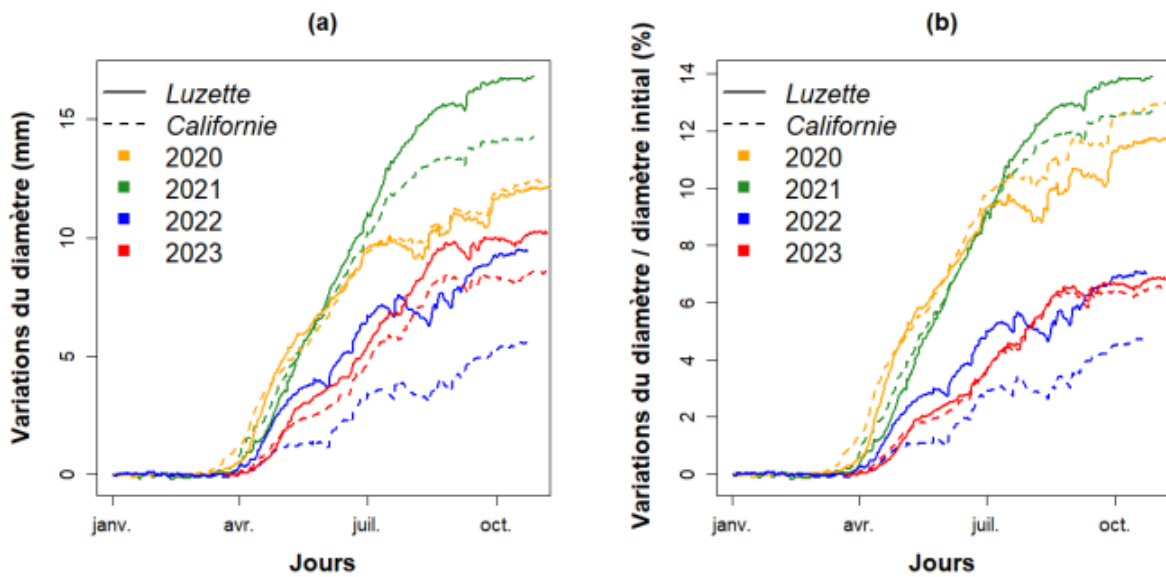


Figure 3.4: Variation du diamètre en millimètre (a) et pourcentage de variation du diamètre par rapport au diamètre du début de saison (b). Les valeurs représentées sont celles de chaque jour à minuit.

Ce sont donc les accroissements réels (données brutes) qui sont représenté et qui traduisent les performances réelles de chaque variété en terme de croissance. La figure 3.4 (b) représente quant à elle les variations relatives par rapport au diamètre initial du tronc en début de saison de végétation. Cette seconde figure permet de mieux comparer les différences de variations entre les années et les variétés, avec la prise en compte du diamètre initial des arbres.

Des accroissements brutes à l'avantage de *Luzette*

Les meilleurs accroissements sur le diamètre ont eu lieu en 2021 pour les deux variétés (tableau 3.4). C'est l'année 2022 qui présente les moins bons accroissements sur le diamètre, particulièrement pour la variété *Californie*.

Table 3.4: Statistiques descriptives des valeurs brutes de croissance à l'arrêt des mesures

Année	Luzette	Californie	Différence (%)	Significativité
2020	12,1 +/- 2,5	12,4 +/- 3,2	-2,4 %	ns
2021	16,8 +/- 4,9	14,2 +/- 3,7	+18,3 %	ns
2022	9,4 +/- 2,0	5,5 +/- 2,2	+70,9 %	***
2023	10,2 +/- 2,9	8,5 +/- 3,4	+20,0 %	ns

Test de *kruskal wallis* : * *p-value* < 0.05 ; ** *p-value* < 0.01 ; *** *p-value* < 0.001 et « ns » non significatif.

La variété *Luzette* se classe presque systématiquement avant la variété *Californie*, sauf pour l'année 2020. Malgré ces différences apparentes entre les deux variétés, ces dernières ne sont pas significatives, mis à part en 2022.

Les courbes issues des dendromètres 3.4 (a et b) confirment la précocité de *Californie* par rapport à *Luzette*. L'initiation de croissance plus tardive de *Luzette* se repère bien en 2020, 2021 et 2023. La conclusion est inverse pour l'année 2022.

Des comportements distincts des variétés suivant les années

Dans la suite des résultats, seules les données après normalisation seront utilisées (tableau 3.5).

Table 3.5: Statistiques descriptives des valeurs normalisées de croissance à l'arrêt des mesures

Année	Luzette	Californie	Différence (%)
2020	11,8 +/- 2,0, Min: 9,4, Max: 15,1	12,9 +/- 3,0, Min: 8,2, Max: 18,6	-8,6 %
2021	13,9 +/- 2,4, Min: 10,1, Max: 19,2	12,7 +/- 2,0, Min: 9,9, Max: 16,9	+9,6 %
2022	7,0 +/- 1,3, Min: 4,4, Max: 9,0	4,7 +/- 1,5, Min: 2,3, Max: 6,9	+48,4 %
2023	6,8 +/- 1,6, Min: 4,1, Max: 9,4	6,5 +/- 1,9, Min: 4,6, Max: 10,7	+4,6 %

Les quatre années se séparent en deux groupes distincts sur les données normalisées (figure 3.5) : 2020 avec 2021 avec de bons accroissements et 2022 avec 2023 avec des accroissements sur le diamètre plus modestes. Les deux variétés n'ont pas le même comportement au sein de ces deux

groupes. Pour le premier (2020-2021), la variété *Luzette* présente une différence significative pour l'accroissement sur le diamètre entre 2020 et 2021, ce qui n'est pas le cas pour la variété *Californie* (tableau 3.6). On tire les conclusions inverses en regardant le groupe numéro deux : la variété *Californie* présente des accroissements significativement différents entre 2022 et 2023, ce qui n'est pas le cas pour la variété *Luzette*.

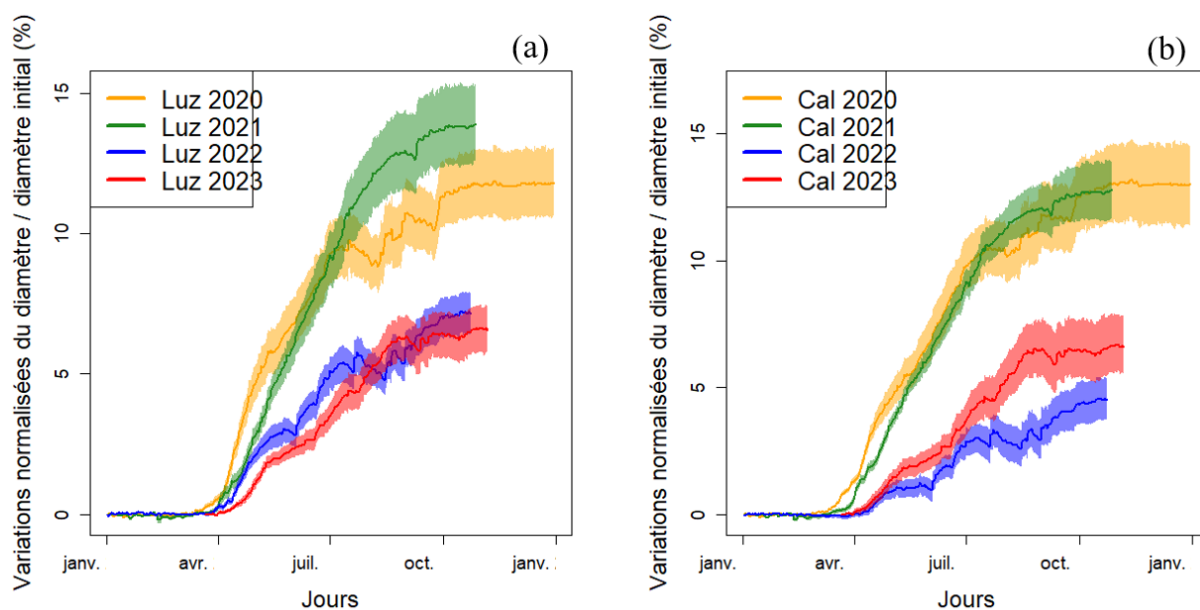


Figure 3.5: Pourcentage de variation du diamètre par rapport au diamètre du début de saison pour Luzette (a) et Californie (b)

3.2.3 Comportement des deux variétés pendant les périodes de sécheresse

Déficit hydrique maximum et moyen

Les résultats comparant les TWD maximum et moyen pour les deux variétés sont présentés dans le tableau 3.6.

Table 3.6: Comparaison de la croissance normalisée entre les années et les variétés

Variété	Année							
	Luz 2020	Luz 2021	Luz 2022	Luz 2023	Cal 2020	Cal 2021	Cal 2022	Cal 2023
Luz 2020	-	-	-	-	-	-	-	-
Luz 2021	*	-	-	-	-	-	-	-
Luz 2022	***	***	-	-	-	-	-	-
Luz 2023	***	***	ns	-	-	-	-	-
Cal 2020	ns	ns	***	***	-	-	-	-
Cal 2021	ns	ns	***	***	ns	-	-	-
Cal 2022	***	***	**	*	***	***	-	-
Cal 2023	***	***	ns	ns	***	***	*	-

Test de kruskal wallis : * p -value < 0.05 ; ** p -value < 0.01 ; *** p -value < 0.001 et « ns » non significatif. Cal pour la variété Californie et Luz pour la variété Luzette.

On observe des différences significatives entre les deux variétés pour certaines périodes. Pour l'année 2020, la variété *Californie* a une valeur de TWD moyenne plus élevée pour la première période de sécheresse. On constate l'inverse lors de la seconde période de sécheresse de l'année 2020 : la variété *Luzette* présente des valeurs plus élevées à la fois pour le TWD maximum et moyen. Ces observations ne sont pas vraies pour l'année 2023 : *Californie* présente des valeurs plus élevées lors de la première, deuxième et quatrième période de sécheresse pour le TWD moyen. Seule la première et seconde période de sécheresse se caractérise par des valeurs plus élevées du TWD maximum de la variété *Californie*.

Un déficit hydrique plus élevé pour *Californie* à l'échelle de l'année

L'étude du TWD cumulé en fonction de l'indice de stress hydrique cumulé montre que la variété *Californie* a des valeurs plus élevées (figure 3.6).

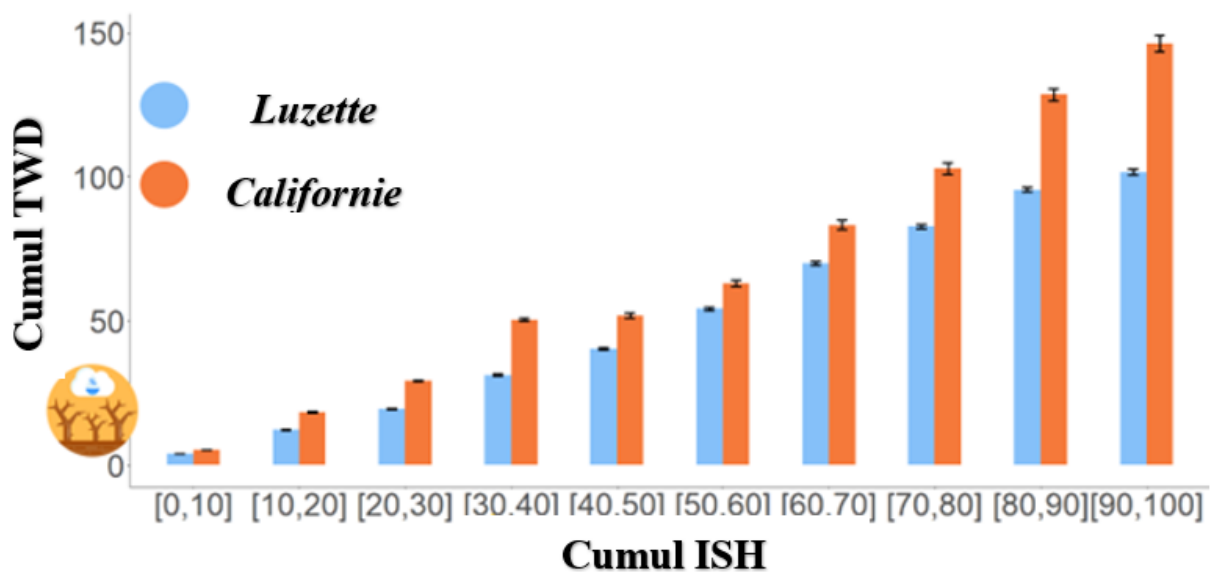


Figure 3.6: Déficit hydrique des arbres (TWD) cumulé en fonction de l'intensité de la sécheresse (ISH)

Une différence de réaction entre les variétés au delà du seuil de régulation stomatique théorique

Si l'on regarde les amplitudes maximale de contraction des deux variétés sur les quatre années, on voit que ces dernières sont similaires jusqu'au seuil de régulation stomatique. *Californie* présente des amplitudes de contraction (AMC) plus élevées que *Luzette* une fois le seuil de régulation stomatique atteint. Cela suggère que *Californie* perd plus d'eau que *Luzette* par la transpiration (figure 3.7).

