

Titre :	Qualité du bois du mélèze hybride (<i>Larix x marschlinsii</i> Coaz.) non élagué dans la région de Lanaudière
Auteurs :	Léna Levoy, Julie Barrette, Jasmin Ricard, Martin Perron, Guillaume Giroud et Charles Ward
Date :	Février 2021

Les propriétés du bois des mélèzes hybrides étant encore peu connues, les aménagistes se questionnent sur les usages qui pourraient être tirés des arbres récoltés lors de l'éclaircie dans les plantations de cette espèce arborescente. Dans la région de Lanaudière, où l'espèce a été plantée en grande quantité, nous avons mesuré les propriétés du bois de mélèzes hybrides non élagués plantés dans le secteur du Lac à la Truite, à savoir la densité basale, la teneur en humidité, la rigidité et la résistance à la flexion. Dans cette étude, nous faisons également état des utilisations possibles du bois, considérant ces propriétés.

1. Contexte

Le mélèze hybride (MEH; *Larix x marschlinsii* Coaz.) est un résineux à croissance rapide qui est issu d'un croisement entre le mélèze d'Europe (MEE; *Larix decidua* Mill.) et le mélèze du Japon (MEJ; *Larix kaempferi* (Lamb.) Carrière) (Koubaa et Zhang 2009; Perron 2011). Le premier MEH a été découvert à Dunkeld, en Écosse, au début du XX^e siècle (Henry et Flood 1919). Espèce exotique ne figurant pas sur la liste des espèces envahissantes (ISSG 2020), le MEH est bien adapté au climat nordique (Larsson-Stern 2003). Au Québec, à ce jour, il a été planté sur 2 617 ha (MFFP 2018) (figure 1). C'est l'un des conifères les plus productifs de l'est du Canada (Koubaa et Zhang 2009), avec les plus hauts rendements annuels moyens (Thiffault *et al.* 2003). À titre d'exemple, lorsqu'elle est plantée sur des stations riches (indice de qualité de station [IQS] = 23,6 m à 25 ans), la variété québécoise « MEH 20-20 » possède un accroissement annuel moyen de 11,8 m³·ha⁻¹·an⁻¹ à 30 ans (Perron 2011). Bien que la performance de croissance du MEH soit bien connue et documentée (Holst 1974; Carswell et Morgenstern 1995), peu d'informations existent au sujet des propriétés de son bois (Chui et MacKinnon-Peters 1995; Einspahr *et al.* 1983). Ce manque de connaissances nuit au développement concret de l'aménagement du MEH, puisque les usages de son bois ne sont pas clairement définis et que peu d'industriels investissent dans sa transformation.

On peut citer tout ou partie de ce texte en indiquant la référence
© Gouvernement du Québec

