



**HAL**  
open science

# Impacts de la sécheresse sur les caractéristiques anatomiques du bois du mélèze : Étude de la supériorité de l'hybride

Baptiste Ducros

## ► To cite this version:

Baptiste Ducros. Impacts de la sécheresse sur les caractéristiques anatomiques du bois du mélèze : Étude de la supériorité de l'hybride. Biodiversité et Ecologie. 2019. hal-03223488

**HAL Id: hal-03223488**

**<https://hal.inrae.fr/hal-03223488>**

Submitted on 11 May 2021

**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.

# *Impacts de la sécheresse sur les caractéristiques anatomiques du bois du mélèze : Étude de la supériorité de l'hybride*

*Étudiant : Baptiste DUCROS*

*Encadrant : Luc PÂQUES*

*INRA Ardon, Unité BioForA,*

*2163, avenue de la pomme de pin - CS 40001 Ardon*

*45075 Orléans Cedex 2*

## *Résumé :*

Cette étude a eu pour but de définir des critères de croissance radiale de trois espèces de mélèzes selon un régime hydrique afin de déterminer une potentielle supériorité de l'hybride. Deux approches ont été envisagées : la micro-densitométrie et les coupes anatomiques. La première méthode permet d'obtenir des données sur la surface, la densité des deux types de bois et la proportion du bois final au sein d'un cerne grâce à l'obtention de profils micro-densitométriques. La deuxième méthode permet d'avoir des valeurs plus précises de densité du bois. Ces critères sont déterminants pour caractériser la vigueur des mélèzes. Aucune donnée n'a été significativement déterminante, néanmoins, des tendances sont ressorties. Sous régime hydrique perturbant, l'hybride présentent des surfaces de cernes, des proportions et des densités de bois final plus grandes que les deux autres espèces. L'espèce japonaise a de plus grandes densités de bois initial. Pour la surface, la proportion du bois final et les densités de bois final et bois initial, les meilleures familles semblent être respectivement F0967 (HL), F0912 (EL), F0924 (JL) et F0910 (EL). A part F0924, les trois autres familles possèdent un parent en commun. La supériorité hybride n'est pas significativement prouvée avec cette étude.

*Mots clés :* Croissance, Densité du bois, Qualité du bois, Stress hydrique, Vigueur

# *Impacts de la sécheresse sur les caractéristiques anatomiques du bois du mélèze : Étude de la supériorité de l'hybride*

*Étudiant : Baptiste DUCROS*

*Encadrant : Luc PÂQUES*

*INRA Ardon, Unité BioForA,*

*2163, avenue de la pomme de pin - CS 40001 Ardon*

*45075 Orléans Cedex 2*

## *Résumé :*

Cette étude a pour but de définir des critères de croissance radiale de trois espèces de mélèzes selon un régime hydrique afin de déterminer une potentielle supériorité de l'hybride. Deux approches sont envisagées : la micro-densitométrie et les coupes anatomiques. La première méthode permet d'obtenir des données sur la surface, la densité des deux types de bois et la proportion du bois final au sein d'un cerne grâce à l'obtention de profils micro-densitométriques. La deuxième méthode permet d'avoir des valeurs plus précises de densité du bois. Ces critères seront considérés comme des proxy de traits fonctionnels pour caractériser la vigueur des mélèzes. Aucune donnée n'a été significativement déterminante, néanmoins, des tendances sont ressorties. Sous stress hydrique, l'hybride présentent des surfaces de cernes, des proportions et des densités de bois final plus grandes que les deux autres espèces. L'espèce japonaise a de plus grandes densités de bois initial. Pour la surface, la proportion du bois final et les densités de bois final et bois initial, les meilleures familles semblent être respectivement F0967 (HL), F0912 (EL), F0924 (JL) et F0910 (EL). Hormis F0924, les trois autres familles possèdent un parent en commun. La supériorité hybride n'est pas significativement prouvée avec cette étude.

*Mots clés :* Croissance, Densité du bois, Qualité du bois, Stress hydrique, Vigueur

## Remerciements :

Venir à l'INRA d'Ardon pendant 6 mois m'a permis de rencontrer de nombreuses personnes qui ont su m'aider, chacun à leur manière, afin que je puisse réaliser mon stage dans les meilleures conditions. Je tiens tout d'abord à remercier Luc Pâques pour avoir proposé ce stage et qui a su m'encadrer et me guider durant ces longs mois. Merci également à Benjamin Dimouro pour m'avoir aidé sur le terrain et à Frédéric Millier pour ses conseils sur l'utilisation de WinDendro. Merci à Margarita Escobar de m'avoir accompagné à Nancy et de m'avoir aidé à réaliser les coupes anatomiques. Tous mes remerciements également à Julien Ruelle, Maryline Harroué et Adeline Motz pour nous avoir accueilli au sein de leur équipe pendant deux jours à l'INRA de Nancy et pour nous avoir formé à la réalisation de coupes anatomiques de bois de mélèze.

Merci à Véronique LP, Camille et Marie-Claude de nous avoir fait une place dans leur laboratoire.

Merci également aux non permanents, Mathilde B, Adrien, Clément, Mathilde D, Julien, Romaric, Abdou, Anthony, Alexandre, Marlène pour leur bonne humeur sans limite et leurs discussions toutes plus intéressantes les unes que les autres.

Merci à Simon pour son aide sur la maîtrise de R.

Enfin merci à tous ceux qui m'auront soutenu durant ces 6 mois, amis et famille.

Un grand merci à Johann pour son indéfectible soutien quotidien.



## Sommaire :

<i>Abstract</i> : .....	5
<i>Introduction</i> : .....	5
<i>Contexte</i> : .....	5
<i>Problématique</i> : .....	7
<i>Objectifs</i> : .....	9
<i>Matériel et méthodes</i> : .....	9
<i>Le dispositif</i> : .....	10
<i>La récolte</i> : .....	11
<i>La micro-densitométrie</i> : .....	12
<i>Les coupes anatomiques</i> : .....	14
<i>Résultats</i> : .....	17
<i>La micro-densitométrie</i> : .....	17
<i>Les coupes anatomiques</i> : .....	23
<i>Discussion</i> : .....	23
<i>La micro-densitométrie</i> : .....	23
<i>Les limites</i> : .....	25
<i>Conclusion</i> : .....	25
<i>Conclusion générale</i> : .....	25
<i>Perspectives</i> : .....	26
<i>Références</i> : .....	26
<i>Annexes</i> : .....	29

## *Abstract :*

The aim of this study is to define radial growth data of three larch species depending on water availability in order to describe a potential superiority of the hybrid. Two methods have been used : micro-densitometry and microscopic anatomy. Micro-densitometry allows to gather data on ring area, earlywood and latewood density and latewood proportion thanks to micro-densitometric profiles. Histological approach in this study will be used to have further precise information on wood density. Those values can be considered as proxy of functional traits illustrating larch vigour. No data were significantly different, nevertheless, trends were visible on our charts. Under stressful conditions, the hybrid presents higher ring area, latewood density and proportion. The Japanese larch has a higher earlywood density. Considering ring area, latewood proportion, latewood and early wood density, best clonal families seems to respectively be F0967 (HL), F0912 (EL), F0924 (JL) and F0910 (EL). Excepted F0924, those families share a common parent. Within this study, hybrid superiority has not been significantly proved.

## *Introduction :*

### *Contexte :*

À nos latitudes, le scénario du changement climatique le plus envisageable tend vers une augmentation en intensité et en durée des phénomènes extrêmes tels que le gel, les inondations ou la sécheresse, accompagnée d'une hausse des températures moyennes de surface et d'une diminution des précipitations annuelles moyennes (Physical and Basis 2014). Ces changements pourraient générer un stress et provoquer une baisse des rendements sur l'ensemble des cultures et donc impacter l'économie agricole. Ainsi, dans le domaine de la sylviculture, l'amélioration génétique pourrait permettre de mieux anticiper les contraintes à venir, c'est notamment le cas pour le mélèze. Le mélèze (genre *Larix*) est un arbre gymnosperme monoïque ayant la particularité d'avoir des feuilles caduques, c'est-à-dire qui tombent à l'hiver et repoussent au

printemps (TelaBotanica 2017a). Grâce à sa densité, sa force et son imputrescibilité, le bois de l'espèce européenne, *Larix decidua*, est particulièrement utilisé lors de la confection de charpente (pour les chalets par exemple), de mobilier d'intérieur ou d'extérieur, ou de clôtures. De plus, le mélèze européen est une des espèces de conifère à la croissance la plus rapide, 10m<sup>3</sup> par hectare et par an dans des conditions optimales. À l'état naturel, il s'agit d'une espèce continentale qui apprécie les espaces très éclairés et les sols profonds et bien aérés comme ceux des Alpes (Figure 1). Le mélèze d'Europe pousse généralement bien entre 1400m et 1500m d'altitude mais il se retrouve en compétition avec d'autres essences (*Abies alba*, *Picea abies*) qui évoluent également à ces hauteurs. Entre 1500m et 2000m d'altitude, il forme des peuplements purs, les conditions climatiques sont moins favorables, mais la compétition y est moins forte. C'est aussi une espèce pionnière des milieux ouverts (friches, prairies, etc.), c'est-à-dire que c'est l'une des premières espèces d'arbres à émerger sur ce type de terrain, ouvrant la voie à l'apparition d'autres conifères comme les épicéas et les pins (Matras and Pâques 2008).