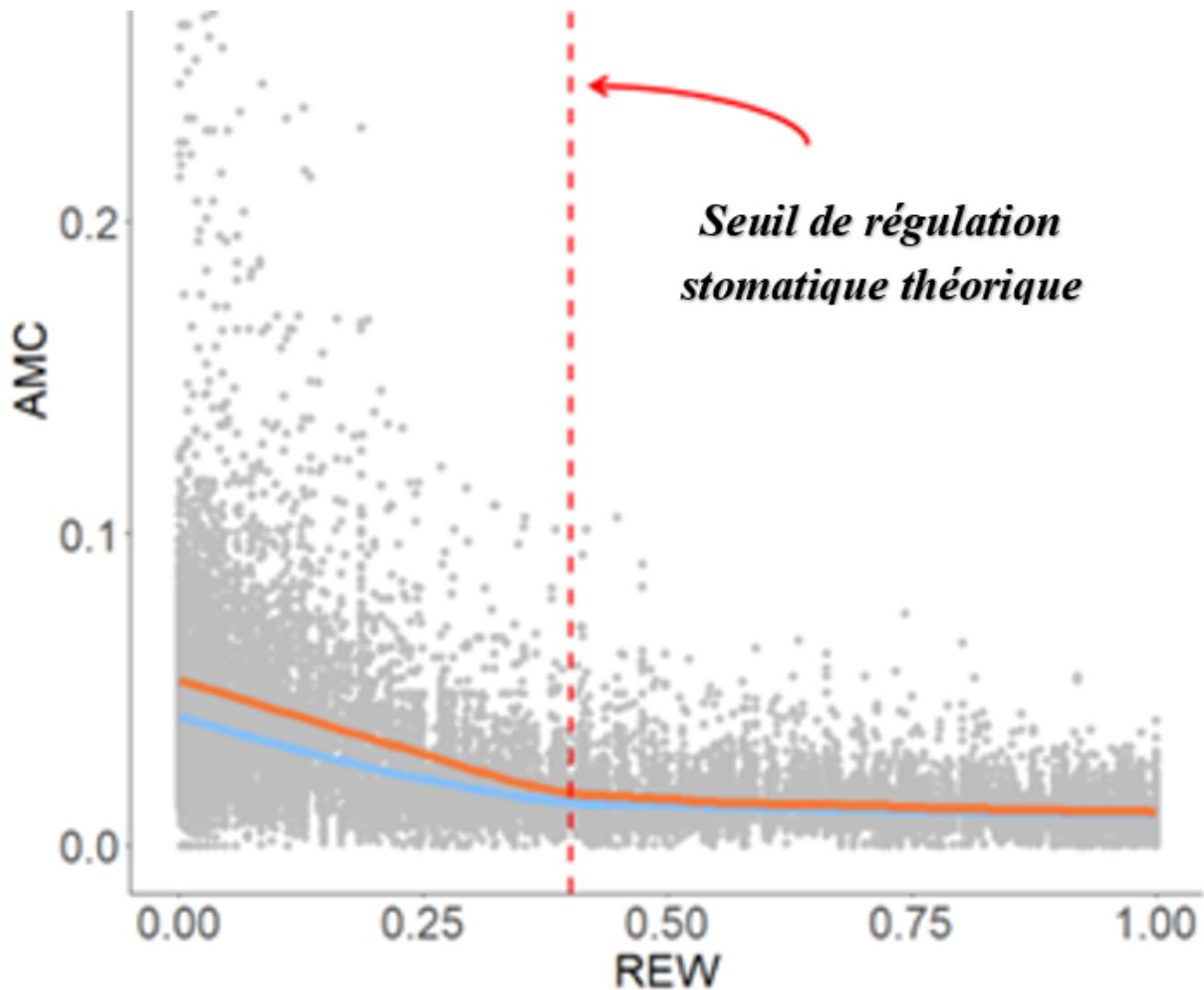


Figure 3.7: Amplitude de contraction maximale journalière du tronc en fonction de réserve en eau relative

Californie en orange et Luzette en bleu. Le REW traduit l'intensité de la sécheresse du sol (valeurs plus faibles signifiant moins d'eau dans le sol). AMC représente la contraction journalière maximale du tronc d'un arbre.

3.3 Les performances des variétés sont impactées par le facteur *composition*

Des différences significatives pour la hauteur et la circonférence entre *Californie* et *Luzette* sont mises en évidence à 15 ans pour le site des Barres. Des conclusions similaires sont faites pour le dispositif de Battées à l'âge de 12 ans.

Dans les deux dispositifs (15 ans pour les Barres et 12 ans pour les Battées), des différences significatives sont observées entre les modalités *le* et *me* par rapport à la modalité *ce*.

Model	term	estimate	std.error	statistic	p.value
H_prov_s	(Intercept)	7.52e+05	3.87e+04	19.41	2.76e-05
H_prov_s	Luzette	3.89e+05	2.99e+04	13.01	4.05e-33
C_prov_s	(Intercept)	37.02	0.70	52.76	2.76e-196
C_prov_s	Luzette	8.41	0.98	8.59	1.42e-16
H_mod_s	(Intercept)	7.76e+05	4.23e+04	18.34	8.82e-07
H_mod_s	Modalitéle	3.07e+05	4.04e+04	7.59	1.81e-13
H_mod_s	Modalitéme	2.10e+05	4.07e+04	5.15	3.94e-07
C_mod_s	(Intercept)	38.95	0.92	42.44	2.66e-160
C_mod_s	Modalitéle	4.29	1.28	3.36	8.54e-04
C_mod_s	Modalitéme	2.73	1.29	2.12	3.47e-02

Table 3.7: Résultats des modèles linéaires mixtes pour le dispositif des Barres

H_prov_s désigne le modèle testant l'effet de la provenance sur la hauteur à 15 ans. *H_mod_s* désigne le modèle testant l'effet de la modalité sur la hauteur à 15 ans. *C_prov_s* désigne le modèle testant l'effet de la provenance sur la circonférence à 15 ans. *C_mod_s* désigne le modèle testant l'effet de la modalité sur la circonférence à 15 ans.

Model	term	estimate	std.error	statistic	p.value
H_prov_s	(Intercept)	415697.24	15152.85	27.43	6.46e-95
H_prov_s	Luzette	270063.95	20529.49	13.15	3.13e-33
C_prov_s	(Intercept)	917.65	49.11	18.69	7.59e-57
C_prov_s	Luzette	643.55	66.53	9.67	4.49e-20
H_mod_s	(Intercept)	434413.24	19304.02	22.50	1.30e-73
H_mod_s	Modalitéle	263378.56	26386.70	9.98	3.79e-21
H_mod_s	Modalitéme	100784.02	27458.27	3.67	2.74e-04
C_mod_s	(Intercept)	973.57	60.73	16.03	2.96e-45
C_mod_s	Modalitéle	626.18	83.01	7.54	2.97e-13
C_mod_s	Modalitéme	205.62	86.38	2.38	1.77e-02

Table 3.8: Résultats des modèles linéaires mixtes pour le dispositif des Battées

H_prov_s désigne le modèle testant l'effet de la provenance sur la hauteur à 15 ans. *H_mod_s* désigne le modèle testant l'effet de la modalité sur la hauteur à 15 ans. *C_prov_s* désigne le modèle testant l'effet de la provenance sur la circonférence à 15 ans. *C_mod_s* désigne le modèle testant l'effet de la modalité sur la circonférence à 15 ans.

Focus sur les variétés dans le mélange

La variété *Luzette* se caractérise par une hauteur et une circonférence significativement plus élevée dans le dispositif des Barres lorsqu'il est en mélange, en comparaison des individus *Californie* (mélange et pur) et des individus *Luzette* dans la composition pure (tableau 3.9). La supériorité de *Luzette* (composition mélange) ne se vérifie pas dans le dispositif des Battées (tableau 3.10).

Composition	Moyenne H15 (cm)	H15 SD	Moyenne C15 (cm)	C15 SD
Californie pur	859	189	39.0	11.0
Luzette pur	1029	162	43.2	8.88
Californie mélange	812	212	33.2	12.1
Luzette mélange	1112	137	49.9	8.18

Table 3.9: Caractéristiques des provenances dans chaque modalité de composition pour le dispositif des Barres à 15 ans

Composition	Moyenne H12 (cm)	H12 SD	Moyenne C12 (cm)	C12 SD
Californie pur	551	270	28.8	12.0
Luzette pur	793	218	39.0	9.06
Californie mélange	563	255	25.6	11.5
Luzette mélange	781	149	36.9	11.0

Table 3.10: Caractéristiques des provenances dans chaque modalité de composition pour le dispositif des Battées à 12 ans

Par ailleurs, il est important de noter que les écart-types sont très élevées, notamment pour la variété *Californie*, ce qui indique une grande variabilité parmi les individus mesurés.

3.4 Désignation du dispositif des Barres

Lors de la désignation, un total de 82 arbres a été sélectionnés (33 % de la variété *Californie* et 67 % de la variété *Luzette*). Les arbres semblent bien répartis dans le dispositif après analyse visuelle (annexe G). Les individus désignés ont des circonférences très proches pour les deux variétés dans l'ensemble du dispositif (tableau 3.11 et 3.12).

Provenance	Nombre	C (cm)	H (cm)
Californie	27	51,9 +/- 6,44	1055 +/- 110
Luzette	55	51,6 +/- 6,36	1132 +/- 123

Table 3.11: Caractéristiques des provenances dans le dispositif des Barres.

Composition	Nombre	C (cm)	H (cm)
ce	25	51,6 +/- 6,59	1050 +/- 113
le	31	49,97 +/- 5,68	1112 +/- 134
me	26	53,85 +/- 6,45	1154 +/- 100

Table 3.12: Caractéristiques des compositions pour le dispositif des Barres.

Caractéristiques des arbres désignés

Les individus Luzette désignés se caractérisent par une hauteur moyenne de 11,32 m (écart-type de 123 cm) et une circonférence moyenne de 51,6 cm (écart-type de 6,36 cm). Les valeurs présentées sont celles 15 ans après la plantation (tableau 3.13).

Modalité	Provenance	Bloc	Nombre	C (moyenne +/- sd)	H (moyenne +/- sd)
ce	CE	1	6	52,3 +/- 3,56	1091 +/- 84,4
ce	CE	2	6	49,8 +/- 8,40	1031 +/- 127,0
ce	CE	3	7	47,7 +/- 6,40	981 +/- 122,0
ce	CE	4	6	57,2 +/- 3,66	1108 +/- 81,6
le	LE	1	8	51,2 +/- 6,52	1181 +/- 88,8
le	LE	2	7	50,9 +/- 3,76	1160 +/- 92,7
le	LE	3	8	45,2 +/- 4,83	962 +/- 130,0
le	LE	4	8	52,6 +/- 4,93	1153 +/- 97,0
me	CE	1	1	57 +/- NA	1135 +/- NA
me	CE	2	1	55 +/- NA	1119 +/- NA
me	LE	1	5	50,4 +/- 3,51	1102 +/- 87,2
me	LE	2	5	54 +/- 9,77	1158 +/- 76,8
me	LE	3	7	54,1 +/- 5,84	1142 +/- 144,0
me	LE	4	7	55,3 +/- 7,30	1208 +/- 76,0

Table 3.13: Caractéristiques par composition et provenance pour les arbres désignés

Des différences significatives existent entre les blocs pour la circonférences des arbres désignés (tableau 3.14). Concernant la hauteur, il y a des différences significatives en fonction de la composition, au détriment de *ce*. Enfin, les deux variétés diffèrent également de manière significative (tableau 3.15).