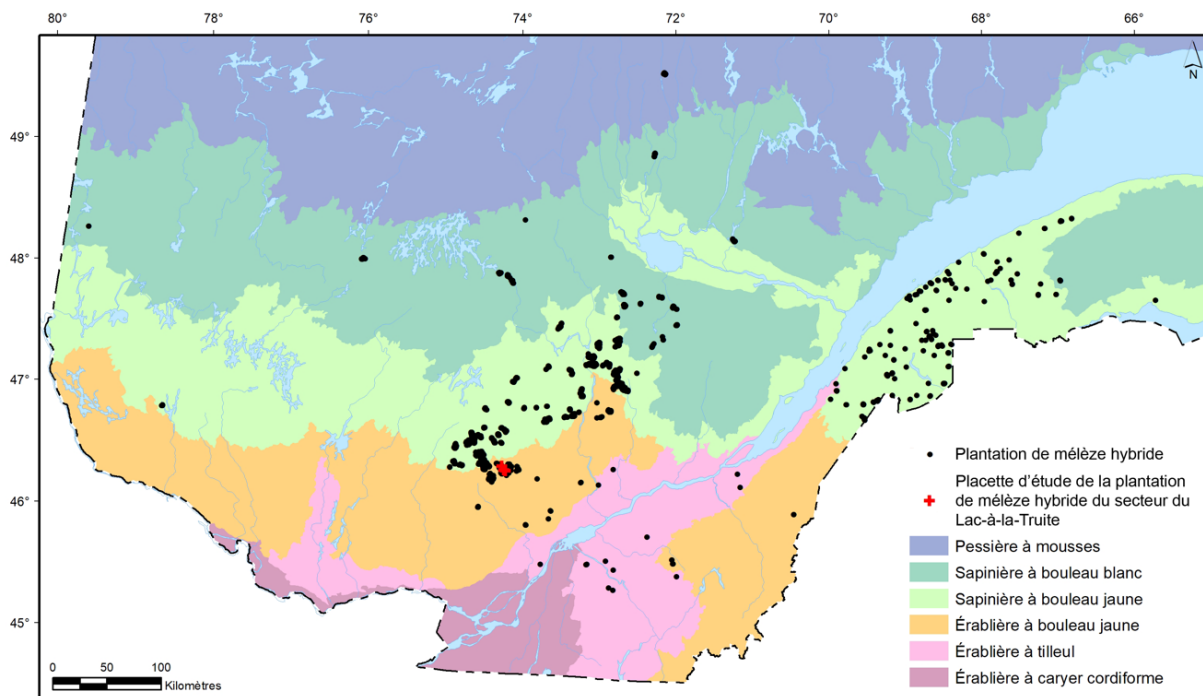


Figure 1. Carte montrant l'emplacement des plantations de mélèze hybride au Québec (MFFP 2018), y compris celle du secteur du Lac à la Truite. Les zones de couleur correspondent aux domaines bioclimatiques de la province.

C'est dans ce contexte que nous avons étudié la qualité du bois des MEH issus d'une plantation âgée de 20 ans située dans le secteur du Lac à la Truite (région de Lanaudière). Les aménagistes envisagent d'y réaliser une première éclaircie et souhaiteraient connaître la qualité du bois des tiges qui seront récoltées. Notre objectif était donc de dresser un portrait des propriétés physicomécaniques du bois des MEH de cette plantation, afin de déterminer les usages qui pourraient en être tirés.

2. Méthodologie

2.1. Description du site d'étude

La présente étude a été réalisée dans la plantation « 90006 » du secteur du Lac à la Truite (Saint-Michel-des-Saints, Lanaudière, Québec, Canada). Cette plantation de 68,7 ha a été mise en terre en 1999 et en 2000. Les arbres de cette plantation sont issus d'une pollinisation libre entre des MEE et des MEJ du verger de Lotbinière (LOT45776) établi en 1976. Leur niveau d'amélioration génétique est donc inférieur à celui de la variété québécoise « MEH 20-20 » plantée au Québec, qui est issue de croisements dirigés.

Les arbres de la plantation étudiée sont espacés, en moyenne, de 2,25 m les uns des autres. Le site d'étude est situé dans la région écologique 3c (hautes collines du Bas-Saint-Maurice; Gosselin 2014). La

température moyenne est de de 3,1 °C, et les précipitations annuelles totales sont de 932,6 mm (données récoltées de 1981 à 2010 à Saint-Michel-des-Saints; MELCC 2020).

Dans cette plantation, nous avons échantillonné des MEH issus de 6 placettes circulaires de 400 m² (figure 2) faisant partie d'un dispositif mis en place auparavant par la Direction de la recherche forestière. Au total, ce dispositif comprend 12 paires de placettes qui permettent de comparer la croissance d'arbres non élagués à celle d'arbres élagués en 2011. Pour la présente étude, nous avons choisi d'utiliser uniquement les placettes de MEH non élagués afin d'étudier, dans un premier temps, les propriétés du bois des arbres n'ayant subi aucune intervention sylvicole. Nous avons effectué une stratification sur la base de la répartition diamétrale et du diamètre moyen des tiges afin de nous assurer de couvrir une vaste gamme de dimensions d'arbres. Chacune des 6 placettes échantillonnées contenait des MEH plantés en 1999 et n'ayant subi aucun élagage.