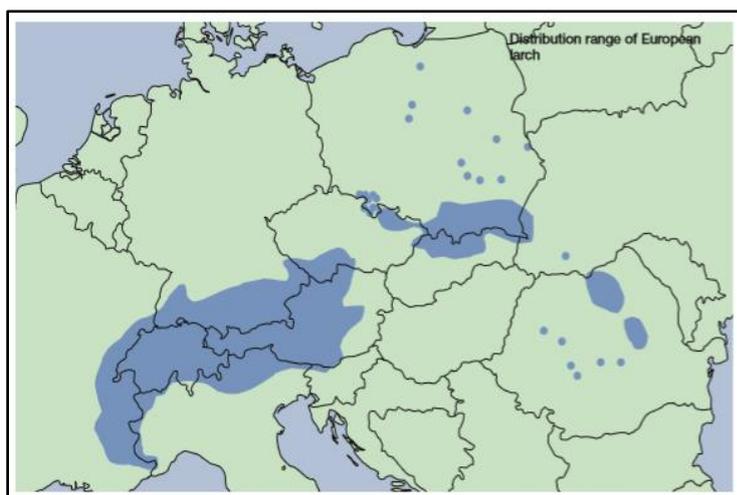


Figure 1 : Carte de répartition naturelle du mélèze d'Europe (*Larix decidua*)

En France, l'intérêt économique que représente l'espèce européenne a induit une volonté d'étendre sa culture à de plus basses altitudes, dans des régions au climat plus océanique que continental. Néanmoins, les populations en provenance des Alpes ne se sont pas acclimatées à ces environnements, d'autant plus qu'elles sont vulnérables face au

chancre du mélèze (*Lachnellula willkommii*). Face à ces contraintes, deux solutions ont été abordées : la recherche de nouvelles populations plus viables, notamment dans la région des Sudètes, et l'hybridation avec une autre espèce, le mélèze du Japon. Le mélèze du Japon, *Larix kaempferi*, est une espèce cultivée en Europe depuis le milieu du XIX<sup>ème</sup> siècle. À l'origine, on le trouve dans les régions montagneuses de l'île de Honshu (Japon), entre 1200 et 2600m d'altitude. Contrairement au mélèze européen, le mélèze japonais préfère des climats un peu moins continentaux, une plus forte humidité atmosphérique et des températures plus élevées (TelaBotanica 2017b) (TelaBotanica 2017a). Considérant ces caractéristiques, il a été initialement implanté au niveau des littoraux européens bénéficiant d'un climat plutôt

océanique. D'abord cultivé pour sa croissance plus rapide que l'europpéen au stade juvénile, son intérêt s'est accru avec la découverte de l'hybride *L.decidua X L.kaempferi* au début du XXème siècle. Anatomiquement, les deux espèces se différencient au niveau des cônes qui ont des écailles recourbées à la manière de pétales de roses chez le mélèze japonais (TelaBotanica 2017b). L'hybride *L.decidua X L.kaempferi* est intéressant de par son hétérosis (ou vigueur hybride) sur des traits de croissance au stade juvénile pouvant persister à des stades de croissance plus avancés (Baltunis et al. 1998). De plus, l'hybride hérite de la résistance au chancre du mélèze de son parent japonais (Sylvestre-Guinot et al. 1999) et serait également plus viable face à un autre champignon : *Meria laricis* (Philippe et al. 2016). Ainsi, l'hybride se présenterait comme le meilleur candidat pour la sylviculture face à ces contraintes sanitaires.

### Problématique :

Notre étude s'axe sur l'aspect sécheresse du changement climatique, celui-ci pouvant potentiellement avoir un effet sur les cultures de mélèzes en impactant leur vigueur. Une perte de vigueur pourrait mener à une diminution de la productivité et aurait donc un effet néfaste sur l'économie du mélèze. En somme, quels impacts pourraient engendrer un stress hydrique saisonnier sur la qualité du bois du mélèze ? L'hybride *Larix decidua X Larix kaempferi* peut-il constituer une solution quand à cette problématique ?

Quand on parle des arbres, la vigueur est une notion difficilement mesurable qui englobe plusieurs critères (Christiansen et al. 1987). D'une manière générale, elle représente l'état physiologique d'un arbre, à savoir sa capacité à résister en cas de stress extrêmes biotiques ou abiotiques (respectivement : attaques de phytophages ou sécheresse, par exemple) (McCullough and Wagner 1987). La vigueur peut se calculer en quantité de bois produit par unité de surface de feuillage. En effet, la croissance radiale est moins prioritaire que la production d'autres tissus (bourgeons, racines, croissance apicale) (Waring et al. 1980) ou de composés de défense comme l'oléorésine par exemple (Matson et al. 1987). En somme, la vigueur est liée à la quantité de glucides produite lors de la photosynthèse et disponibles pour la synthèse de composés de défense. Elle peut être influencée par des méthodes sylvicoles comme les éclaircies qui augmente la production d'oléorésine et les réserves d'amidon disponibles au printemps (Matson et al. 1987). Lors d'un stress hydrique, la photosynthèse devient limitée ce qui diminue la production de glucides, pouvant mener à un affaiblissement

de l'arbre par manque de composés de défense (Christiansen et al. 1987). En effet, quand un stress hydrique survient, les stomates des feuilles se referment afin de limiter la demande évaporative exercée par l'air ambiant qui pourrait provoquer une rupture de la colonne d'eau (= embolie estivale). Cependant, cette régulation stomatique empêche également le carbone atmosphérique d'être assimilé, limitant donc la synthèse de glucides. De plus, les réserves carbonées seront plutôt réparties vers les racines afin qu'elles croissent pour chercher à combler le stress hydrique, ce qui influencera négativement la croissance des parties aériennes (Teskey et al. 1987). Il est également connu que les conifères produisent plus de composés de défense, comme les mono-terpènes et les acides résiniques, quand ils sont soumis à un stress hydrique sévère afin de se protéger des attaques d'agents biotiques (pathogènes et herbivores) qui pourraient profiter de la faiblesse de ces arbres (Turtola et al. 2003). D'un point de vue adaptatif, les gymnospermes sont plus enclin à résister aux périodes de sécheresses estivales grâce à la présence d'un torus au niveau des ponctuations reliant les trachéides entre elles, ce torus jouant le rôle de valve de sécurité. Quand la tension vient à être trop élevée, celui-ci vient se plaquer contre la paroi d'une des trachéides, coupant toute communication avec sa voisine et évitant donc la propagation d'une potentielle bulle d'air qui pourrait rompre la colonne d'eau (Figure 2) (Taiz and Zeiger 2002). Cette bulle, selon la théorie du germe d'air (Tyree and Zimmermann 2002), apparaît lorsque que la différence de pression entre l'eau dans les trachéides et l'air extérieur dépasse les forces capillaires qui s'exercent à l'interface air-eau de la paroi pectocellulosique des trachéides.

La synthèse de cellules à lumen fin et à paroi épaisse permet de réduire les risques d'embolies estivales. De manière théorique, avec une paroi plus épaisse, la tension exercée pour provoquer l'apparition d'un germe d'air doit être accrue. Néanmoins, quand une plante produit ce type de cellule, elle fait un compromis entre résistance accrue à la cavitation et conductivité hydraulique diminuée (Hacke and Sperry 2001). La conductivité hydraulique se définit comme

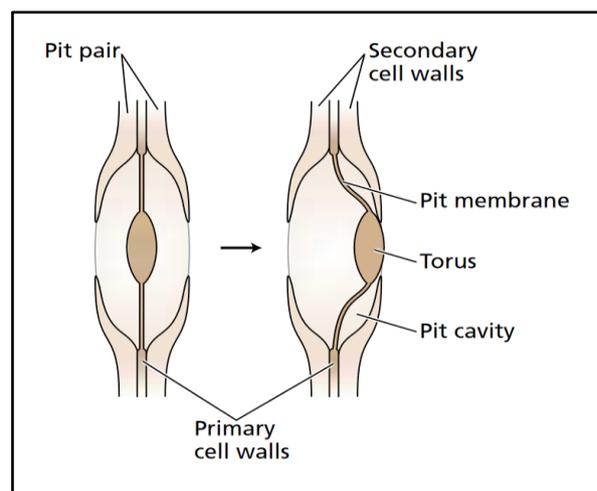


Figure 2 : Le torus, valve de sécurité contre l'embolie chez les gymnospermes.

étant la facilité que possède l'eau à passer de cellule en cellule, au travers d'une surface poreuse. Selon la loi d'Hagen-Poiseuille, prenant en compte la taille des trachéides et les propriétés de

l'eau (sa masse volumique et sa viscosité), 256 trachéides de 10 $\mu$ m ont la même conductance hydraulique qu'une seule trachéide de 40 $\mu$ m. En somme, quand la densité du bois augmente, les risques de cavitation sont minimisés mais la conductivité hydraulique est diminuée. Sous stress hydrique sévère, les plants juvéniles voient leur activité cambiale ralentie ce qui peut se traduire par une surface plus faible du cerne (Balducci et al. 2013). Néanmoins, un individu vigoureux aura plutôt tendance à produire de grandes cellules à paroi fines. De plus, la proportion du bois final, composé de cellules plus petites avec des parois plus épaisses, est moins importante, ce qui constitue un critère déterminant de la qualité du bois chez les plants juvéniles (Donnelly et al. 2017). Cependant, ce type de croissance vigoureuse peut être indésirable en fonction de l'utilisation prévue pour le bois. Les bois de faible densité sont plutôt utilisés dans la confection de pâte à papier tandis que ceux de plus forte densité servent comme matériau de construction. En effet, plus la densité est faible, plus les propriétés de résistance mécanique seront faibles également, ce qui peut être inapproprié pour un usage dans les constructions (Saranpää 2009). Or, dans le cas du mélèze, le bois se destine principalement à la conception de structure massive sensées perdurer dans le temps, ce qui signifie que la densité voulue doit être élevée. Ainsi, une nouvelle question se pose : des mélèzes très vigoureux seront-ils adaptés à la sylviculture de demain ?

### Objectifs :

Durant cette étude, nous avons cherché à comparer les attributs du bois du mélèze comme la densité et la taille des trachéides entre deux conditions de culture : une situation où les plants sont cultivés sans contrainte et une autre où ils subissent un stress hydrique. Ces attributs seront utilisés comme des proxy de traits fonctionnels comme la conductivité ou la résistance à la cavitation qui nous permettront de comprendre si nos mélèzes sont adaptés à la sécheresse. Le but est également de vérifier s'il y a une différence significative à plusieurs niveaux, à savoir entre espèces, entre familles ou même entre les différents génotypes utilisés. Ainsi, nous pourrions définir la vigueur des groupes précédemment cités.