Table 3.14: Comparaison statistiques pour la circonférence des arbres désignés

Variable	p-value	Différence significative
Mélange	0.1071	Non
Bloc	0.04574	Oui (Blocs 2-4 et 3-4, p = 0.042 et p = 0.002)
Variété	0.5174	Non

Table 3.15: Comparaison statistiques pour la hauteur des arbres désignés

Variable	p-value	Différence significative
Modalité	0.01	Oui (Entre <i>ce-le</i> et <i>ce-me</i> , p = 0.019 et p = 0.001)
Bloc	0.01	Oui (Bloc 3 différent des autres)
Variété	0.00531	Oui

En comparaison avec le reste du peuplement, les tiges sélectionnées présentent des caractéristiques dendrométriques moyennes supérieures :

- Modalité *le* avec plus 15,6 % pour la circonférence et plus 8,1 % pour la hauteur ;
- Modalité *me* avec plus 29,2 % pour la circonférence et plus 19,7 % pour la hauteur ;
- Modalité *ce* avec plus 32,5 % pour la circonférence et plus 22,2 % pour la hauteur.

Partie 4

Discussion

Sommaire de la partie

4.1	La phénologie	41
4.2	Les dendromètres	42
4.2.1	Critiques sur le schéma d'installation et les outils de mesure	42
4.2.2	Croissance contrastée suivant les conditions climatiques	42
4.2.3	Réaction des variétés face à la sécheresse	43
4.2.4	Influence de la période de sécheresse sur les deux variétés	46
4.2.5	Limites de l'étude	47
4.3	Intérêt du mélange des variétés <i>Luzette</i> et <i>Californie</i>	47
4.3.1	Les différentes modalités de composition	47
4.3.2	Les arbres désignés	47
4.4	Avenir du douglas en France dans le contexte du changement climatique	48
4.4.1	Intérêts des variétés améliorées de douglas	48
4.4.2	Perspectives	49

4.1 La phénologie

Les différences pour les périodes de débourrement (amplitude) d'une année à l'autre s'expliquent principalement par les conditions climatiques. En effet, si les besoins en unités de refroidissements (CU) peuvent avoir été satisfait pendant l'hiver, l'arbre a toujours besoin d'unités de réchauffements pour débourrer. Ainsi, si un arbre a atteint les conditions qui lui sont nécessaires, il peut débourrer. Si les conditions climatiques viennent à se détériorer (baisse des températures, ensoleillement moindre, etc) après que le débourrement des premiers individus, les individus restants peuvent mettre plus de temps pour satisfaire leurs besoins en unités de réchauffements (FU).

Le comportement différent de l'individu *Californie* nécessitant plus d'unités de réchauffement (FU) et se regroupant avec les individus *Luzette* pourrait s'expliquer par la diversité génétique qui caractérise chaque verger. En effet, une provenance de l'État de Washington étant présente

dans le verger *PME-006 Californie*, il est plausible que l'individu *Californie* différent possède des gènes plus proches de ceux des clones de cet État (Washington).

Le débourrement d'individus *Californie* avant la possibilité théorique définie par le modèle peut s'expliquer de plusieurs manières. Premièrement, le modèle a été paramétré sur des provenances des États de Washington et d'Oregon (Harrington et al., 2010) et n'est donc pas nécessairement bien adapté aux provenances plus méridionales. Deuxièmement, l'étude utilisée fait mention d'individus débourrant avant la possibilité théorique, le modèle ayant été paramétré avec des valeurs utilisant des moyennes (Harrington et al., 2010).

4.2 Les dendromètres

4.2.1 Critiques sur le schéma d'installation et les outils de mesure

Les dendromètres automatiques ont été installés dans une partie du dispositif où les deux variétés étudiées sont en mélange pied à pied. Bien que la sélection des arbres équipés ait été réalisée pour avoir des arbres dominants et codominants, des différences significatives existent entre les deux variétés pour la hauteur et la circonférence des arbres retenus dans cette installation. De plus, les individus *Luzette* présente des hauteurs et circonférences plus élevées dans les parties en mélange du dispositif en comparaison des parties pures, au détriment des individus *Californie*. Un effet « concurrence » est donc à craindre dans le dispositif, principalement au détriment des individus *Californie*. En effet, les dendromètres ont été installés lorsque le dispositif était âgé de douze ans. Il en a maintenant quinze et l'on s'approche de la première éclaircie. Cette compétition croissante est confirmée par le suivi annuel du débourrement, avec un rapprochement progressif du houppier des arbres rendant les observations de plus en plus difficile.

Par ailleurs, les dendromètres installés en 2020 étaient neufs et calibrés. Bien que le modèle de ces derniers soit spécialement renforcé pour les conditions extérieures (Gwenaël et al., 2020), les capteurs sont soumis à de rudes conditions (l'ensemble des conditions climatiques subies, mais également un chevreuil ayant élu domicile dans la parcelle). Se pose alors la question de la calibration des dendromètres, étape importante pour que la relation entre le déplacement en millivolt et les 11 mm de croissance reste véridique.

4.2.2 Croissance contrastée suivant les conditions climatiques

L'année 2021 se classe en première position pour la croissance, ce qui est en accord avec les conditions climatiques particulièrement favorables au douglas lors cette dernière. La croissance la plus faible a été enregistrée lors de l'année 2022. C'est une fois de plus en accord avec les données climatiques, cette année-là se caractérisant par des températures maximales records (température moyenne annuelle la plus élevée depuis 1970 pour le domaine des Barres) et précipitations relativement faibles (se situant dans le quart inférieur du classement) (Thomas Perot, communication personnelle).

Les conditions climatiques de l'année 2023 étant plus favorable au douglas que celles de l'année 2022 et similaires à celle de 2020, on pouvait s'attendre à une croissance plus importante

pour cette année-là (2023). L'année 2023 se classe finalement au même niveau que 2022 pour la croissance. Cela peut s'expliquer par les sécheresses peu intenses et répétées, un ensoleillement moindre qui aurait pu réduire l'activité photosynthétique, un niveau de compétition croissant dans le dispositif ou encore des arrières-effets de l'année 2022. La sécheresse intense de cette année là et les impacts qu'elle a eu sur la croissance des arbres du dispositif peut laisser penser que le douglas a besoin d'une année ou plus pour récupérer complètement.

Concernant la mauvaise croissance des individus *Californie* en 2022, plusieurs hypothèses sont possibles. La première serait une combinaison entre les mauvaises conditions climatiques et la compétition importante imposée par la variété *Luzette*. Cependant, en 2023, le niveau de croissance de *Californie* se rapproche de celui de *Luzette*, suggérant que la compétition n'est pas ou peu en cause dans les différences de croissance. Pour confirmer cette hypothèse, il serait nécessaire de quantifier le niveau de compétition subit par chaque individus et l'inclure dans les analyses. La seconde hypothèse, bien plus probable serait la conséquence de l'hiver 2021 – 2022 que l'on peut qualifier de sec avec un stress hydrique printanier qui aurait impacté négativement Californie.

Au niveau national, les peuplements de douglas se sont révélées être très touchés par des évènements de rougissement physiologique (Carouille, 2022). Ce phénomène se caractérise par une perte en eau des arbres non compensées par le système racinaire. Il est plausible que les douglas présents dans le dispositif aient été touchés par le phénomène sans en présenter les symptômes, du fait de l'âge déjà avancé du peuplement. En effet, le rouge physiologique touche principalement les plantations et jeunes peuplements.

4.2.3 Réaction des variétés face à la sécheresse

L'étude des valeurs de déficit hydrique des arbres (TWD) pendant les période de sécheresse a montré des différences significatives pour les années 2020 et 2023. Ces différences sont principalement significatives pour les valeurs moyennes de TWD (cinq fois contre deux fois pour les valeurs maximales). Les valeurs maximales de TWD nous informent sur le déficit hydrique maximum des arbres pendant la période de sécheresse alors que les valeurs moyennes de TWD nous informent sur le niveau de déficit hydrique moyen des arbres pendant la périodes de sécheresse.

Concernant les années 2021 et 2022 les analyses n'ont pas montrées de différences significatives. Les conditions climatiques de l'année 2021 ayant été tout à fait correcte pour le douglas, cette absence de différence n'est pas forcément surprenante. Elle l'est beaucoup plus pour l'année 2022 qui s'est caractérisée par une sécheresse importante et pour laquelle on aurait pu s'attendre à voir la variété *Luzette* avec des valeurs maximales et moyennes de TWD plus élevée.

La partie montrant l'évolution du cumul du TWD au cours de la saison de végétation en fonction de l'indice de stress hydrique nous apporte plus d'éléments de réponse. Encore une fois, les résultats ne sont pas cohérent avec l'hypothèse d'une meilleure tolérance de la sécheresse de la variété *Californie*. En effet, les valeurs cumulées de TWD de cette dernière augmentent plus rapidement que celle de la variété *Luzette*, mais cela est cohérent avec les valeurs significativement plus élevées de la variété *Californie* pour les valeurs moyennes de TWD.

La partie montrant l'évolution du cumul du TWD au cours de la saison de végétation en fonction de l'indice de stress hydrique (ISH) apporte plus d'éléments de réponse. Encore une fois, les résultats ne sont pas cohérents avec l'hypothèse d'une meilleure tolérance de la sécheresse de la variété *Californie*.

En effet, la variété *Californie* présente des valeurs de déficit hydrique de l'arbre plus élevées que celle de la variété *Luzette*, suggérant ainsi une plus forte sensibilité à la sécheresse. Néanmoins, il apparaît que les deux variétés diffèrent peut souvent pour les valeurs maximales de TWD, ce qui amène à tempérer les constats précédents.

Comment expliquer ce phénomène ?

D'après Zweifel et al. (2016), la perte de diamètre d'un arbre est systématiquement dû à une diminution de l'eau stockée dans son tronc et va ainsi de pair avec une augmentation du TWD (Zweifel et al., 2016).

Ainsi, lorsqu'un l'arbre subit un stress hydrique et ne parvient pas à reconstituer pleinement ses réserves en eau, le TWD reste supérieur à zéro : la diminution du diamètre due à l'évapotranspiration pendant la journée n'est pas compensée par la recharge en eau nocturne. La diminution de diamètre du tronc est donc dû à la différence de potentiel hydrique entre le xylème et le réservoir d'eau.

Le reste du temps, lorsque l'arbre arrive à reconstituer sa réserve en eau pendant la nuit, le TWD au cours de la journée va s'expliquer par une diminution de l'eau stockée dans le réservoir de l'arbre. Cependant, cette dernière sera déterminée par la demande climatique (ETP), la surface foliaire, la densité de stomate, le seuil de déclenchement de la fermeture des stomates, etc. Des valeurs de déficit hydrique de l'arbre (TWD) plus élevées pendant ces périodes non-stressantes pourraient donc s'expliquer par des taux de transpiration plus importants. Cette hypothèse est confirmée par l'étude des amplitudes de contractions maximales journalières (AMC) : la variété *Californie* présente des valeurs plus élevées. Cela est encore plus vrai lorsque la valeur de la réserve en eau du sol (REW) diminue.

Ces résultats peuvent être comparés à ceux d'essais sous serre réalisés entre 2012 et 2015 par le réseau VFA – Douglas et comparant la variété *Californie* et la variété *Luzette* ou *Washington 2*. L'objectif de ces essais étaient d'évaluer la tolérance à la sécheresse de ces variétés. Ils ont notamment montré que la variété *Californie* nécessitait des apports en eau plus importants pour maintenir une teneur en eau du substrat prédéfinie, ce qui suggère une fois encore une transpiration plus élevée.