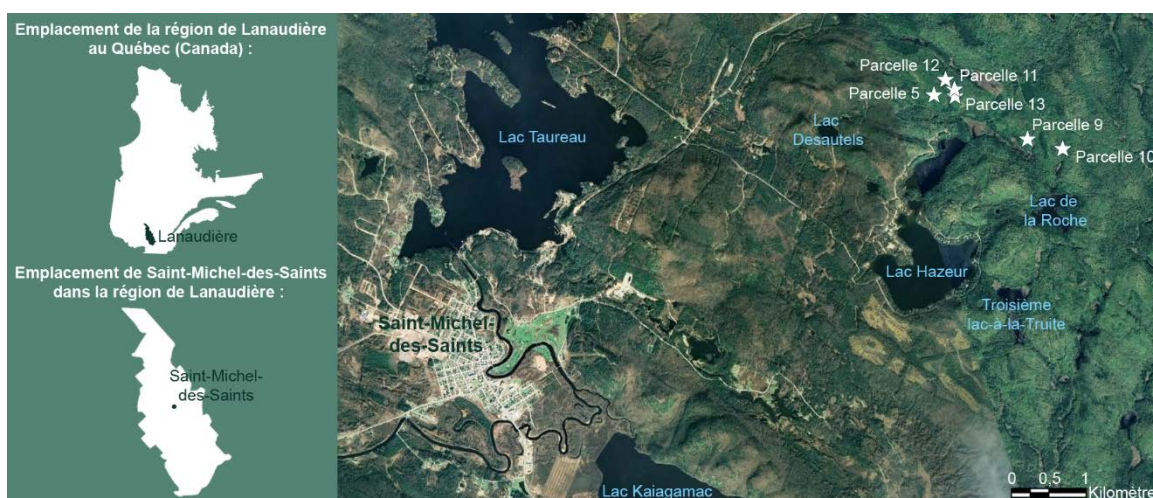


Figure 2. Emplacement des 6 placettes d'étude dans la plantation de mélèzes hybrides du secteur du Lac à la Truite (Saint-Michel-des-Saints, Lanaudière, Québec, Canada) (image satellite : Google 2017).

2.2. Sélection des arbres-échantillons

En 2016, nous avons mesuré le diamètre à hauteur de poitrine (DHP, mesuré à 1,30 m au-dessus du niveau du sol) et la hauteur totale de tous les MEH dans les 6 placettes d'étude à l'aide d'un galon circonférentiel et d'un vertex. En moyenne, ces arbres, alors âgés de 18 ans, avaient un DHP de 15,1 cm (écart type : 3,3 cm) et une hauteur totale de 14,5 m (écart type : 1,4 m). Cette dernière étant supérieure à 7 m, nous avons pu appliquer la norme provinciale d'inventaire écoforestier pour les placettes-échantillons temporaires alors en vigueur (MFFP 2016) afin de sélectionner les 3 arbres-échantillons par parcelle : un de manière systématique sur la base de son numéro (S), un second parmi les 4 plus gros arbres de la placette (P), et un troisième dont les dimensions correspondaient à la moyenne quadratique de l'ensemble des arbres de la placette (Q). Comme l'échantillonnage était destructif, nous avons privilégié autant que

possible les arbres situés en périphérie des placettes. Les 18 MEH ainsi sélectionnés ont été mesurés en 2016 afin que leurs propriétés dendrométriques soient évaluées. Ils ont été abattus à la fin de l'été 2018 afin que leurs propriétés du bois soient déterminées.

2.3. Variables étudiées

2.3.1. Propriétés dendrométriques des arbres

Une fois les MEH abattus, nous avons mesuré la longueur et le défilement de leur tige en prenant des mesures du diamètre à 0,15, 0,45, 0,95, 1,30 et à 2 m, puis à tous les mètres suivants. Nous avons ensuite calculé le volume marchand et le volume total à partir de la longueur et du défilement des tiges, en utilisant la formule de Smalian (OIFQ 1997) (équation 1) :

$$V = \frac{\pi}{4} \times \left(\frac{D1^2 + D2^2}{20} \right) \times L \quad [1]$$

où V est le volume (en dm³), D1 est le diamètre au gros bout (en cm), D2 est le diamètre au fin bout (en cm) et L est la longueur du tronçon (en m).