### Matériel et méthodes :

## Le dispositif :

Le dispositif se présente sous la forme de 20 colonnes de 95 arbres ayant été plantés en 2013 à l'INRA d'Ardon (45) (47°49'58.47"N, 1°54'47.66"E) ([Annexe1](#)). Malheureusement, du fait du manque de place, ce dispositif ne possède pas de zones tampon pour limiter les effets de bordures. Notre dispositif se divise en deux parties, chacune présentant un régime hydrique différent. La première partie est dite non irriguée et subit les épisodes naturels de sécheresse. La deuxième partie, quand-à elle, est irriguée grâce à un système de goutte à goutte implanté dans le sol à partir du début du mois de mai de l'année 2015. Cette méthode du « goutte à goutte » permet une faible diffusion de l'eau fournie qui ne peut bénéficier aux mélèzes non irrigués. De plus, la parcelle se situe sur une légère pente descendant de la partie non irriguée vers la partie irriguée. Enfin, pour être le plus certain possible que les mélèzes stressés ne profitent pas de l'apport artificiel en eau, une zone tampon de mélèzes Rêve-Vert a été plantée entre les deux régimes. Afin de suivre les apports en eau et l'humidité du sol, des débitmètres et des sondes ont également été installés. Grâce à ce matériel, nous avons pu assurer qu'il y avait bien une différence de régime hydrique. En effet, il y a eu beaucoup plus d'eau apportée sur la parcelle irriguée (2199mm par an en moyenne entre 2015 et 2018) ([Annexe4](#) et [Annexe5](#)) que sur la parcelle non irriguée (716mm par an en moyenne entre 2015 et 2018) ([Annexe6](#) et [Annexe7](#)). Sur la parcelle irriguée, les conditions hydriques ont été idéales avec seulement 7 jours de stress hydrique entre 2015 et 2018. Les deux parties de notre parcelle se découpent en 4 bandes, l'espèce européenne (*Larix decidua*), l'espèce japonaise (*Larix kaempferi*), l'espèce hybride (*Larix decidua X kaempferi*). Ces trois premières bandes correspondent à des croisements d'individus (= les parents) situés sur la 4<sup>ème</sup> bande ([Annexe1](#)). La plantation se situe sur une ancienne alluvion de la Loire avec un sol qui a été caractérisé comme sablo-limoneux et plutôt graveleux jusqu'à environ 1m de profondeur avant de devenir sableux. Cette texture rend le sol particulièrement drainant et empêche donc les rétentions d'eau. Par conséquent, et ce de manière saisonnière, le sol du site d'étude devient sec dans la partie non irriguée. Cette sécheresse a pu être suivie grâce à la mesure de la REW (Relative Extractable Water) qui exprime l'état de remplissage de la réserve d'eau du sol. Cette mesure sans unité varie de 1 (saturée) à 0 (point de flétrissement permanent) en passant par une valeur seuil, 0,4. Une fois cette valeur dépassée, la force de succion exercée par les arbres pour extraire l'eau du sol devient trop importante, enclenchant une régulation stomatique (fermeture des stomates) permettant l'arrêt de la demande évaporative. Néanmoins, cette fermeture stomatique se fait au

détriment de la photosynthèse car le carbone atmosphérique ne pourra plus être assimilé. Pour les années 2012, 2013, 2015, 2016 et 2018, le sol a vu sa réserve en eau passer en déficit sur respectivement 96, 91, 102, 108 et 158 jours sur des périodes étalées. A l'inverse, les années 2014 et 2017 ont subi respectivement 58 et 83 jours de stress mais de manière plus ponctuelles. Le nombre de jours de stress et leur répartition temporelle (intensité) nous donne une nouvelle variable : l'indice de stress hydrique. Ainsi, les années citées premièrement ont les indices de stress hydrique les plus élevés (de 57,5 en 2013 à 107,6 en 2018) tandis que les deux suivantes ont les indices les plus bas (32,7 en 2014 et 49,3 en 2017) ([Annexe2](#) et [Annexe3](#)). Si l'on s'intéresse aux températures, la moyenne annuelle sur notre site est de 11,5°C entre 2012 et 2018. ([Annexe2](#)). Or, même si l'espèce japonaise est dite planitiaire à montagnarde, et apprécie donc une température moyenne annuelle oscillant entre 8 et plus de 11°C, l'espèce européenne quant à elle, est dite subalpine à oroméditerranéenne et préfère donc une température moyenne annuelle variant entre 4 et 8°C. En somme, les conditions climatiques présentées nous montre que notre parcelle n'est pas une station à mélèzes et peuvent simuler un climat futur des régions sylvicoles de mélèzes.

Un total de 120 dendromètres a été placé sur certains des mélèzes afin de suivre en temps réel leur croissance radiale. Quand cela était possible, un autre individu a été assigné à chacun de ces mélèzes équipés afin de former des couples irrigué/non irrigué que l'on pourra comparer. Les individus sélectionnés pour former ces couples ont été choisis de telle sorte à ce qu'ils soient au moins de la même famille que l'arbre possédant un dendromètre et d'au moins 40mm de diamètre (basé sur les mesures de 2018). En prenant un diamètre plus petit, on augmente le risque que l'arbre ne survive pas au double carottage. 79 couples ont ainsi pu être créés.

### *La récolte :*

La récolte des micro-carottes s'est déroulée le 11/02/2019 et le 12/02/2019 sur le site d'Orléans. Pour chaque arbre, 2 carottes de 2mm de diamètre sont prélevées à une hauteur approximative de 50cm à l'aide d'un tréphor. En prenant plus bas, on risquerait de prélever le porte-greffe et non l'individu à analyser. La première carotte servira lors d'analyses micro-densitométriques et la deuxième sera utilisée pour réaliser des coupes anatomiques. La récolte s'est faite dans un ordre précis afin d'optimiser le temps sur le terrain. Ainsi, les carottages se sont fait colonne

par colonne, d'ordre croissant puis décroissant à chaque changement de colonne (Colonne X=1, ordre croissant ; Colonne X=2, ordre décroissant ; Colonne X=3, ordre croissant ; etc.).

Les carottes destinées aux coupes anatomiques sont conservées dans l'alcool tandis que celles qui iront en micro-densitométrie sont laissées à l'air libre. Toutes les carottes ont été soigneusement placées dans des tubes à essais préalablement étiquetés tel que :

O-1-12-80

Où O = Orléans (lieu de la récolte)

1 = Coordonnée en X (colonne)

12 = Coordonnée en Y (ligne)

80 = Numéro de la carotte (le numéro est le même pour la micro-densitométrie et la coupe anatomique).

### *La micro-densitométrie :*

Les carottes qui n'ont pas été conservées dans l'alcool sont ensuite toutes disposées dans le même sens sur un papier collant (écorce vers la gauche) par ordre croissant de numéro de carotte de telle sorte que les échantillons d'un même couple se succèdent. De plus, les échantillons sont placés de façon à ce que les trachéides soient verticales. Pour se faire, on utilise une loupe afin de repérer le sens des cellules. On peut également définir le sens des cellules en s'aidant de la lumière du soleil.

Certains mélèzes étant plus grands en diamètre, l'utilisation du tréphor ne permettait parfois pas l'obtention de plus de 2 cernes. Pour pallier à cela, des carottes ont été prélevées jusqu'à la moelle des arbres grâce à une tarière de Pressler. Ces carottes ont par la suite été sciées en planchettes de 2mm d'épaisseur à l'aide d'une scie-fraise à lames jumelles avant d'être radiographiées.

L'analyse de micro-densitométrie indirecte aux rayons X est une technique qui se base sur la récolte d'images radiographiques en des nuances de gris le long des carottes. Ces changements de nuances sont une représentation des variations de la densité du bois, allant du foncé au clair quand celle-ci augmente. Comme on regarde le critère « densité », il est important que les échantillons soient tous secs à 88% car le peu d'eau naturellement présent dans les cellules pourraient fausser les valeurs. Ces radiographies sont ensuite numérisées pour pouvoir être observées à l'aide du logiciel WinDendro®. Les radiographies possédant une cale d'étalonnage de densité connues, combinées à ce logiciel, nous pourrions assigner des niveaux de gris à une densité de bois. Le but est de créer un transect (ou fenêtre d'observation) d'une certaine largeur (0,7mm pour les micro-carottes, 2,5mm pour les carottes) le long des carottes étudiées afin que le logiciel puisse attribuer les valeurs de densité. Plus cette fenêtre est large, plus les valeurs assignées seront représentatives de la réalité. Néanmoins, les carottes pouvant présenter des défauts comme des fentes ou des courbures, il est nécessaire de veiller à ce que la fenêtre d'observation ne passe pas par ces défauts qui donneraient une représentation erronée des densités du bois. WinDendro® nous permet également de faire une première délimitation des cerne qui sera par la suite confirmée grâce à l'outil statistique RStudio. Ce même outil nous permettra d'obtenir des profils de micro-densitométrie qui donneront accès à des données de croissances (Figure3 et Figure4). Parmi ces données, on retrouve une mesure de la croissance radiale intra et interannuelle via la largeur des cerne ( $L_a$ ), la largeur du bois initial ( $L_i$ ) et la largeur du bois final ( $L_f$ ). Ces valeurs nous permettent de déterminer la surface de chaque cerne ( $S_{Ac}$ ) des composantes bois initial ( $S_{Abi}$ ) et bois final ( $S_{Abf}$ ). A partir des largeurs de bois initial et de bois final, on peut obtenir la proportion de bois final au sein d'un cerne. On délimite le bois final du bois initial grâce à la méthode de Nancy qui fixe cette limite lorsque la moyenne

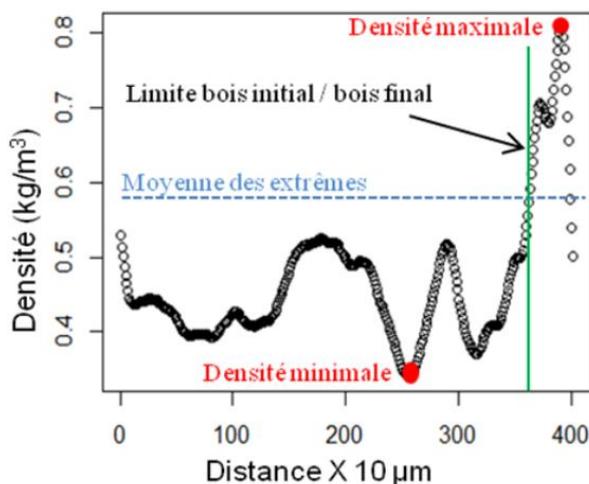


Figure 3 : Profil de micro-densitométrie et limite de Nancy

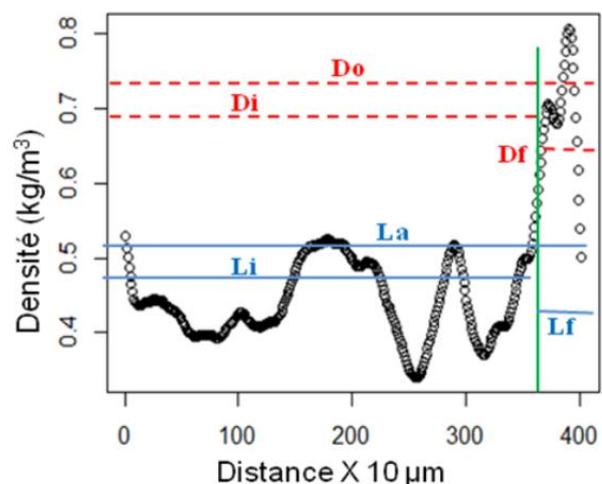


Figure 4 : Profil de micro-densitométrie et données de croissance radiale

entre la valeur de densité minimale et la valeur de densité maximale au sein d'un même cerne est atteinte. On peut également avoir accès à d'autres données comme la densité moyenne du cerne ( $D_o$ ), la densité moyenne du bois initial ( $D_i$ ) et la densité moyenne du bois final ( $D_f$ ) ce qui nous permet d'avoir une densité pour un arbre à une année donnée.