Douglas et stratégie face à la sécheresse

Dans les stratégies d'adaptation à la sécheresse et les mécanismes de régulation stomatique, on peut distinguer des comportements différents. D'un côté les végétaux mettant en place une régulation stricte de leur transpiration lors des premiers signes de stress hydrique et de l'autre côté les végétaux continuant de transpirer à des taux assez importants, même en cas de stress hydrique. Les premiers sont qualifiés d'isohydriques et les seconds d'anisohydriques (Zhang

et al., 2020). Malgré cette définition plutôt claire, il n'est pas toujours évident de qualifier une espèce d'isohydrique ou anisohydrique.

Le sujet ne semble d'ailleurs pas tranché pour le douglas. En effet, plusieurs études semblent tendre à dire que le douglas est une essence isohydrique (Bond et Kavanagh, 1999 ; Johnson et al., 2009 ; Thurm et al., 2016). Angelier (2007) nuance plus cette tendance : le douglas aurait une stratégie intermédiaire entre le pin sylvestre (isohydrique) et le chêne sessile (anisohydrique). Bansal va même jusqu'à déclarer que le douglas garde ses stomates ouverts le plus longtemps possible, au risque de subir des embolies du xylème (Watts et al., 2015).

Indépendamment du comportement isohydrique ou anisohydrique du douglas, les résultats présentés dans cette étude semblent montrer une tendance plus anisohydrique de la variété *Californie* en comparaison de la variété *Luzette*.

Levitt (1972) a également présenté deux mécanismes pour la tolérance à la sécheresse. Le premier s'appuyant sur la conservation de l'eau (water savers) et le second s'appuyant sur la consommation de l'eau (water spenders). Le premier groupe va mettre en place des stratégies de régulation de la transpiration, alors que le second va consommer l'eau plus rapidement pour pouvoir compenser sa transpiration plus importante.

Plusieurs études ont montré que les végétaux utilisant ces deux stratégies ajustaient des paramètres physiologiques tels que l'efficacité d'utilisation de l'eau ou la conductance stomatique pour faire face aux conditions de stress hydrique (Wang et al., 2021 ; Querejeta, 2018). Les plantes ayant une stratégie de consommation de l'eau auraient une conductance stomatique assez faible et une bonne efficacité dans l'utilisation de l'eau alors que ce serait l'inverse pour les plantes utilisant une stratégie de conservation d'eau (Cramer et al., 2009 ; Prieto et al., 2018 ; Wang et al., 2021). En effet, une faible efficacité de l'utilisation de l'eau est signe d'une bonne absorption de l'eau (Moreno-Gutiérrez et al., 2012, Ding et al., 2021).

Zhang et Marshall (1995) ont montré que les provenances côtières (de l'État d'Oregon jusqu'en Colombie-Britannique) et particulièrement celle provenant de basse altitude avaient une conductance stomatique et une discrimination isotopique (*delta*) plus faibles que des provenances intérieures. Ils ont également montré que la surface foliaire spécifique variait négativement avec le facteur *delta*. Zhang et al. (1993) a par ailleurs montré que les provenances côtières voyaient leur transpiration se réduire plus rapidement dans la journée en comparaison des provenances intérieures. Anekonda et al. (2004) ont montrés des résultats similaires (Anekonda et al., 2004). Darychuk et al. (2012) ont quant à eux montré que les provenances présentant des croissances rapides avaient une meilleure efficacité de l'utilisation de l'eau découlant d'une fermeture des stomates pendant les périodes sèches (Differences in physiology and growth between coastal and inland varieties of Douglas-fir seedlings in a common garden et al., 2012). Une autre étude a quant à elle montrée une meilleure efficacité de l'utilisation de l'eau des provenances de haute altitude et ayant des croissances plus faibles (Compton et al., 2023). Enfin, Grieu et al. (1988) ont montré qu'une provenance plus tolérante à la sécheresse du nord de Los-Angeles avait une stratégie d'utilisation de l'eau moins conservatrice en comparaison d'une provenance de l'État de Washington (Grieu et al., 1988).

Implications pour les deux variétés :

La stratégie de conservation d'eau implique une croissance réduite en période de sécheresse en raison de la régulation de la transpiration. En cas de sécheresse prolongée, cette stratégie peut entraîner la mort du végétal par un manque d'absorption de carbone (McDowell et al., 2008). La stratégie de consommation d'eau implique quant à elle une activité photosynthétique qui reste plus importante pendant la période de sécheresse et une efficacité d'utilisation de l'eau plus faible. Cela signifie que les végétaux utilisant cette stratégie produisent moins de biomasse, et ont un taux de croissance plus élevé lors du retour des précipitations. En cas de sécheresse prolongé, le risque principal pour le végétal est la mort induite par des phénomènes de cavitation trop nombreux (McDowell et al., 2008).

À environnement égal et au vu de la meilleure utilisation de l'eau par *Luzette*, *Californie* poussera toujours moins. Si la sécheresse est trop prolongée, *Californie* pourrait présenter un risque plus élevé de mourir, du moins de manière plus précoce que *Luzette*. C'est d'ailleurs ce qu'il s'est passé dans les essais en serre pour les modalités les plus stressantes.

4.2.4 Influence de la période de sécheresse sur les deux variétés

La période d'occurrence des sécheresses pourrait avoir un impact différent sur les deux variétés. En effet, les résultats tendent à montrer qu'une sécheresse précoce (comme en 2022) soit plus néfaste pour la variété *Californie*. À l'inverse, une sécheresse plus tardive (comme en 2020) semble impacter plus amplement la variété *Luzette*.

Cela peut être dû en partie au décalage phénologique entre les deux variétés : en cas de sécheresse arrivant au cours de l'été, la variété *Californie* pourrait avoir profité de son débourrement plus précoce et ainsi profiter de conditions plus favorables. Ainsi, une étude a montré qu'une sécheresse estivale n'était pas critique pour la croissance radiale dans un site sec des Alpes ; au contraire d'un automne et printemps secs qui avaient un fort impact sur la croissance radiale (Lévesque et al., 2014). Guisset et al. (2023) ont par ailleurs montrés que la croissance radiale du douglas était favorisée par des hivers et printemps humides et doux. Un début d'été humide favorisait également la croissance radiale (Guisset et al., 2023).

Une croissance supérieure de la variété *Californie* par rapport à la variété *Luzette* pourrait donc être dû à des conditions climatiques printanières favorables (chaud et humide) combinées à un été marqué par un stress hydrique important. La variété *Californie* profiterait alors de son débourrement plus précoce pour maximiser sa croissance avant la sécheresse, au contraire de *Luzette* qui pourrait réguler sa transpiration de manière anticipée pour faire face au stress hydrique estival.

A contrario, en 2022, les individus *Californie* se sont presque immédiatement retrouvés en situation de stress hydrique ce qui a considérablement impacté sa croissance radiale. Il en est de même pour les individus *Luzette*, mais dans des proportions bien moins importantes, peut-être dû à sa meilleure utilisation de l'eau.

4.2.5 Limites de l'étude

De nombreuses limites existent dans le cadre de cette étude. En effet, s'il est particulièrement intéressant de s'appuyer sur quatre années contrastées d'un point de vue climatique, il est nécessaire de pouvoir répéter les conditions expérimentales pour pouvoir étayer les hypothèses développées.

Par ailleurs, les dendromètres étant installés dans une partie du dispositif où les arbres sont mélangés pied à pied entre les deux variétés amène peut-être des facteurs de confusion dans l'analyse. De plus, il faut garder à l'esprit que le dispositif des Barres n'est pas situé dans une zone spécialement propice au douglas. Enfin, aucune mortalité ou quelconque événement de dépérissement n'a été enregistré parmi les arbres équipés de dendromètres automatiques.

Il serait donc intéressant de pouvoir poursuivre les mesures ou de multiplier les dispositifs équipés de dendromètres automatiques pour mieux appréhender les réactions à la sécheresse de ces deux variétés.

4.3 Intérêt du mélange des variétés *Luzette* et *Californie*

4.3.1 Les différentes modalités de composition

L'étude des différentes modalités de composition dans les dispositifs des Barres et Battées a permis de faire ressortir un classement dans les performances de ces dernières. C'est la modalité *Luzette pur* du facteur *composition* qui présente les meilleures caractéristiques, suivi de la modalité *mélange* et de la modalité *Californie pur* du facteur *composition*. Cette dernière est significativement différente des deux autres. Ce classement est cohérent. En effet, les individus *Luzette* se caractérisent par une meilleure croissance générale que les individus *Californie*. Par conséquent, les individus *Californie* subissent très certainement une concurrence plus importante dans la modalité *mélange* du facteur *composition* du fait de la présence des individus *Luzette*. Comme évoqué précédemment, il serait intéressant de caractériser ce niveau de concurrence à l'échelle de chaque individu afin d'intégrer cette variable dans les analyses futures. Cela pourrait concerner les analyses de ce dispositif, mais également celles des autres dispositifs du réseau VFA – Douglas.

4.3.2 Les arbres désignés

La sélection d'arbres d'avenir dans le dispositif montre une nette amélioration des caractéristiques dendrométriques de ces derniers en comparaison des caractéristiques moyennes des individus. Cela est particulièrement vrai pour les individus de la variété *Californie* ce qui est encourageant dans l'optique de la constitution d'un peuplement de qualité.

Cependant, il s'avère que très peu d'individus de la variété *Californie* ait été désigné dans la modalité de composition *mélange*. La désignation s'est déroulée à l'aveugle, mais les individus *Californie* se repèrent assez facilement ; ils ont en effet en général un feuillage plus clairsemé. L'explication la plus plausible pour ce faible pourcentage d'individus *Californie* désignés dans

le *mélange* reste malgré tout la moindre compétition des individus *Californie* envers les individus *Luzette* dans cette modalité. Ainsi, les individus *Luzette* sont plus avantageés et sont indirectement plus désignés.

Dans la modalité de modalité *Californie pur*, les individus *Californie* désignés se révèlent être de de dimension comparable avec les individus *Luzette* pour la circonférence. Ce n'est pas le cas pour la hauteur avec la modalité de composition *ce* présentant des hauteurs moins importantes. Cette hauteur moins importante va entraîner une baisse du volume total de l'arbre. Cependant, on peut se demander quel impact économique ces différences de dimensions peuvent avoir. Considérant que la majorité de la valeur de l'arbre se situe dans la bille de pied, cela n'est pas forcément très préjudiciable. Cependant, des produits secondaires sont généralement réalisés jusqu'à un diamètre fin bout de 7 cm, la perte de volume mobilisable pourrait donc être assez considérable.

De plus, si les arbres désignés présentent des dimensions assez similaires entre les variétés et les compositions, il n'en est pas de même pour le reste des individus. Ainsi, les individus prélevés dans la modalité de composition *ce* seront plus petit que ceux prélevés dans la modalité *le* et éventuellement *me*. La première éclaircie n'étant déjà pas simple à commercialiser de manière générale, on peut craindre que cela soit encore plus compliqué dans la modalité *ce*. D'autre part, une question majeure se pose : quelle serait la différence de production de bois commercialisable dans la vie du peuplement entre les différentes compositions ? Il faudrait faire une étude à part entière pour répondre à cette question, en projetant par exemple l'évolution de peuplement suivant les différentes compositions.

4.4 Avenir du douglas en France dans le contexte du changement climatique

4.4.1 Intérêts des variétés améliorées de douglas

Le douglas, essence avant tout appréciée pour son bois et sa croissance rapide. Lorsqu'il est planté en France, 99 % des plants utilisés proviennent de graines ayant été produites dans l'un des huit vergers à graines français. Les propriétaires et gestionnaires forestiers ont donc à leur disposition, une diversité génétique importante pour effectuer leurs reboisements.

Comme abordé précédemment, la variété issue du verger *PME-006 Californie* se caractérise par une croissance et donc une productivité plus faible. La question de son intérêt pour les propriétaires et gestionnaires forestiers se pose donc. Longtemps considérée comme étant potentiellement plus tolérante à la sécheresse (S. Girard et al., 2013) ; (Philippe et al., 2012b), la variété *Californie* montre effectivement une perte de potentiel de croissance moins importante que les variétés issues des autres vergers dans des environnements plus secs et chauds (Rousselle et al., 2022). Cependant, ces environnements étant caractérisés comme n'étant plus adaptés pour le douglas, couplé à un taux de survie qui est similaire à celui des autres variétés dans ces milieux-là (Rousselle et al., 2022) interroge sur la pertinence d'effectuer des reboisements dans ces contextes.