### Les coupes anatomiques :

On souhaite réaliser des coupes anatomiques avec les échantillons conservés dans l'alcool avant de les colorer au FASGA QB afin de révéler les parois pectocellulosiques en microscopie photonique. Le FASGA QB est un mélange de deux colorants, la safranine et le bleu alcian, réalisés par nos soins afin de colorer les parois pectocellulosiques des cellules de bois en rose. L'écorce, quand elle est disponible, est colorée en bleu et nous permet de délimiter correctement le cerne de l'année 2018. Grâce à cette coloration et à un logiciel de traitement d'images, nous pourrions déterminer l'épaisseur des parois et sa proportion avec le lumen le long d'un fil de cellules.

Tout d'abord, les échantillons restés dans l'alcool sont orientés de telle sorte que les trachéides soient parallèles à un axe vertical. Pour se faire, on dépose les carottes dans une boîte de Pétri contenant de l'alcool afin qu'elle ne se dessèche pas. Ensuite, on les observe à la loupe et on annote chaque échantillon d'un trait à l'aide d'un crayon de papier gras (6B) afin de créer un repère qui sera utile lors de la réalisation des coupes anatomiques. Les carottes sont ensuite envoyées au centre INRA Grand-Est – Nancy (54) pour inclusion dans la paraffine. Les échantillons sont inclus en biais dans la paraffine afin de permettre une meilleure pénétration de la lame de rasoir le long des carottes lors de la réalisation des coupes au microtome.



Figure 5 : Cassette de paraffine contenant une micro-carotte surfacée.

Après paraffinage, les cassettes contenant les micro-carottes doivent être surfacées ou déparaffinées en surface grâce à un microtome. Le but du surfacage est d'éliminer l'excédent de paraffine se situant au-dessus de la micro-carotte (Figure 5). Le déparaffinage se fait à 5 $\mu$ m maximum pour éviter de perdre trop de matériel biologique ou par risque d'abimer l'échantillon. Une fois les échantillons déparaffinés, on les laisse une nuit dans de l'eau au réfrigérateur afin de durcir la paraffine sans abimer les échantillons de mélèze. Les coupes définitives se font à une épaisseur

de 9µm sur une partie neuve de la lame de microtome afin que le ruban de coupe ne s'effiloche pas. Les rubans sont ensuite déposés à la surface de l'eau d'un bain marie à 40°C pour qu'ils restent bien lisses. Sur les lames de microscopie, on étale au doigt une fine couche d'albumine d'œuf ce qui permettra une meilleure adhérence des coupes sur les lames. On pose ces lames sur une plaque chauffante à 50°C pendant 15 minutes minimum. Dans le bain marie, on fait glisser 2 à 3 coupes sur les lames puis on les laisse sécher pendant 20 minutes sur la plaque chauffante. Si les échantillons sont repris plusieurs heures après la mise sur lame, un passage à l'étuve pendant 2h est nécessaire avant la coloration, afin de ramollir la paraffine.

Une fois les échantillons séchés, on réalise un premier bain de limonène pendant 20 minutes pour dissoudre la paraffine. On fait ensuite un deuxième bain d'éthanol 100% pendant 20 minutes afin de nettoyer les coupes de la paraffine. Enfin, on réalise un troisième bain de FASGA QB pendant 2H dans le but de colorer les parois pectocellulosiques des cellules de bois. On rince pendant quelques secondes dans 3 bains d'éthanol à 100%. Les bains se font écorce vers le haut. Les bacs de limonène et d'éthanol (hors rinçage) sont utilisables 2 fois tandis que les bacs de colorant sont utilisables 3 fois. Une fois les rinçages effectués, on appose délicatement un papier ultra absorbant sur la lame puis on laisse l'éthanol s'évaporer. On dépose ensuite 3 points de colle (Euparal) sur la lame avant de placer la lamelle. On laisse la colle bien se répartir puis on place un poids sur les lames après quelques minutes. Le séchage de la colle peut durer jusqu'à 1 semaine.

Quand les lames sont sèches, on observe les coupes sous un microscope photonique au grossissement x10 et équipé d'une caméra. Grâce au logiciel LAS V, on peut prendre des photographies des coupes et les importer sur un ordinateur avant de pouvoir traiter les images sur ImageJ® ([Figure 6](#)). Ce logiciel va nous permettre d'obtenir une mesure plus précise de la densité du bois. En effet, après passage de l'image en noir et blanc, on sélectionne une file de cellules. ImageJ va pouvoir donner une proportion entre les parois qui apparaissent en noir et les lumens qui apparaissent en blanc, ce qui correspond à la mesure de la densité.

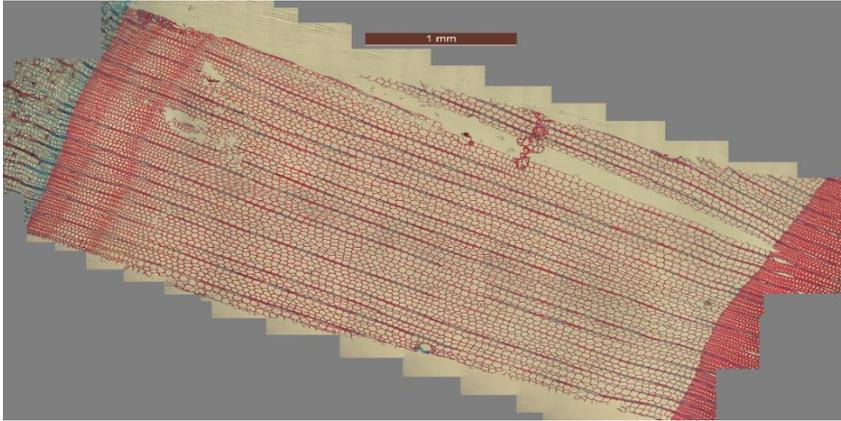


Figure 6 : Photographie d'une coupe de micro-carotte de mélèze. Coloration au bleu alcian et à la safranine. De l'écorce vers la moelle. Grossissement =  $\times 10$

## Résultats :

### La micro-densitométrie :

Quatre données de croissance radiale seront abordées : la surface (mm<sup>2</sup>), la densité du bois initial, la densité du bois final et la proportion du bois final. Nous les comparerons entre espèces et entre familles en fonction du dispositif.

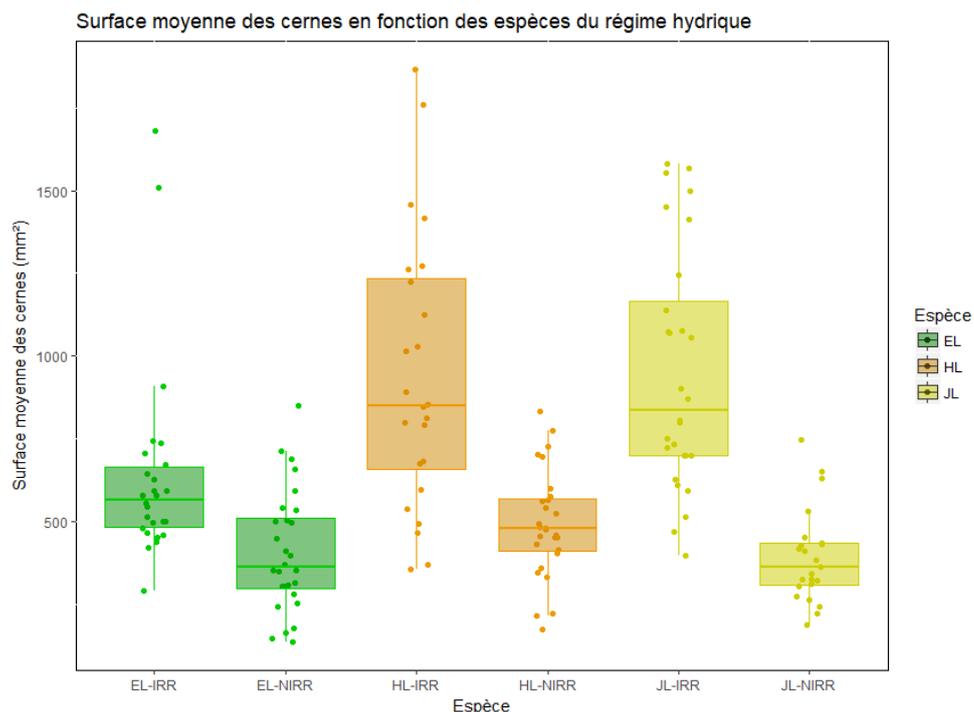


Figure 7 : Mean surface of rings depending on species and water availability. EL (green) = European Larch, HL (orange) = Hybrid Larch, JL (yellow) = Japanese Larch. IRR = Irrigated, NIRR = Non-Irrigated

Le boxplot ci-dessus nous montre une absence de significativité entre les différentes modalités. Néanmoins, il en ressort tout de même une tendance très nette. Le statut irrigué confère une surface moyenne de cerne plus grande chez les trois espèces. Aucune différence notable n'est visible entre les espèces non irriguées. En condition irriguée, les valeurs de surface les plus grandes sont obtenues par le mélèze hybride.