De plus, les résultats actuels ne permettent pas de démontrer une meilleure tolérance à la sécheresse de la variété *Californie* et les hypothèses développées peuvent même faire craindre l'inverse. En effet, si l'on fait l'hypothèse que la variété *Californie* a une stratégie visant à moins réguler sa transpiration, cela pourrait présenter un comportement à risque dans le cas de sécheresse intense et prolongée.

Par ailleurs, la croissance plus importante de la variété *Californie* par rapport à la variété *Luzette*, notamment dans le dispositif des Barres en 2020, pourrai être dû à des conditions climatiques très particulières. Il convient de poursuivre les analyses, mais un printemps humide et chaud pourrait lui permettre de prendre un avantage sur la variété *Luzette* dans le cas où une sécheresse estivale intervient. En effet, le débourrement plus précoce de *Californie* pourrait lui permettre de tirer avantage de conditions favorables pendant plus longtemps que *Luzette* dans de telles conditions.

4.4.2 Perspectives

Le changement climatique en cours et qui entraîne des changements profonds dans le paysage forestier risque de s'accroître dans les années à venir. Des crises importantes telles que celle ayant débuté en 2018, avec les dépérissements de million de m³ d'épicéa (Saintonge et al., 2022) ont pu être envisagées, mais pas dans de telles proportions (Saintonge et al., 2022). En effet, plusieurs études évoquées dans la première partie de ce mémoire ont montré que le douglas pouvait faire preuve d'une meilleure tolérance à la sécheresse que certaines essences indigènes comme le sapin ou l'épicéa. Certaines de ses études avancent même que le douglas pourrait être une essence d'avenir en France en Europe pour se substituer à l'épicéa dans certaines zones géographiques par exemple.

Cependant, même si les dépérissements de douglas sont restés, les résultats de nouvelles études amènent à s'interroger sur la place réelle que pourrait occuper le douglas à l'avenir. En effet, le douglas a pu montrer des signes de sensibilité accrue au déficit hydrique, qui semble croître avec le temps (Guisset et al., 2023) ; (Niessner et al., 2024) ou encore aux températures estivales (Vejpustková & ihák, 2019). Certaines de ces études en arrivent même à questionner l'utilisation du douglas en remplacement de l'épicéa (Vejpustková & ihák, 2019) ; (Niessner et al., 2024) et notamment dans les situations de basse altitude (Vejpustková & ihák, 2019).

Enfin, si l'épicéa a connu des dépérissements massifs dont le déclencheur a été les sécheresses répétées depuis 2018, les scolytes inféodés à cette essence sont grandement responsables des niveaux de mortalités observés. En effet, de nombreux pays européens ont connu des infestations de scolytes importantes, attribuables en grande partie au changement climatique (Saintonge et al., 2022). Le douglas n'est à ce jour que très peu concerné par les scolytes indigènes, mais nous ne pouvons savoir combien de temps cela durera et le changement climatique pourrait le rendre plus sensible à ce type de ravageur secondaire (Niessner et al., 2024).

Conclusion

L'étude présentée dans ce mémoire est une étape supplémentaire dans la compréhension du comportement des variétés améliorées de douglas disponibles sur le marché français et plus particulièrement de la variété issue du verger *PME-VG-006 Californie* caractérisé par un comportement différent des autres variétés issues des sept autres vergers à graines. Cette étape s'inscrit dans un panorama de recherches ayant débuté plus de soixante ans auparavant.

Les principaux enseignements à tirer de cette étude sont (i) qu'il n'est pas possible de démontrer dans l'état actuel des connaissances une meilleure tolérance à la sécheresse de la variété issue du verger *PME-VG-006 Californie* par rapport à la variété issue du *PME-VG-002 Luzette* (ii) qu'il est possible que la variété *Californie* présente un avantage lié à son débournement précoce dans certain(s) environnement(s) particulier(s) dont il faudra préciser plus amplement les caractéristiques dans de futures études (iii) que malgré une productivité moins importante, il apparaît possible de constituer un peuplement futur de qualité de *Californie* et (iv) que le mélange de type pied à pied entre la variété *Luzette* et la variété *Californie* est délétère pour *Californie* en raison d'une concurrence accrue envers cette dernière. Les résultats amenant à ces enseignements sont à valoriser en prenant en compte des limites de cette étude.

Pour conclure, le douglas est une essence forestière clé de la forêt française et devrait le rester pour de nombreuses années. En témoigne le nombre de plants plantés, à nouveau en augmentation depuis la seconde décennie du vingtième siècle ainsi que la création du consortium Douglas-Avenir 2020. La production de variétés améliorées de qualités de douglas est donc un enjeu important pour la France, mais aussi pour l'Europe où le douglas pourrait être planté de manière plus importante dans les années à venir (Bastien et al., 2021) ; (Spiecker et al., 2019).

Enfin, le contexte de ces dernières années, marqué par le changement climatique incite à la prudence. Bien que le douglas n'ait pas été impacté de manière importante par le climat des six dernières années comme l'épicéa ou le sapin ont pu l'être, certains signaux comme l'intensification des dépérissements dans certaines zones géographiques (Carouille, 2024) peuvent susciter des inquiétudes. Il pourrait ne pas être judicieux de précipiter ses décisions et d'utiliser le douglas à des échelles trop large, dans le cas de reboisements post-scolytes par exemple. Dans tous les cas, une étude stationnelle minutieuse apparaît comme étant indispensable avant de faire quelconque choix dans le contexte du changement climatique et il est nécessaire de mettre en place une sylviculture adaptée.

Bibliographie

- Allan, R., Pereira, L., & Smith, M. (1998). *Crop evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements-FAO Irrigation and drainage paper 56* (Vol. 56).
- Anekonda, T., Jones, C., Smith, B., & Hansen, L. (2004). Differences in physiology and growth between coastal and inland varieties of douglas-fir seedlings in a common garden. *Thermochimica Acta*, 422, 75–79. <https://doi.org/10.1016/j.tca.2004.05.036>
- Angelier, A. (2007). *Douglasaies françaises*. ONF – Office National des Forêts.
- Augusto, L., Bonnaud, P., & Ranger, J. (1998). Impact of tree species on forest soil acidification. *Forest Ecology and Management*, 105(1), 67–78. [https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(97\)00270-3](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(97)00270-3)
- Bailly, A. (2002). *Rôle de l'éclaircie pour la biodiversité dans les peuplements artificiels de résineux. Rapport final de la convention ECOFOR/AFOCEL n° 98.19* [Report, AFOCEL]. <https://hal.science/hal-03686622>
- Bansal, S., Harrington, C. A., Gould, P. J., & St.Clair, J. B. (2015). Climate-related genetic variation in drought-resistance of Douglas-fir (*Pseudotsuga menziesii*). *Global Change Biology*, 21(2), 947–958. <https://doi.org/10.1111/gcb.12719>
- Bastien, J.-C., Philippe, G., Rousselle, Y., Sanchez, L., Chaumet, M., & Girard, S. (2021). Les variétés améliorées de douglas en France. *Schweizerische Zeitschrift Fuer Forstwesen*, 172(2), 76. <https://doi.org/10.3188/szf.2021.0076>
- Bazot, J.-P. (2020). France Douglas : L'outil qui fait avancer la filière Douglas depuis plus de 25 ans. *Forêt Entreprise*, 253, 17.
- Bertin, S., Balandier, P., Becquey, J., Bonal, D., Nathalie, B., Perrier, C., Riou-Nivert, P., & Sevrin, É. (2016). *Le bilan hydrique des peuplements forestiers. Etat des connaissances scientifiques et techniques - Implications pour la gestion*.
- Biljou - Modèle de Bilan Hydrique*. (2024). <https://appgeodb.nancy.inra.fr/biljou/fr/>
- Bolac, M., & Deconninck, M.-C. (2020). La gestion des douglasaies face aux demandes sociales et environnementales. *Forêt-Entreprise*, 253.

- Boutte, B. (2021). *Réussite des plantations forestières de l'année 2020*. Ministère de l'agriculture et de l'alimentation, Département de la santé des forêts.
- Brandl, S., Paul, C., Knoke, T., & Falk, W. (2020). The influence of climate and management on survival probability for Germany's most important tree species. *Forest Ecology and Management*, 458. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2019.117652>
- Carouille, F. (2022). *La lettre du DSF*. Ministère de l'agriculture et de l'alimentation, Département de la santé des forêts.
- Carouille, F. (2024). Bilan sylvosanitaire 2023. *Forêt & Innovation*, 7, 64.
- Caudullo, G., Tinner, W., & Rigo, D. de. (2016). *Picea abies in Europe: Distribution, habitat, usage and threats*.
- Chaumet, M. (2017). *Analyse des souhaits de la filière en matière de création variétale de douglas*.
- Chauvin, T., Cochard, H., Segura, V., & Rozenberg, P. (2019). Native-source climate determines the Douglas-fir potential of adaptation to drought. *Forest Ecology and Management*, 444, 9–20. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2019.03.054>
- Choisnel, E., Villele, O. de, Lacroze, F., & Direction Generale Telecommunications, I. de L. E. I. (1992). *Une approche uniformisée du calcul de l'évapotranspiration potentielle pour l'ensemble des pays de la Communauté Européenne* [Report]. Commission des Communautés Européennes. <https://hal.inrae.fr/hal-02852821>
- ClimEssences. (2024). *Limites du modèle IKS | ClimEssences*. <https://climessences.fr/modele-iks/presentation/limites-du-modele-iks>
- Defays, E. (2020). Le bois de Douglas : Un potentiel à ne pas gâcher. *Forêt-Entreprise*, 253.
- Deslauriers, A., Morin, H., Urbinati, C., & Carrer, M. (2003). Daily weather response of balsam fir (*Abies balsamea* (L.) Mill.) stem radius increment from dendrometer analysis in the boreal forests of Quebec (Canada). *Trees - Structure and Function*, 17, 477–484. <https://doi.org/10.1007/s00468-003-0260-4>
- Differences in physiology and growth between coastal and inland varieties of Douglas-fir seedlings in a common garden, N., Hawkins, B., & Stoehr, M. (2012). Trade-offs between growth and cold and drought hardiness in subarctic Douglas-fir. *Canadian Journal of Forest Research*, 42, 1530–1541. <https://doi.org/10.1139/x2012-092>
- Downes, G., Beadle, C., & Worledge, D. (1999). Daily stem growth patterns in irrigated eucalyptus globulus and e. Nitens in relation to climate. *Trees*, 14, 102–111. <https://doi.org/10.1007/PL00009752>
- Drew, D., & Downes, G. (2009). The use of precision dendrometers in research on daily stem size and wood property variation: A review. *Dendrochronologia*, 27, 159–172. <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2009.06.008>
- DSF. (2019). *La cécidomyie du douglas, état des lieux et risques pour le douglas*. DSF.