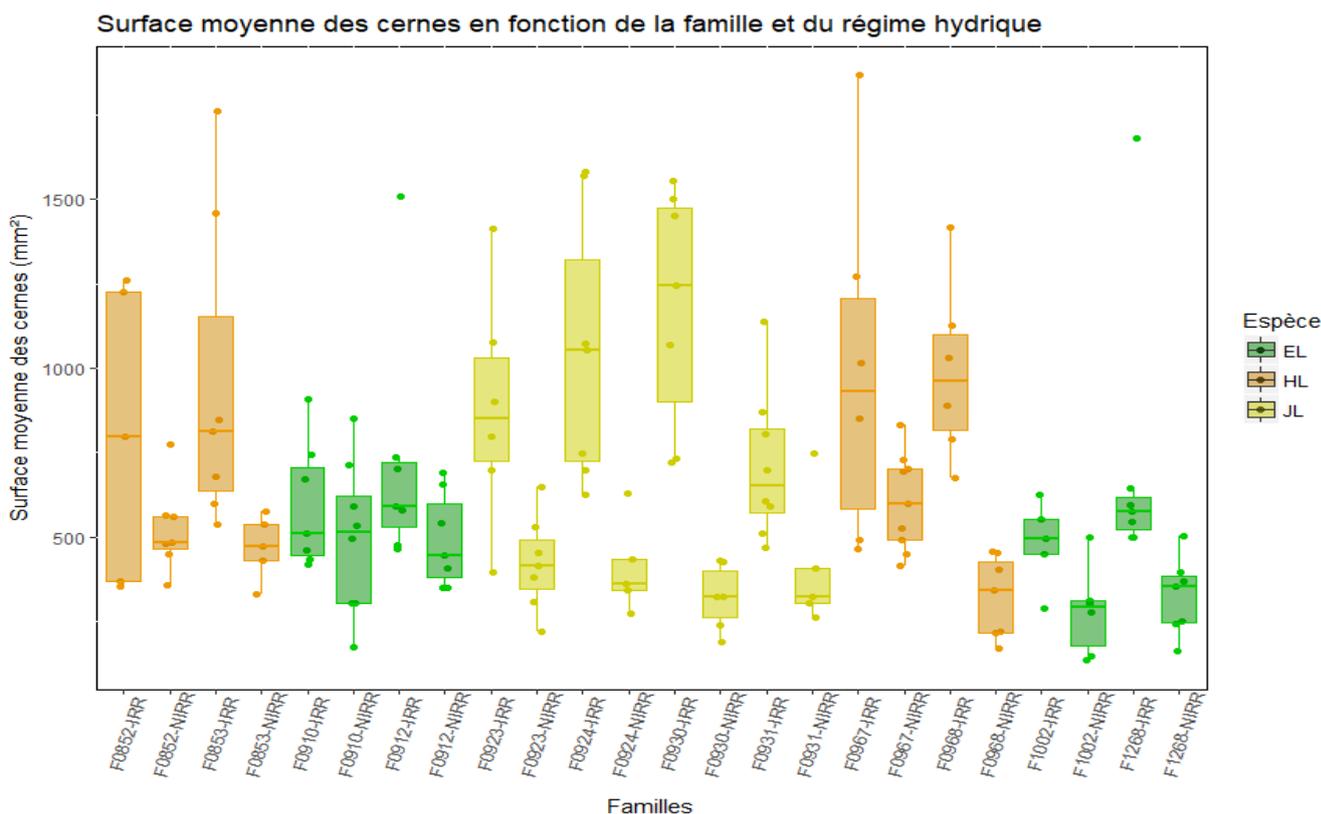


Figure 8 : Mean surface of rings depending on the family and water availability

Le boxplot ci-dessus nous montre une absence de significativité entre les conditions hydriques exceptées chez les familles F0924 (JL), F0930 (JL), F0931 (JL) et F0968 (HL). Pour ces familles, la surface moyenne de cerne est significativement plus grande en condition irriguée. Les familles F0924 (JL) et F0930 (JL) sont en moyenne les plus performantes sans stress hydrique. Néanmoins, ce sont les deux familles d'hybrides F0853 et F0967 qui possèdent les valeurs les plus élevées de surface de cerne respectivement 1760.83mm<sup>2</sup> et 1866.49mm<sup>2</sup>. En conditions non irriguée, c'est la famille d'origine hybride F0967 qui possède la surface moyenne de cerne la plus élevée (603.85 mm<sup>2</sup>).

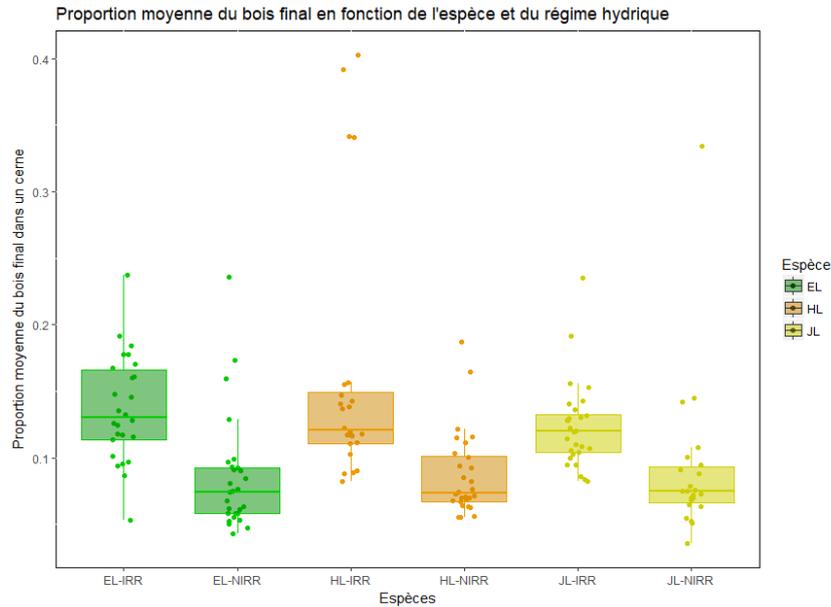


Figure 9 : Mean latewood proportion in a ring depending on the specie and water availability

Le boxplot ci-dessus nous montre une absence de significativité entre les différentes conditions. Les moyennes sont toutes dirigées par des valeurs extrêmes supérieures (exceptée EL en condition irriguée). On distingue néanmoins une tendance de l'effet de la disponibilité en eau. En effet, la proportion du bois final semble plus importante chez les individus n'ayant pas subi de stress hydrique. Les valeurs les plus élevées sont atteintes par l'espèce hybride allant jusqu'à plus de 40.3% en condition irriguée. En déficit hydrique, la valeur la plus faible, quant à elle, est obtenue par l'espèce japonaise à 3.56% de bois initial dans le cerne.

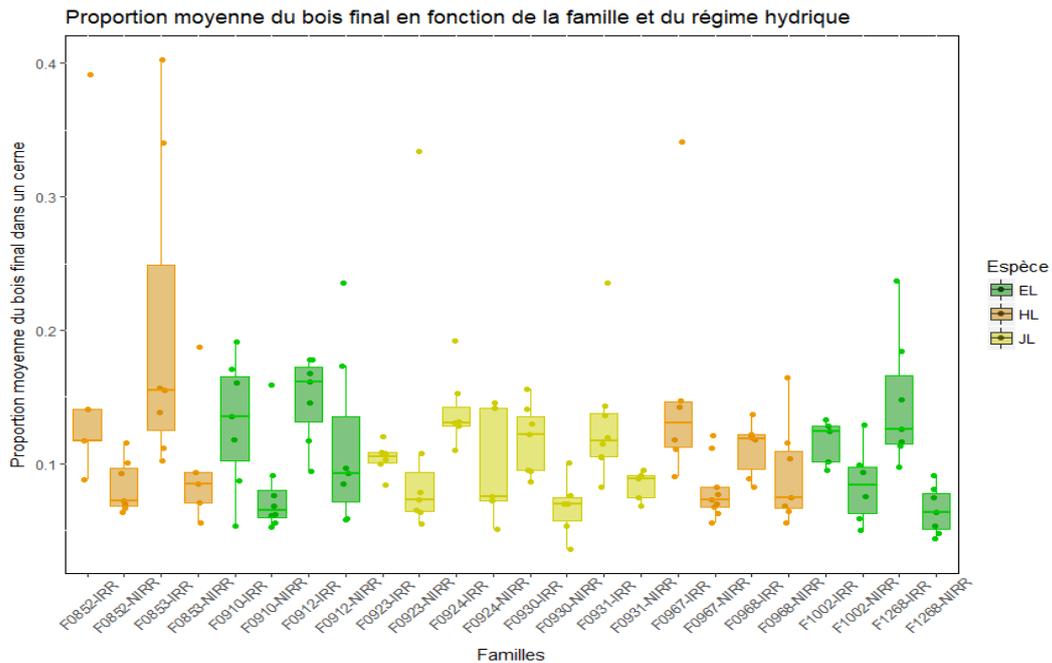


Figure 10 : Mean latewood proportion in a ring depending on the family and water availability

La figure ci-dessus nous montre une différence significative chez deux familles, F0853 et F1268, en fonction du régime hydrique. Pour les autres familles, on remarque la même tendance vue précédemment, à savoir qu'en condition non stressante, la proportion du bois final au sein du cerne est plus grande qu'en condition stressante. Les familles F0853 (hybride) et F01268 (européen) sont celles qui possèdent en les plus grandes valeurs de proportion de bois final, à savoir 40.3% et 23.7% en condition idéale. A l'inverse, ce sont les familles F0930 (japonais) et F1268 (européen), avec respectivement 3.56% et 4.34%, qui ont les proportions de bois final les plus petites sous stress hydrique. En moyenne, c'est également la famille hybride F0853 (=20.10% en IRR et 9.85% en NIRR) qui est plus élevée, puis F0912 (=14.87% en IRR et 11.42% en NIRR) qui est une espèce européenne dans les deux conditions hydriques.

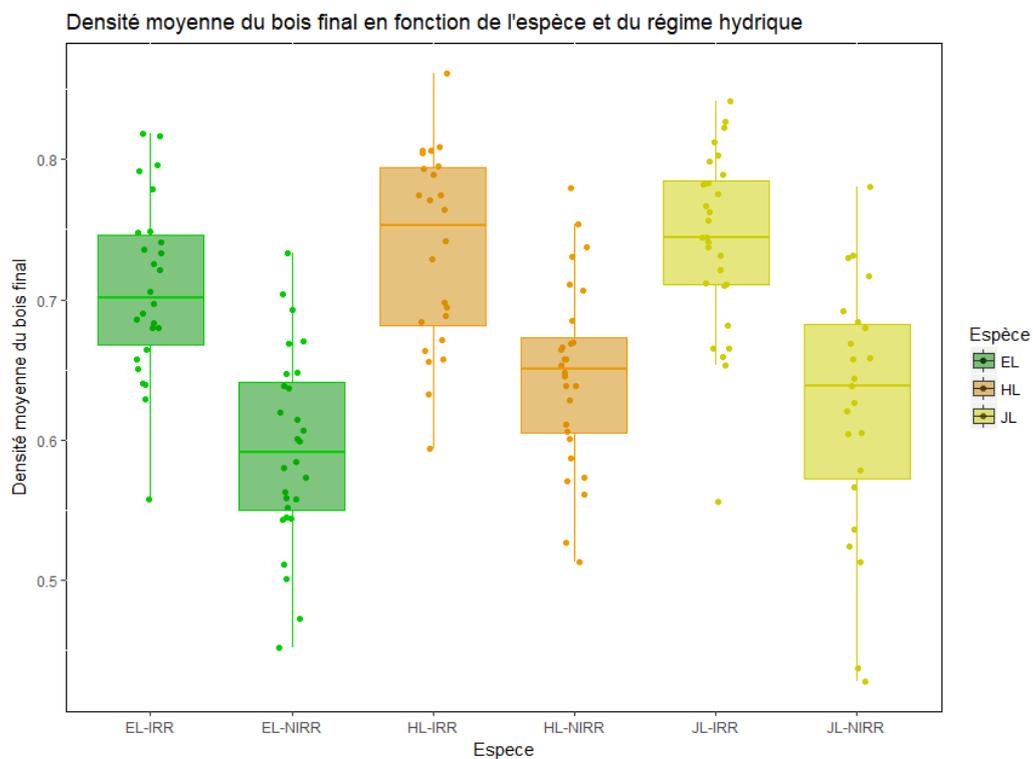


Figure 11 : Mean latewood density in a ring depending on the specie and water availability

Le graphique ci-dessus nous montre la densité moyenne du bois final dans un cerne en fonction des espèces et du régime hydrique. Une fois de plus, il n'y a pas de différence significative mais une tendance se dégage. En effet, en condition non stressante, le bois final est plus dense qu'en condition stressante. Les espèces hybride et japonaise semble présenter un bois final plus dense que l'espèce européenne, quelques soit l'apport en eau.