- DSF. (2024). Actualité en santé des forêts. In *Ministère de l'Agriculture et de la Souveraineté alimentaire*. <https://agriculture.gouv.fr/actualite-en-sante-des-forets>
- Eilmann, B., & Rigling, A. (2012). Tree-growth analyses to estimate tree species' drought tolerance. *Tree Physiology*, *32*(2), 178–187. <https://doi.org/10.1093/treephys/tps004>
- Eilmann, B., Vries, S. M. G. de, Ouden, J. den, Mohren, G. M. J., Sauren, P., & Sass-Klaassen, U. (2013). Origin matters! Difference in drought tolerance and productivity of coastal Douglas-fir (*Pseudotsuga menziesii* (Mirb.)) provenances. *Forest Ecology and Management*, *302*, 133–143. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2013.03.031>
- FBF. (2024). Prix de vente des bois sur pied en forêt privée : Indicateur 2024. In *France Bois Forêt*. <https://franceboisforet.fr/2024/06/12/prix-de-vente-des-bois-sur-pied-en-foret-privee-indicateur-2024/>
- FCBA. (2024). Le Memento 2023 est paru ! - Institut Technologique FCBA. In <https://www.fcba.fr/>. <https://www.fcba.fr/le-memento-2023-est-paru/>
- Fernández, J. E., & Cuevas, M. V. (2010). Irrigation scheduling from stem diameter variations: A review. *Agricultural and Forest Meteorology*, *150*(2), 135–151. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2009.11.006>
- Ferron, J.-L. (2021). *Le Douglas, nouvelle ressource nationale*. <https://doi.org/10.4267/2042/56059>
- Girard, Q. (2009). *La forêt face aux événements climatiques extrêmes : Étude de l'impact de la sécheresse de 2003 sur la croissance des arbres des forêts françaises à partir des données IFN*. AgroParisTech-ENGREF.
- Girard, S., Philippe, G., Bastien, J. C., & Chopard, B. (2013). Comportement des variétés de douglas face aux aléas climatiques. *Forêt Entreprise*, *208*, 24. <https://hal.inrae.fr/hal-02598106>
- Granier, A., Bréda, N., Biron, P., & Villette, S. (1999). A lumped water balance model to evaluate duration and intensity of drought constraints in forest stands. *Ecological Modelling*, *116*(2), 269–283. [https://doi.org/10.1016/S0304-3800\(98\)00205-1](https://doi.org/10.1016/S0304-3800(98)00205-1)
- Grieu, P., Guehl, J. M., & Aussenac, G. (1988). The effects of soil and atmospheric drought on photosynthesis and stomatal control of gas exchange in three coniferous species. *Physiologia Plantarum*, *73*(1), 97–104. <https://doi.org/10.1111/j.1399-3054.1988.tb09199.x>
- Guisset, C., Ponette, Q., & Vincke, C. (2023). *Assessing the growth response to climate of Douglas fir under European temperate oceanic conditions*. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-3671830/v1>
- Gwenaél, P., Matz, S., Archevêque, G., Girard, S., & Santi, F. (2010). *Évaluation et homologation de variétés issues des vergers à graines de l'état - programme 2009* [Report]. INRAE, ONF, CNPF.
- Gwenaél, P., Matz, S., Desgroux, A., Gobin, R., Rousselle, Y., & Girard, S. (2020). *Évalu-*

- ation et homologation de variétés issues des vergers à graines de l'état - programme 2019 [Report]. INRAE, ONF, CNPF.
- Harrington, C. A., Gould, P. J., & St.Clair, J. B. (2010). Modeling the effects of winter environment on dormancy release of Douglas-fir. *Forest Ecology and Management*, 259(4), 798–808. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2009.06.018>
- IFN. (2023). *Le mémento - INVENTAIRE FORESTIER*. <https://inventaire-forestier.ign.fr/spip.php?rubrique219=>
- IPCC. (2023a). Annex 1: glossary. In R. van Diemen, J. B. R. Matthews, V. Möller, J. S. Fuglestvedt, V. Masson-Delmotte, C. Méndez, A. Reisinger, & S. Semenov (Eds.), *Climate change 2023: Mitigation of climate change. Contribution of working group III to the sixth assessment report of the intergovernmental panel on climate change*. IPCC. <https://doi.org/10.1017/9781009157926.020>
- IPCC. (2023b). Summary for policymakers. In H. L. Core Writing Team & J. R. (Eds.), *Climate change 2023: Synthesis report. A report of the intergovernmental panel on climate change. Contribution of working groups I, II and III to the sixth assessment report of the intergovernmental panel on climate change*. IPCC.
- IPCC. (2023c). Synthesis report. In H. L. Core Writing Team & J. R. (Eds.), *Climate change 2023: Synthesis report. A report of the intergovernmental panel on climate change. Contribution of working groups I, II and III to the sixth assessment report of the intergovernmental panel on climate change*. IPCC.
- Joyeau, C., & Duverger, M. (2023). *Statistiques annuelles sur les ventes de graines et plants forestiers*. <https://agriculture.gouv.fr/statistiques-annuelles-sur-les-ventes-de-graines-et-plants-forestiers>.
- Keymeulen, V. V., Zeoli, L., Gilles, A., Tasseroul, M.-P., Bunswyck, A. E. de, Kaddouri, M., Ligot, G., Claessens, H., & Mil, T. D. (2024). Déployer des réseaux de dendromètres pour évaluer la résilience des forêts face aux changements climatiques. *Forêt.Nature*, 171, 49–56.
- La Porta, N., Capretti, P., I.M, T., Kasanen, R., Hietala, A., & K, V. (2008). Forest pathogens with higher damage potential due to climate change in Europe. *Canadian Journal of Plant Pathology*, 30, 177–195. <https://doi.org/10.1080/07060661.2008.10540534>
- Lasch-Born, P., Suckow, F., Gutsch, M., Reyer, C., Hauf, Y., Murawski, A., & Pilz, T. (2015). Forests under climate change: Potential risks and opportunities. *Meteorologische Zeitschrift*, 24(2), 157–172. <https://doi.org/10.1127/metz/2014/0526>
- Lebourgeois, F. F., & Piedallu, C. C. (2005). Appréhender le niveau de sécheresse dans le cadre des études stationnelles et de la gestion forestière à partir d'indices bioclimatiques. *Revue Forestière Française*, 57(4), 331. <https://hal.inrae.fr/hal-02681039>
- Legay, M., & Le Bouler, H. (2014). *Éléments d'histoire et de répartition géographique des essences forestières introduites en France métropolitaine: Vols. Fascicule 1* (p. 45). ONF.

- Lévesque, M., Rigling, A., Bugmann, H., Weber, P., & Brang, P. (2014). Growth response of five co-occurring conifers to drought across a wide climatic gradient in Central Europe. *Agricultural and Forest Meteorology*, *197*, 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2014.06.001>
- Manise, T., & Vincke, C. (2014). Impacts du climat et des déficits hydriques stationnels sur la croissance radiale du hêtre, du chêne, de l'épicéa et du douglas en wallonie. *Forêt Wallonne*, *129*.
- MASA. (2016). *Plan national de la forêt et du bois 2016-2026*. <https://agriculture.gouv.fr/plan-national-de-la-foret-et-du-bois-2016-2026>.
- Masson-Delmotte, V., Zhai, P., Pörtner, H. O., Roberts, D., Skea, J., Shukla, P. R., Pirani, A., Moufouma-Okia, W., Péan, C., Pidcock, R., Connors, S., Matthews, J. B. R., Chen, Y., Zhou, X., Gomis, M. I., Lonnoy, E., Maycock, T., Tignor, M., & Waterfield, T. (2019). *GIEC, 2018 : Résumé à l'intention des décideurs, Réchauffement planétaire de 1,5 °C*. Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat. <https://hal.science/hal-03336102>
- Mauri, A., Rigo, D. de, & Caudullo, G. (2016). *Abies alba in Europe: Distribution, habitat, usage and threats*.
- McDowell, N., Pockman, W. T., Allen, C. D., Breshears, D. D., Cobb, N., Kolb, T., Plaut, J., Sperry, J., West, A., Williams, D. G., & Yezzer, E. A. (2008). Mechanisms of plant survival and mortality during drought: Why do some plants survive while others succumb to drought? *New Phytologist*, *178*(4), 719–739. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2008.02436.x>
- Morvan, P. du. (2016). *Charte forestière de territoire du Morvan 2016 - 2020 - Examen au cas par cas préalable à la réalisation d'une évaluation environnementale*. <https://side.developpement-durable.gouv.fr/Default/doc/SYRACUSE/351306/charte-forestiere-de-territoire-du-morvan-2016-2020-examen-au-cas-par-cas-prealable-a-la-realisation>
- Moser, B., Bachofen, C., Muller, J. D., Metslaid, M., & Wohlgemuth, T. (2016). Root architecture might account for contrasting establishment success of *Pseudotsuga menziesii* var. *Menziesii* and *Pinus sylvestris* in Central Europe under dry conditions. *Annals of Forest Science*, *73*(4), 959–970. <https://doi.org/10.1007/s13595-016-0574-1>
- Nabuurs, G.-J., Delacote, P., Ellison, D., Hanewinkel, M., Lindner, M., Nisbet, M., Ollikainen, M., & Savaresi, A. (2015). *A new role for the forests and the forest sector in the EU post-2020 climate targets. From Science to Policy 2*.
- Niessner, A., Ehekircher, S., Zimmermann, R., Horna, V., Reichle, D., Land, A., Spangenberg, G., & Hein, S. (2024). Soil drought sets site specific limits to stem radial growth and sap flow of Douglas-fir across Germany. *Frontiers in Plant Science*, *15*. <https://doi.org/10.3389/fpls.2024.1401833>

- Oswald, H., & Pardé, J. (1984). Le Douglas en France : Sylviculture et production. *Revue Forestière Française*, 36(S), 56–68. <https://doi.org/10.4267/2042/21774>
- Oudin, L., Hervieu, F., Michel, C., Perrin, C., Andréassian, V., Anctil, F., & Loumagne, C. (2005). Which potential evapotranspiration input for a lumped rainfall–runoff model?: Part 2—Towards a simple and efficient potential evapotranspiration model for rainfall–runoff modelling. *Journal of Hydrology*, 303(1), 290–306. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2004.08.026>
- Philippe, G., Matz, S., Bastien, J.-C., Archeveque, G., Girard, S., & Musch, B. (2012a). Un réseau national de plantations comparatives pour évaluer les vergers à graines français de Douglas. *Sciences Eaux & Territoires, Cahier spécial*. <https://doi.org/10.3917/set.hs03.012>
- Philippe, G., Matz, S., Bastien, J.-C., Archeveque, G., Girard, S., & Musch, B. (2012b). Un réseau national de plantations comparatives pour évaluer les vergers à graines français de Douglas. *Sciences Eaux & Territoires, Cahier spécial*. <https://doi.org/10.3917/set.hs03.012>
- Projet CARBOFOR : Séquestration de carbone dans les grands écosystèmes forestiers en France. Quantification, spatialisaton et impacts de différents scénarios climatiques et sylvicoles – GICC. (2001). <http://www.gip-ecofor.org/gicc/?p=592>
- Rameau, J.-C., Dumé, G., Gauberville, C., & Mansion, D. (2018). *Flore forestière française: Vols. Plaines et collines*.
- Ricodeau, N., Colin, E., Bastien, J.-C., Philippe, G., & Rousselle, Y. (2019). *Conseils d'utilisation des ressources génétiques forestières de douglas, Pseudotsuga menziesii (Mirb.) Franco*.
- Riou-Nivert, P. (2020). Des itinéraires sylvicoles diversifiés pour le douglas. *Forêt Entreprise*, 254, 22.
- Rousselle, Y., Bastien, J.-C., Bier, D., Francois, D., Gobin, R., Girard, S., Matz, S., & Philippe, G. (2022). Évaluation des vergers à graines de Douglas : Synthèse des résultats au stade juvénile. *Office National Des Forêts*, 75, 40–47.
- Roux, A., Dhôte, J.-F., Achat, D., Bastick, C., Colin, A., Bailly, A., Bastien, J.-C., Berthelot, A., Nathalie, B., Caurila, S., Carnus, J.-M., Gardiner, B., Jactel, H., Leban, J.-M., Lobianco, A., Loustau, D., Meredieu, C., Marcais, B., Moisy, C., & 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*.
- Ruiz Diaz, M., Sergent, A.-S., Martinez-Meier, A., Nathalie, B., & Rozenberg, P. (2014). Wood density proxies of adaptive traits linked with resistance to drought in Douglas fir (*Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco). *Trees*, 28. <https://doi.org/10.1007/s00468-014-1003-4>
- Saintonge, F.-X., Gillette, M., Blaser, S., Queloz, V., & Leroy, Q. (2022). Situation et gestion