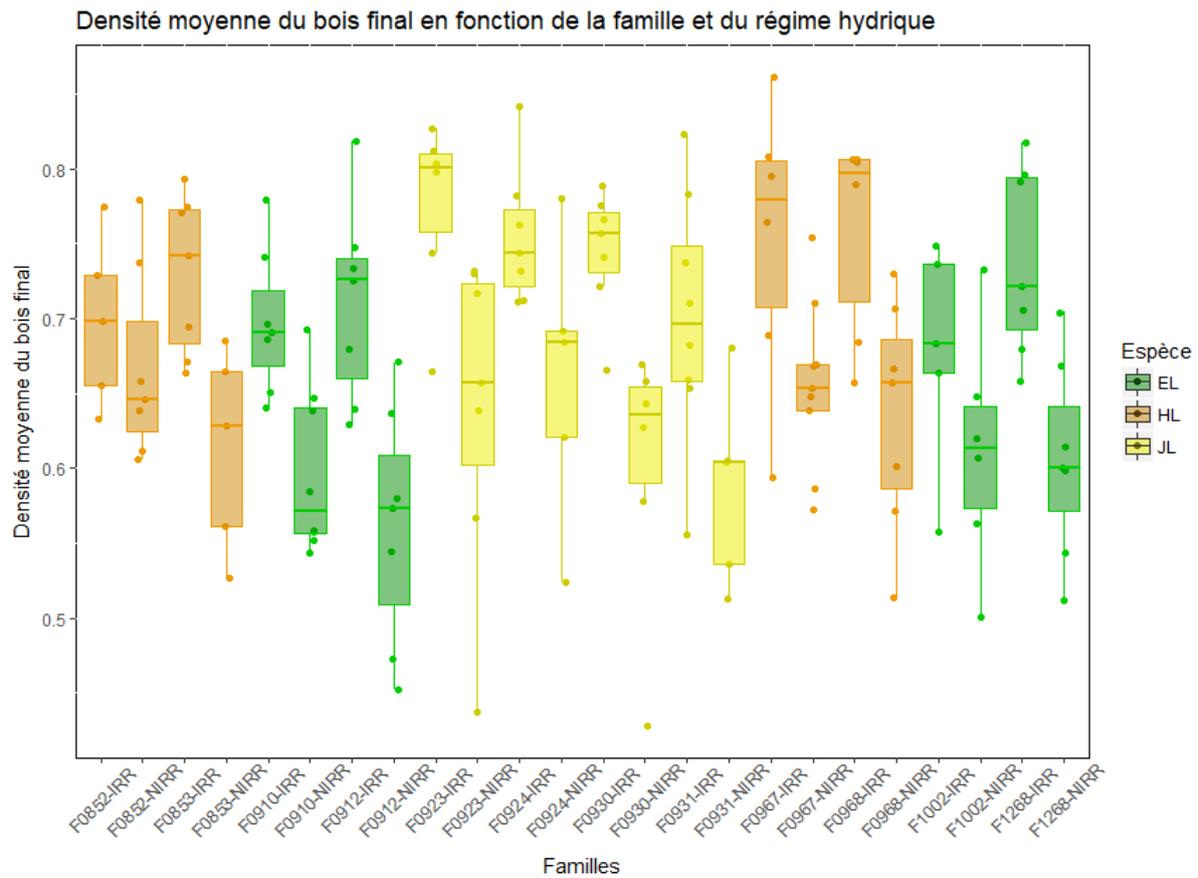


Figure 12 : Mean latewood density in a ring depending on the family and water availability

Ce boxplot nous montre une absence de significativité entre les deux conditions hydriques de familles identiques. Deux d’entre elles, F0923 et F0930, présentent tout de même des densités moyennes de bois final significativement différentes. En condition non stressante, ce sont les familles F0923 (JL) et F0968 (HL) qui possèdent les moyennes de densité du bois final les plus élevées. En situation de stress, ce sont les familles F0924 (JL) et F0968 (HL). Les valeurs maximales atteintes sur parcelle non irriguée sont obtenues par les familles F0852 (HL) et F0924 (JL).

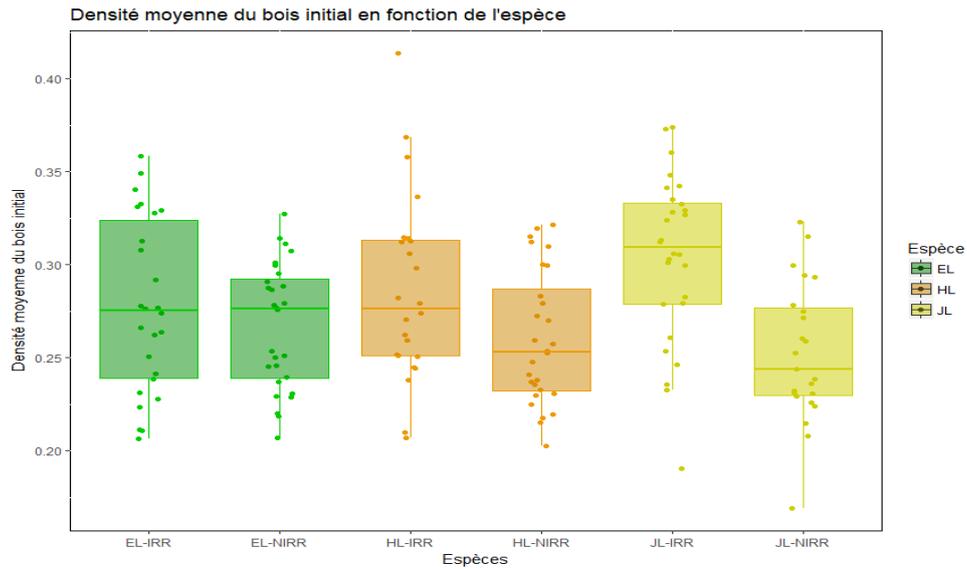


Figure 13 : Mean earlywood density in a ring depending on the specie and water availability

Sur ce graphique, nous pouvons voir qu'il n'y a aucune différence significative en fonction du régime hydrique pour l'espèce européenne. De même pour l'espèce japonaise et hybride, mais une tendance se dessine pour ces deux dernières. En effet, nous pouvons remarquer que la densité du bois initial est plus importante en condition hydrique favorable.

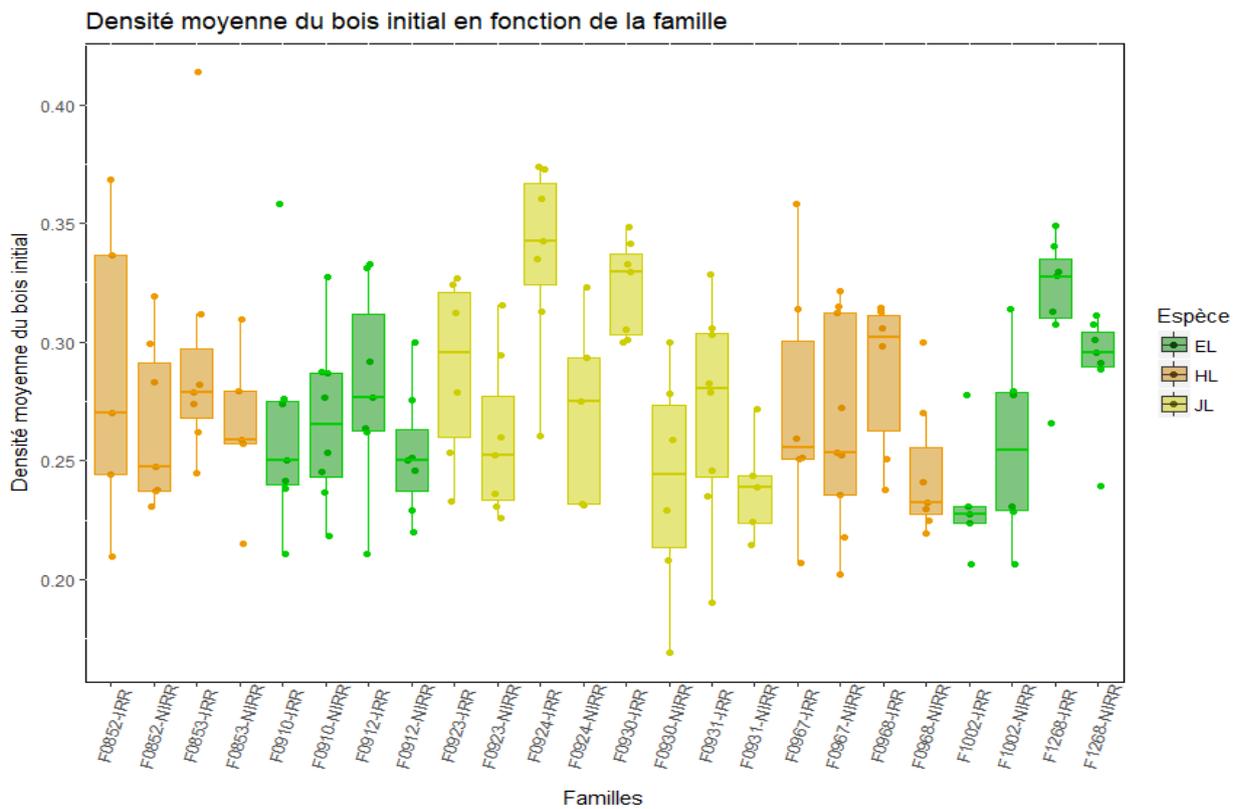


Figure 14 : Mean earlywood density in a ring depending on the family and water availability

Sur ce graphique, nous constatons une fois de plus le manque de significativité entre les deux conditions hydriques au sein d'une même famille. Sans stress, les familles qui présentent les valeurs les plus élevées sont F0854 (HL) et F0924(JL). En condition hydrique limitante, ce sont les familles F0910 et F0924.