- de la crise liée aux scolytes de l'épicéa commun fin 2021 dans l'est de la France, en Suisse et en Wallonie. *Revue Forestière Française*, 73(6), 619–641. <https://doi.org/10.20870/revforfr.2021.7201>
- Sanchez-Rodriguez, L., & Bastien, J.-C. (2022). *Amélioration du douglas et déploiement des plantations en France* [Report, Inrae]. <https://hal.inrae.fr/hal-03496829>
- Schmid, M., Pautasso, M., & Holdenrieder, O. (2014). Ecological consequences of douglas fir (*pseudotsuga menziesii*) cultivation in europe. *European Journal of Forest Research*, 133, 13–29.
- Sergent, A.-S., Bréda, N., Sanchez, L., Bastein, J.-C., & Rozenberg, P. (2014). Coastal and interior Douglas-fir provenances differ in growth performance and response to drought episodes at adult age. *Annals of Forest Science*, 71(6), 709. <https://doi.org/10.1007/s13595-014-0393-1>
- Sevrin, E. (2020). Sylvicultures et usages du Douglas. *Forêt-Entreprise*, 253.
- Spiecker, H., Lindner, M., & Schuler, J. (2019). *Douglas-fir – an option for Europe*.
- Stangler, D. F., Miller, T. W., Honer, H., Larysch, E., Puhmann, H., Seifert, T., & Kahle, H.-P. (2022). Multivariate drought stress response of Norway spruce, silver fir and Douglas fir along elevational gradients in Southwestern Germany. *Frontiers in Ecology and Evolution*, 10. <https://doi.org/10.3389/fevo.2022.907492>
- Thorntwaite, C. W. (1948). An Approach Toward a Rational Classification of Climate: *Soil Science*, 66(1), 77. <https://doi.org/10.1097/00010694-194807000-00007>
- Vacek, Z., Cukor, J., Vacek, S., Linda, R., Prokpková, A., Podrázský, V., Gallo, J., Vacek, O., imnek, V., Drábek, O., Hájek, V., Spasi, M., & Brichta, J. (2021). Production potential, biodiversity and soil properties of forest reclamations: Opportunities or risk of introduced coniferous tree species under climate change? *European Journal of Forest Research*, 140(5), 1243–1266. <https://doi.org/10.1007/s10342-021-01392-x>
- Vejpustková, M., & ihák, T. (2019). Climate response of douglas fir reveals recently increased sensitivity to drought stress in Central Europe. *Forests*, 10(2). <https://doi.org/10.3390/f10020097>
- Vitali, V., Büntgen, U., & Bausch, J. (2017). Silver fir and Douglas fir are more tolerant to extreme droughts than Norway spruce in south-western Germany. *Global Change Biology*, 23(12), 5108–5119. <https://doi.org/10.1111/gcb.13774>
- Weiskittel, A., Crookston, N., & Rehfeldt, G. (2012). Projected future suitable habitat and productivity of douglas-fir in western north america. *Schweizerische Zeitschrift Für Forstwesen*, 163, 70–78.
- Zweifel, R., Haeni, M., Buchmann, N., & Eugster, W. (2016). Are trees able to grow in periods of stem shrinkage? *New Phytologist*, 211(3), 839–849. <https://doi.org/10.1111/nph.13995>

Table des annexes :

Annexe A : Origine des clones constituant le verger à graine *PME-002 Luzette* et le verger à graines *PME-006 Californie*.

Annexe B : Représentativité des récoltes utilisées.

Annexe C : Schéma d'installation type pour les dispositifs des Barres et Battées.

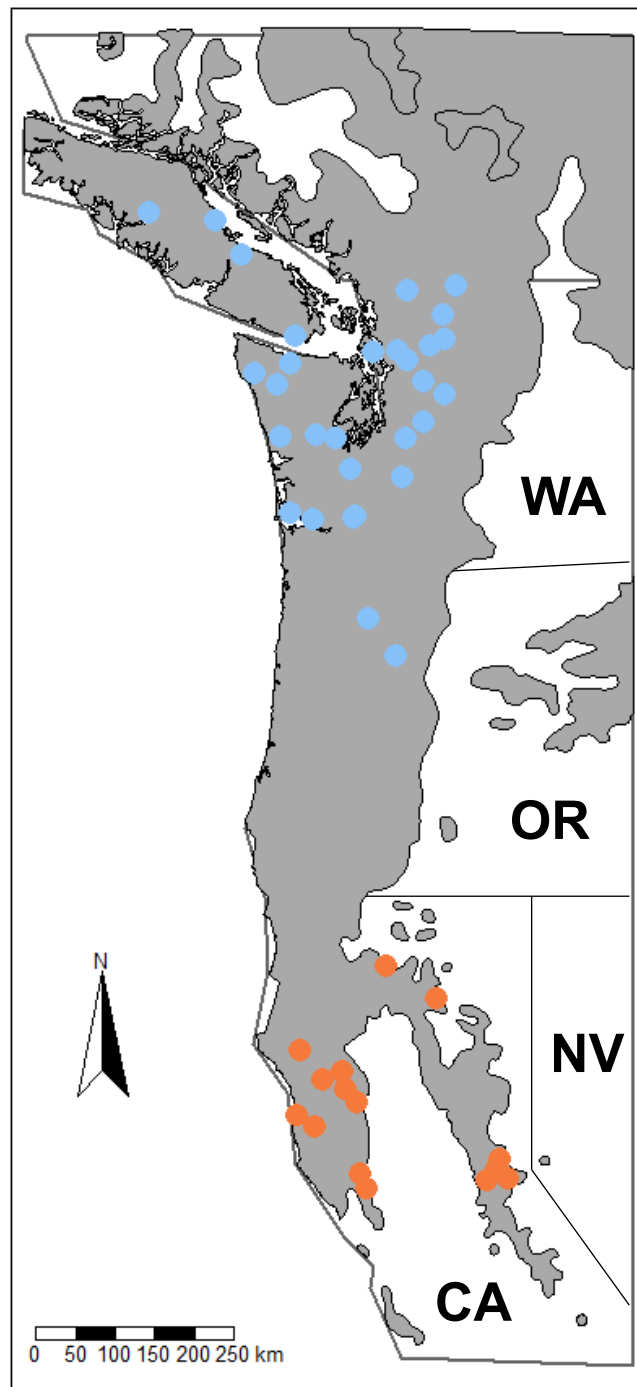
Annexe D : Protocole pour le suivi du débourrement végétatif du douglas.

Annexe E : Dendromètres automatiques à point.

Annexe F : Plan de l'installation des dendromètres automatiques dans le dispositif des Barres.

Annexe G : Répartition des arbres désignés dans le dispositif des Barres.

Annexe A : Origine des clones constituant le verger à graine *PME-002 Luzette* et le verger à graines *PME-006 Californie*.



Les provenances des clones constituant le verger *PME-002 Luzette* sont en bleu et les provenances des clones constituant le verger *PME-006 Californie* en orange. Certains clones ayant récupérés dans des peuplements français pour le verger *PME-002 Luzette* ne sont pas représentés ici. La zone grise représente une partie de l'aire naturelle du douglas. Les abréviations sont celles des États de Californie (CA), du Nevada (NV), d'Oregon (OR) et de Washington (WA).

Annexe B : Représentativité des récoltes utilisées.

Le nombre de clones efficaces (N_e) est calculé selon la formule suivante (Gwenael et al., 2010) :

$$N_e = \frac{1}{\sum P_i^2}$$

où P_i représente la contribution du clone i .

- Pour N_e en termes de gamètes, P_i est défini comme le rapport entre le nombre de gamètes produits par le clone i et le nombre total de gamètes, soit :

$$P_i = \frac{\text{nb de gamètes produits par le clone } i}{\text{nb total de gamètes}}$$

- De manière générale, P_i peut également être défini comme le rapport entre le nombre de cônes produits par le clone i et le nombre total de cônes :

$$P_i = \frac{\text{nb de cônes produits par le clone } i}{\text{nb total de cônes}}$$

- Pour N_e en termes de ramets, P_i correspond au rapport entre le nombre de ramets du clone i et le nombre total de ramets, soit :

$$P_i = \frac{\text{nb de ramets du clone } i}{\text{nb total de ramets}}$$

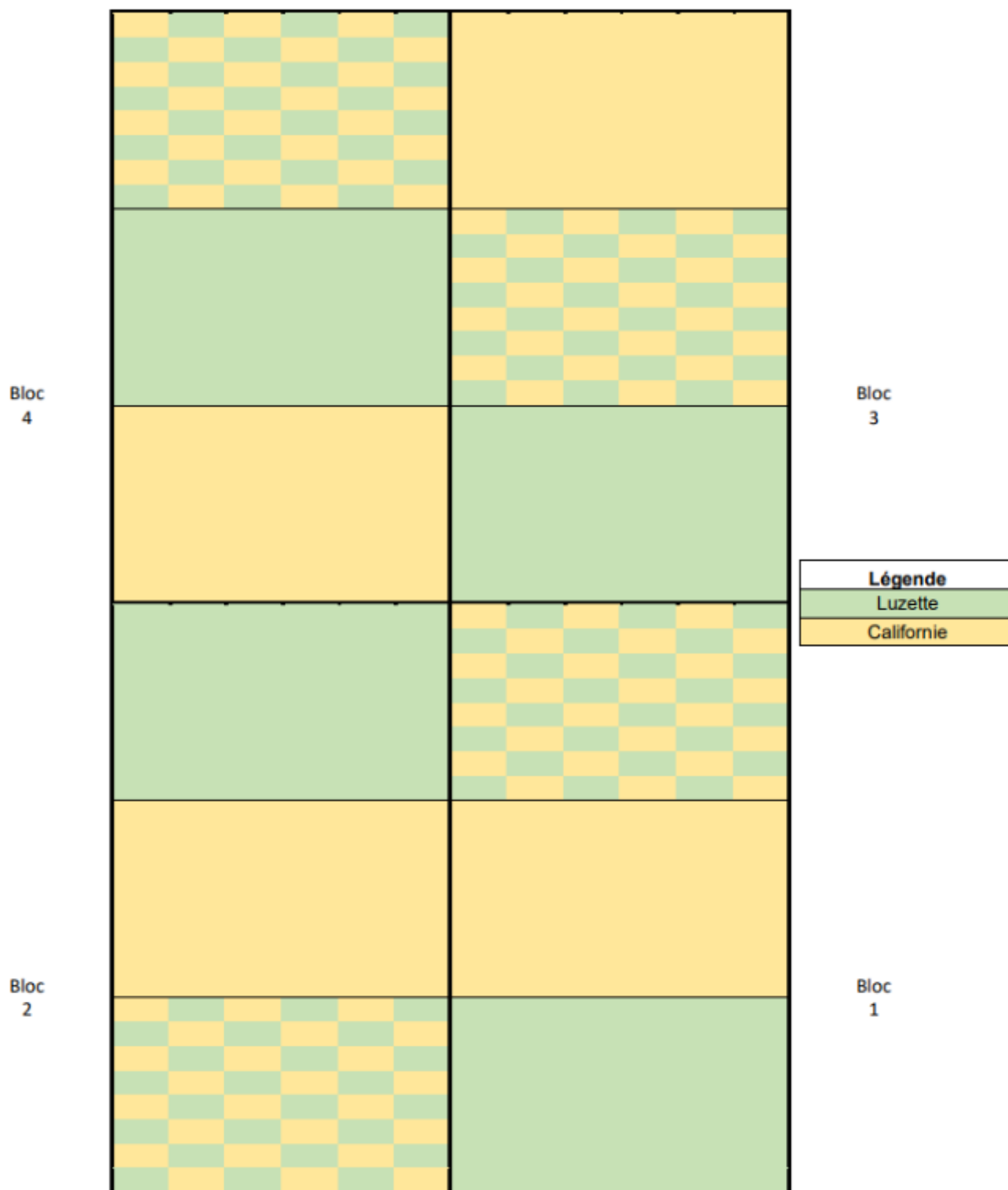
Il a été considéré que le matériel de base, c'est-à-dire les clones constituant le verger, était bien représenté par la fructification lorsque le rapport N_e gamètes/ N_e ramets augmentait. En d'autres termes, une augmentation de ce rapport indique que la contribution relative des clones en termes de gamètes (reflétant leur succès reproducteur via la fructification) est plus équitablement répartie par rapport à leur représentation en tant que ramets (Gwenael et al., 2010).

Les fructifications dans les deux vergers ont été qualifiées de la manière suivante :

- *Luzette* : Le rapport N_e gamètes/ N_e ramets est égal à 54 % dans le verger entier et la fructification qualifiée d'acceptable (Rapport VFA, 2009). Ce rapport est de 68 % dans la partie induite (parcelle 501B) et la fructification est qualifiée de correcte (Rapport VFA, 2009).
- *Californie* : Le rapport N_e gamètes/ N_e ramets est égal à 38 % dans le verger entier et la fructification qualifiée de faible (Rapport VFA, 2009). Ce rapport est de 62 % si l'on considère uniquement les *grands arbres* et la fructification est qualifiée d'acceptable (Gwenael et al., 2010).