### *Les coupes anatomiques :*

Les données de coupes anatomiques n'ont pas pu être intégrées à ce rapport par manque de temps (séchage très long des lames).

## *Discussion :*

### *La micro-densitométrie :*

Le manque de significativité présent dans la plupart de nos résultats est sûrement dû à notre échantillon du dispositif qui est assez petit. En effet, dans chaque famille, entre 6 et 7 individus de chaque régime hydrique étaient représentés. Cependant, nous pouvons tirer des informations des tendances qui ressortent de nos figures. En termes de surface de cerne ([Figure 7](#) et [Figure 8](#)), l'espèce hybride a les valeurs les plus élevées en condition non stressante et est, en moyenne, plus performante que les mélèzes européens et japonais sous déficit hydrique. Ce sont deux familles japonaises qui ont les moyennes de surfaces les plus élevées, même si les plus hautes valeurs sont atteintes par des familles d'hybrides. Ceci peut être expliqué par le fait que la famille F0853 (HL) partage le même père que la famille F0924 (JL). De la même manière, la famille F0967 (HL) partage le même père que la famille F0930 (JL). Ainsi, il se peut que la supériorité de l'hybride en termes de surface soit portée par le génotype japonais paternel. La surface moyenne des cernes illustre bien la croissance radiale et donc, par extension, la vigueur. Considérant ce caractère, nous pouvons donc dire que l'hybride est plus vigoureux. La proportion du bois final, selon Donnelly et al. 2017, est un critère déterminant de la réponse à la sécheresse et donc de la vigueur. Chez les clones vigoureux, elle est sensée diminuer, c'est-à-dire qu'il y aurait plus de cellules à lumen large et à parois fines. Cependant, dans nos résultats ([Figure 9](#) et [Figure 10](#)), il semblerait que nous assistions à l'effet inverse. En effet, en condition irriguée, la proportion du bois final augmente, ce qui constitue une originalité relative au

mélèze. Deux hypothèses sont alors envisageables pour expliquer ce phénomène. Premièrement, cela signifie que même dans un scénario idéal, le mélèze peut réduire sa conductivité hydraulique sans pour autant manquer d'eau. Ceci constitue une preuve solide de sa résistance à la sécheresse. Cela est d'autant plus intéressant puisque le bois du mélèze est principalement utilisé pour la confection de construction massive, requérant donc une plus grande densité. Deuxièmement, cela peut se traduire par une diminution du dépôt de lignine qui est à l'origine de l'épaisseur des parois. Comme le stress hydrique induit une fermeture stomatique, les échanges gazeux ne se font plus : le carbone atmosphérique ne peut plus entrer dans la plante. De là, on peut alors penser que l'allocation des ressources carbonées est modifiée. Dans notre cas, en condition stressante, il ne semble pas y avoir de différence significative entre les moyennes de proportion de bois final de nos trois espèces. En revanche, l'espèce européenne présente des valeurs plus élevées. Si on regarde en conditions idéales nos familles, F0853 possède les valeurs de proportion de bois final les plus élevées, suivi de F1268. En moyenne, c'est également F0853 qui domine puis F0912. Les familles F0853 (HL) et F1268 (EL) qui présentent les valeurs les plus fortes de proportion du bois final possèdent la même mère. Ainsi, nous pouvons émettre l'hypothèse que la supériorité de l'hybride en termes de proportion de bois final est dirigée par le patrimoine génétique maternelle européen. En condition stressante, les familles les plus performantes sont F0912 (EL) puis F0968 (HL). Ces deux familles ont la même provenance génétique côté maternelle ce qui appuie l'idée que la supériorité en termes de proportion du bois final est définie par le génotype de la mère européenne. Quand on regarde la densité maximale du bois final ([Figure11](#)), l'hybride a tendance à produire un bois final plus dense que les deux autres espèces quel que soit la situation hydrique. Sur la parcelle stressée, ce sont les familles F0924 (JL) et F0968 (HL) qui présentent les moyennes les plus élevées ([Figure12](#)). Ces deux familles sont composés de demi-frères ayant le même père japonais. En somme, nous pouvons émettre l'idée que le génotype japonais du père favorise l'augmentation de densité du bois final. Enfin, en condition idéale, l'espèce japonaise semble produire un bois initial plus dense ([Figure13](#)). A l'inverse, en déficit hydrique, c'est l'espèce européenne qui est plus vigoureux. A chaque fois, l'espèce hybride semble prendre des valeurs intermédiaires. Si on regarde nos familles en stress hydrique ([Figure14](#)), les plus performantes sont F0924 (JL), F01268 (EL) et F0853 (HL). Il est intéressant de noter que ces trois familles sont composées de demi-frères et que l'hybride possède le même père que F1268 et la même mère que F0924. Ainsi, on peut supposer que la vigueur de l'hybride dépend ici des deux parents.

## *Les limites :*

Durant notre étude, nous avons été confrontés à plusieurs limites qui ont rendu difficiles les analyses de nos données. Tout d'abord, la juvénilité de nos plants rend délicat l'utilisation du tréphor de par le diamètre réduit du tronc. En prélevant deux micro-carottes par individus, on soumet les arbres à un stress supplémentaire pouvant enclencher une mortalité ultérieure, notamment sur la parcelle non irriguée.

WinDendro utilise une image numérisée et attribue des moyennes de densité en fonction des nuances de gris présents sur l'image d'origine. Tout élément (poussière, cheveux...) déposé sur l'image d'origine peut fausser l'analyse de la radiographie.

## *Conclusion :*

### *Conclusion générale :*

Les conditions de sécheresses sont limitantes pour les mélèzes. Néanmoins, l'hybride semble plus adapté que les espèces européenne et japonaise en présentant notamment une surface de cerne plus élevée. Pour ce qui est de la proportion du bois final, une fois encore c'est l'hybride, au travers de la famille F0853, qui présentent les valeurs les plus élevées sous condition idéale. En situation de stress, la famille européenne F0912 semble en moyenne plus adaptée. Néanmoins, la famille F0853 lui fait suite. L'hybride produit un bois final plus dense mais un bois initial intermédiaire entre celui de l'espèce japonaise et celui de l'espèce européenne.

En conclusion, nous pouvons dire que nous avons une idée générale des capacités de l'hybride comparées à celles de ces parents. En somme, lors des périodes de sécheresses extrêmes prédit par le GIECC, les clones juvéniles hybrides pourraient se révéler plus performant que les espèces parentales. Néanmoins, cela affectera tout de même les rendements (surface radiale plus faible) et la qualité du bois (moins dense et avec moins de bois final). Cela se traduit également par une augmentation de la conductivité hydrique et du risque à la cavitation. En

somme, de nouvelles pratiques culturales devront peut-être être envisagées afin de maintenir l'économie du mélèze.

### Perspectives :

Il pourrait être intéressant d'approfondir l'aspect génétique de cette étude afin de caractériser l'héritabilité des critères d'intérêt. Cela pourrait permettre de réaliser de nouveaux croisements donnant des clones plus vigoureux et adaptés au climat à venir. L'analyse des coupes anatomiques pourraient également apporter des éléments de réponse sur les critères de densités du bois. Cette analyse histologique pourrait également permettre de mieux observées les tailles des cellules afin de répondre à la question : pourquoi le mélèze voit sa densité de bois diminuée en condition stressante ?



### Références :

- Balducci L, Deslauriers A, Giovannelli A, Rossi S, Rathgeber CBK (2013) Effects of temperature and water deficit on cambial activity and woody ring features in *Picea mariana* saplings. *Tree Physiol* 33:1006–1017.
- Baltunis BS, Greenwood MS, Eysteinnsson T (1998) Hybrid vigor in *Larix*: Growth of intra- and interspecific hybrids of *Larix decidua*, *L. laricina*, and *L. kaempferi* after 5-years. *Silvae Genet* 47:288–293.
- Christiansen E, Waring RH, Berryman AA (1987) Resistance of Conifers to Bark Beetle

Attack: Searching for General Relationships ROLE OF BARK BEETLES IN NATURAL FOREST ECOSYSTEMS. For Ecol Manag Elsevier Sci Publ BV 22:89–106. [https://ac.els-cdn.com/0378112787900983/1-s2.0-0378112787900983-main.pdf?\\_tid=e0176745-6c6f-46c6-b99f-1002dcf7871e&acdnat=1520870740\\_e6b4bacab85df7fe41ed783393094522](https://ac.els-cdn.com/0378112787900983/1-s2.0-0378112787900983-main.pdf?_tid=e0176745-6c6f-46c6-b99f-1002dcf7871e&acdnat=1520870740_e6b4bacab85df7fe41ed783393094522)

Donnelly L, Lundqvist SO, O'Reilly C (2017) Inter-and intra-annual wood property variation in juvenile wood between six Sitka spruce clones. *Silva Fenn* 51:1–14.

Hacke U., Sperry J. (2001) Functional and ecological xylem anatomy. *Perspect Plant Ecol Evol Syst* 4:97–115.

Matras J, Pâques L (2008) *Larix decidua*. <https://www.woodlandtrust.org.uk/visiting-woods/trees-woods-and-wildlife/british-trees/common-non-native-trees/larch/>

Matson PA, Hain FP, Mawby W (1987) Indices of Tree Susceptibility to Bark Beetles Vary with Silvicultural Treatment in a Loblolly Pine Plantation. For Ecol Manag Elsevier Sci Publ BV 22:107–118.

McCullough DG, Wagner MR (1987) Evolution of four techniques to assess vigor of water-stressed ponderosa pines. *Can J For Res* 17:138–145.

Philippe G, Buret C, Matz S, Pâques LE (2016) Composition of hybrid larch (*Larix × eurolepis* Henry) forest reproductive materials: How much does hybrid percentage affect stand performance? *New For* 47:541–564.