Par *grands arbres*, on entend que ces derniers ne sont pas issus de regarnis. Les arbres issus des regarnis avaient au moment de la récolte des floraisons assez faibles et contribuait très peu à la production en graines du verger (Gwenael et al., 2010)

Annexe C : Schéma d'installation type pour les dispositifs des Barres et Battées.



Les descendants du verger *PME-002 Luzette* sont en vert et les descendants du verger *PME-006 Californie* en jaune.

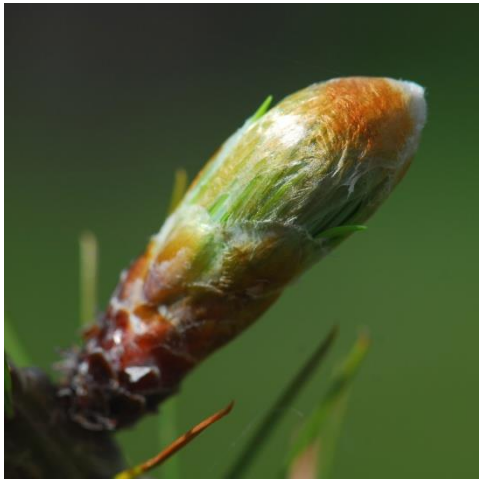
Annexe D : Protocole pour le suivi du débourrement végétatif du douglas.



Score 1



Score 2



Score 3



Score 4



Score 5



Score 6

Photos : Jean-Charles Bastien.

Annexe E : Dendromètres automatiques à point.



Dendromètre automatique à point, modèle DRW de la marque Ecomatik et utilisé dans le dispositif des Barres. Photo : Stéphane Matz.

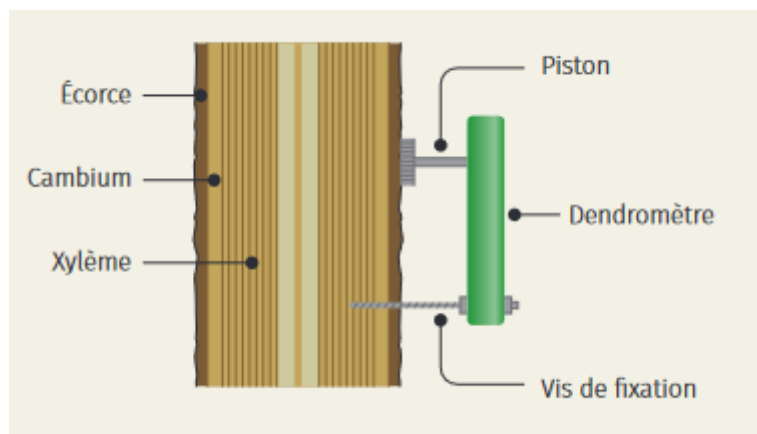
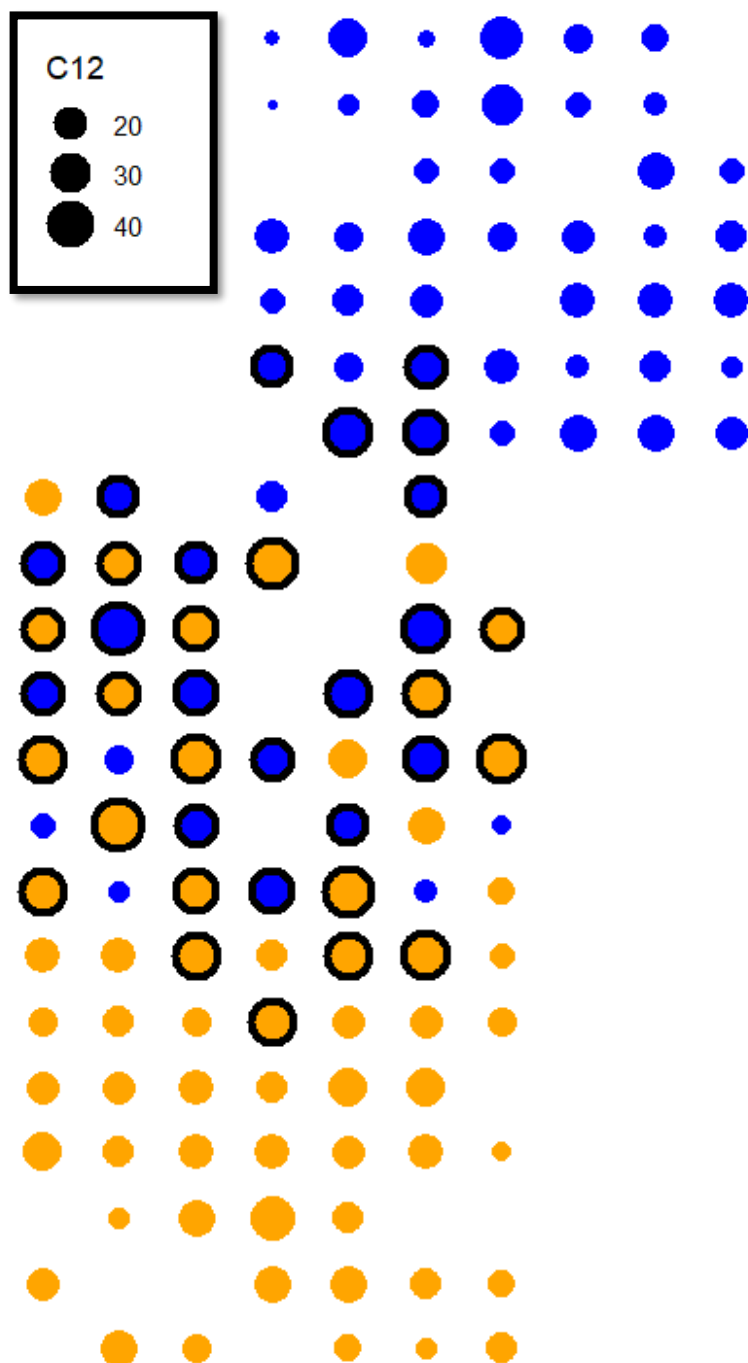


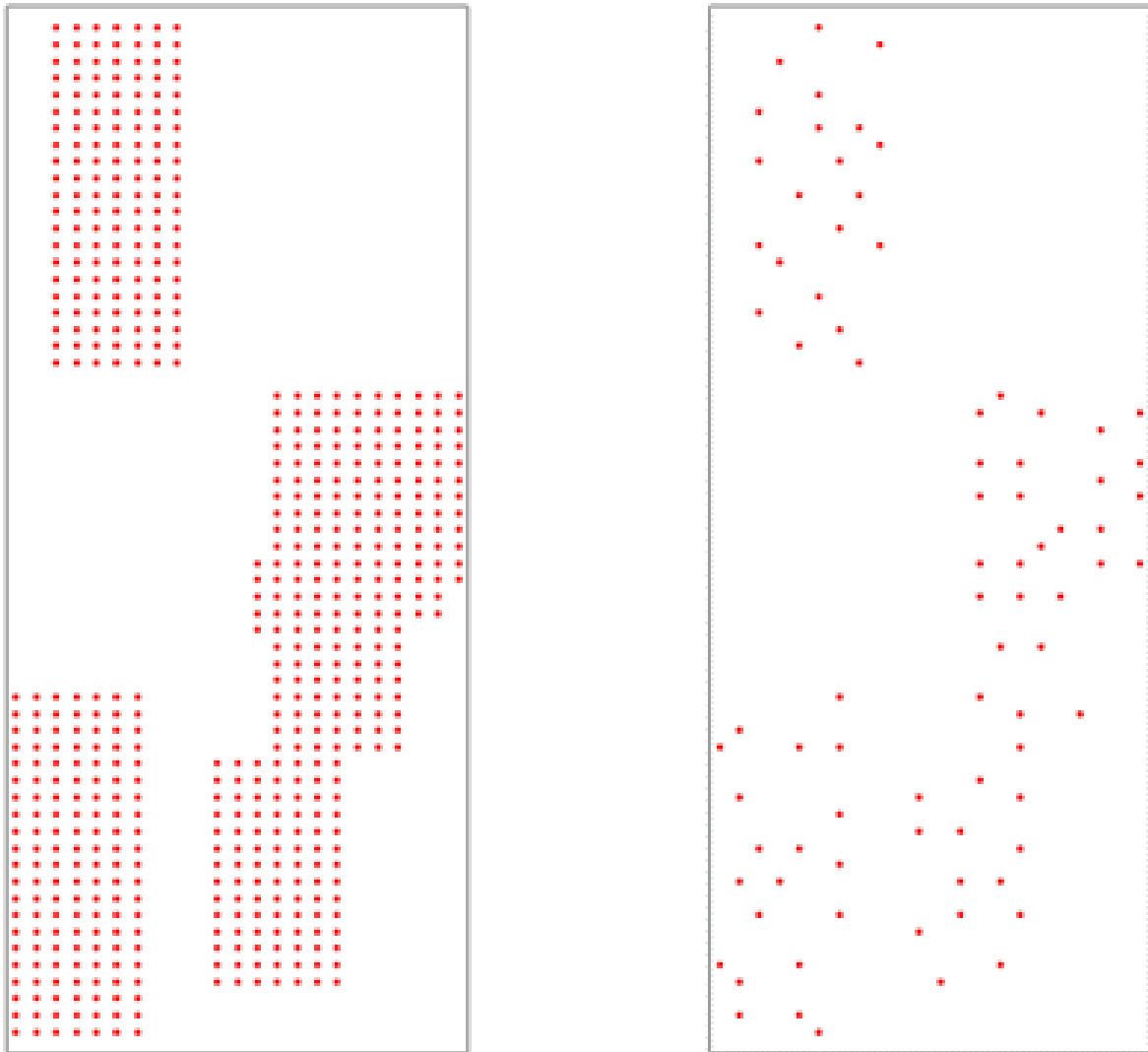
Schéma d'installation d'un dendromètre automatique à point (Van Keymeulen et al., 2024)

Annexe F : Plan de l'installation des dendromètres automatiques dans le dispositif des Barres.



Les descendants du verger *PME-002 Luzette* sont en orange. Les descendants du verger *PME-006 Californie* sont en bleu. Les arbres équipés avec un dendromètres automatique sont entourés en noir. La taille des disques dépend de la circonférence à l'âge de 12 ans.

Annexe G : Répartition des arbres désignés dans le dispositif des Barres.



La figure de gauche représente la vue d'ensemble du dispositif des Barres à son installation en 2009 et la figure de droite représente la répartition des arbres désignés dans le dispositif en juillet 2024. Chaque point rouge représente un arbre.

Résumé

Le douglas est la seconde essence la plus plantée en France. Huit vergers à graines ont été installés en France entre 1978 et 1989 pour assurer la production en graines. La descendance d'un des vergers (*Californie* – origine sud de l'aire naturelle) a montré des différences de phénologie et de croissance juvénile comparativement aux autres vergers (origine nord de l'aire naturelle).

L'étude vise à évaluer l'intérêt que représente cette diversité génétique (entre les vergers) dans le contexte du changement climatique. Deux dispositifs comparant les descendants des vergers *Californie* et *Luzette*, purs ou en mélange pied à pied, ont été mesurés entre 2020 et 2023 pour le débourrement et avec des dendromètres automatiques.

Les résultats de quatre années au climat contrasté montrent que les descendants des deux vergers semblent avoir des stratégies différentes en réponse à une sécheresse, en fonction de sa période d'occurrence et de son intensité, sans pouvoir conclure à une meilleure tolérance. La descendance du verger *Californie* subie une concurrence accrue en mélange du fait de sa croissance juvénile inférieure, tout en permettant de constituer un peuplement de qualité en placeaux purs.

Cette étude permet d'étendre les connaissances sur le potentiel d'adaptation à la sécheresse des ressources génétiques de douglas françaises et de mieux définir les limites d'utilisation.

Mots clefs : *Pseudotsuga Menziesii*, douglas, changement climatique, vergers à graines, PME-VG-002 Luzette, PME-VG-006 Californie, dendromètres automatiques, sécheresse, potentiel de production, comparaison de provenance