Physical T, Basis S (2014) IPCC Climate Change 2013.

Saranpää P (2009) Wood density and growth. In: Barnett JR, Jeronimidis G (eds) *Wood Quality and its Biological Basis*. John Wiley & Sons, p 87.

Sylvestre-Guinot G, Pâques L., Delatour C (1999) Résistance du mélèze hybride inoculé par *Lachnellula willkommii*. *Ann For Sci* 56:485–492.

Taiz L, Zeiger E (2002) *PLANT PHYSIOLOGY* Taiz L, Zeiger E (eds). Sinauer Associates.

TelaBotanica (2017a) *Larix decidua* Mill.

TelaBotanica (2017b) *Larix kaempferi* (Lindl.) Carrière.

Teskey RO, Bongarten BC, Cregg BM, Dougherty PM, Hennessey TC (1987) Physiology and genetics of tree growth response to moisture and temperature stress: an examination of

the characteristics of loblolly pine (*Pinus taeda* L.). *Tree Physiol* 3:41–61.

Turtola S, Manninen AM, Rikala R, Kainulainen P (2003) Drought stress alters the concentration of wood terpenoids in Scots pine and Norway spruce seedlings. *J Chem Ecol* 29:1981–1995.

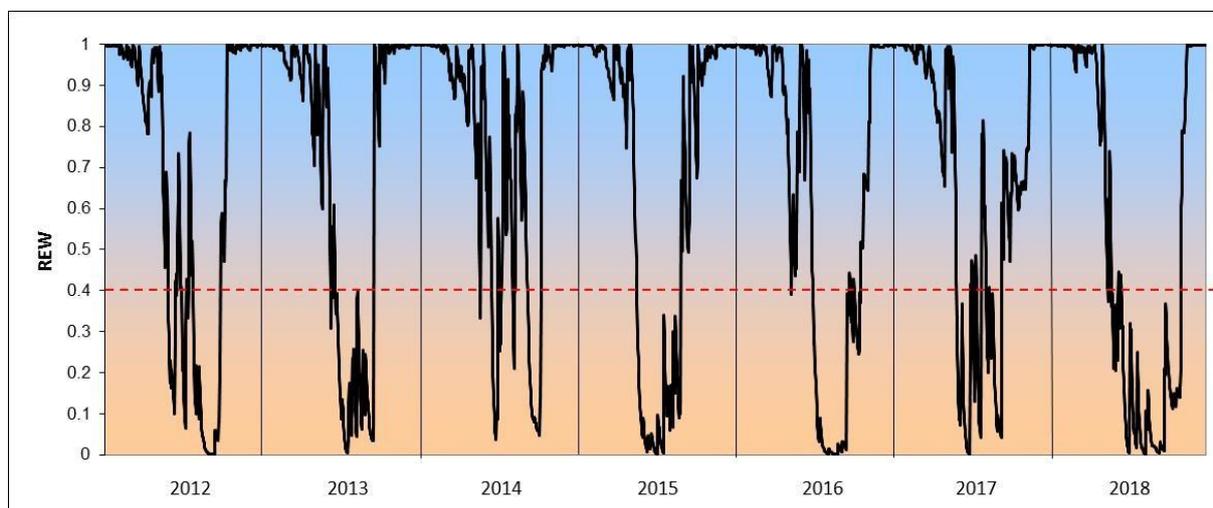
Tyree M., Zimmermann M. (2002) *Xylem Structure and the Ascent of Sap*. Springer Berlin Heidelberg.

Waring RH, Thies WG, Muscato D (1980) Stem growth per unit of leaf area: a measure of tree vigor. *For Sci* 26:112–117.



ANNÉE	Préc	Tm	In	ETP	ETR	TR	Dr	NJstress	Istress	DEBstress
2012	705	11.0	97	636	324	182	380	96	66.3	147
2013	816	10.8	90	622	310	178	506	91	57.5	158
2014	867	11.9	102	619	405	254	461	58	32.7	139
2015	609	11.9	73	683	261	143	348	102	76.3	137
2016	714	11.2	86	626	270	141	444	108	74.5	129
2017	642	11.7	94	651	346	210	296	83	49.3	147
2018	647	12.1	67	707	258	151	389	158	107.6	133

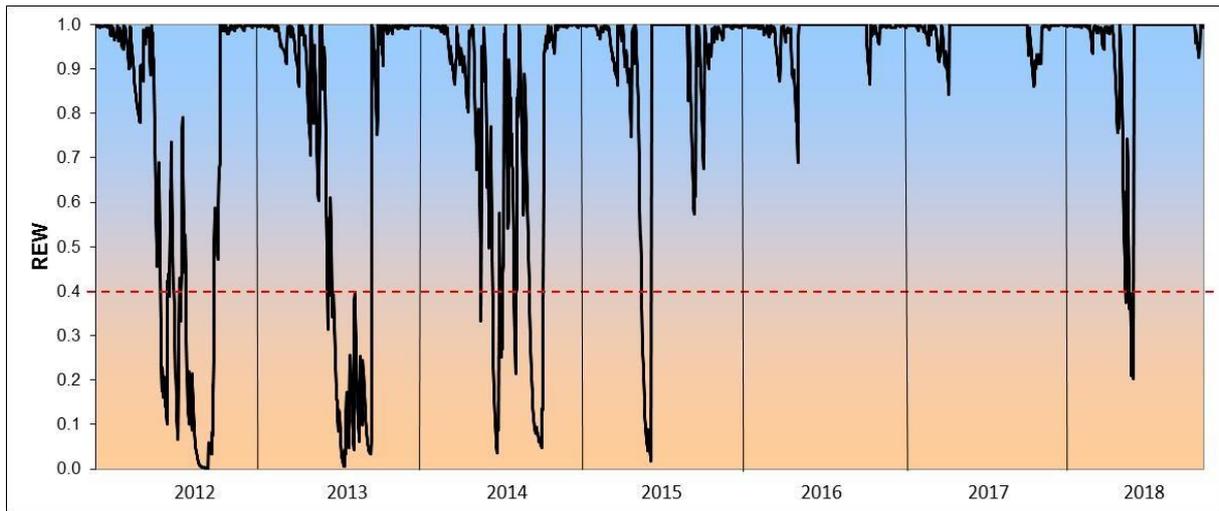
*Annexe 2* : Données météorologiques sur l'ensemble de la parcelle en fonction des années. Préc = Précipitations, Tm = Températures moyennes (11.5°C en moyenne sur les 7 années), In = Interception, ETP = Évapotranspiration potentielle, ETR = Évapotranspiration réelle, TR = Transpiration, Dr = Drainage, NJStress = Nombre de jours de stress, Istress = Intensité du stress, DEBstress = 1<sup>er</sup> jour de stress.



*Annexe 3* : Suivi du déficit hydrique du sol de l'ensemble de la parcelle en fonction des années. REW = Relative Extractable Water. Ligne pointillé rouge = valeur seuil de fermeture stomatique.

ANNÉE	Préc	In	ETP	ETR	TR	Dr	Njstress	Istress	DEBstress
2012	705	97	637.2	326	183.2	379.8	96	26.5	147
2013	816	90.5	623.2	311.1	178.8	506.1	91	23.0	158
2014	867	102.1	619.7	405	254.7	461.2	58	13.1	139
2015	2249	73.7	684.1	555	195.8	1694.7	22	6.3	137
2016	1807	85.9	627.2	549.8	231.7	1257.5	0	0.0	0
2017	2173	92.8	651.5	590.9	235	1581.8	0	0.0	0
2018	2565	67.1	706.8	642.6	240.7	1923.2	12	1.1	133

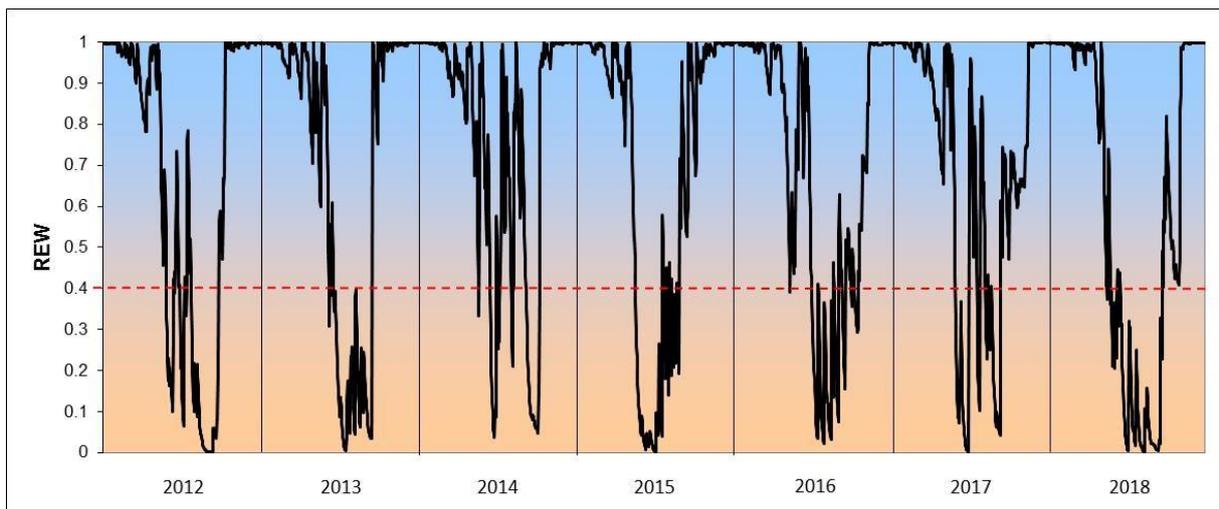
*Annexe 4* : Données météorologiques sur la partie irriguée de la parcelle en fonction des années.



*Annexe 5 :* Suivi du déficit hydrique du sol sur la partie irriguée de la parcelle en fonction des années.

ANNÉE	Préc	In	ETP	ETR	TR	Dr	NJstress	Istress	DEBstress
2012	705	97	636	324	182	380	96	66.3	147
2013	816	90	622	310	178	506	91	57.5	158
2014	867	102	619	405	254	461	58	32.7	139
2015	669	81	683	311	184	358	94	61.1	137
2016	824	102	626	364	216	461	78	39.2	129
2017	677	97	651	368	228	309	68	42.5	147
2018	695	74	707	285	170	410	117	80.8	133

*Annexe 6 :* Données météorologiques sur la partie non irriguée de la parcelle en fonction des années.



*Annexe 7 :* Suivi du déficit hydrique du sol sur la partie non irriguée de la parcelle en fonction des années.