Le volume total a été calculé sur l'ensemble de l'arbre, alors que le volume marchand a été calculé sur sa portion marchande, c'est-à-dire jusqu'à un diamètre avec écorce de 9 cm au fin bout de la tige principale et des branches (Perron 2003).

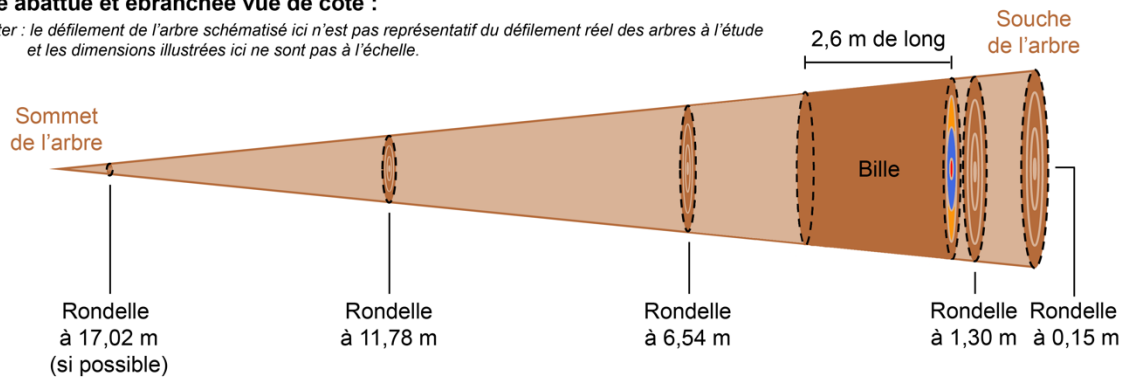
2.3.2. Propriétés du bois

Après avoir déterminé les propriétés dendrométriques des 18 arbres-échantillons, nous avons étudié les propriétés de leur bois. Pour ce faire, nous avons d'abord tronçonné les tiges en plusieurs sections. Comme le montre le schéma de tronçonnage (figure 3), nous avons prélevé 4 ou 5 rondelles sur chacune des tiges à l'étude : à la hauteur de la souche (0,15 m) et de la poitrine (1,30 m), puis tous les 5,24 m (dans le but de laisser des billes longues de 4,90 m [16 pi] entre les rondelles). Afin d'éviter une perte d'humidité, nous avons immédiatement placé les rondelles découpées sur le terrain dans des sacs hermétiques en plastique. Nous les avons ensuite entreposées au congélateur jusqu'au moment de prélever une « pointe de tarte » sur les échantillons pour prendre nos mesures.

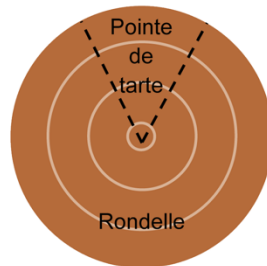
Nous avons aussi coupé une bille de 2,60 m de long dans toutes les tiges à l'étude, juste au-dessus de la rondelle récoltée à 1,30 m. Après avoir fait sécher l'ensemble de ces billes, nous avons peinturé les cernes de croissance se trouvant sur leur face transversale selon un code de couleur (figure 4). Enfin, nous les avons fait débiter à la scierie de Duchesnay suivant un patron optimisant la production de bois de dimension de 2 po × 4 po. Chaque bille de 2,60 m a donné de 2 à 4 planches.

Tige abattue et ébranchée vue de côté :

À noter : le défilement de l'arbre schématisé ici n'est pas représentatif du défilement réel des arbres à l'étude et les dimensions illustrées ici ne sont pas à l'échelle.



Rondelle coupée vue du dessus :



Bille coupée et peinte vue du dessus :

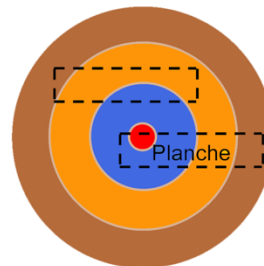


Figure 3. Schéma de tronçonnage. Les lignes noires en pointillé représentent les zones prélevées afin de déterminer certaines propriétés du bois.



Figure 4. Code de couleurs utilisé sur les billes longues de 2,60 m : rouge = cernes dont l'âge cambial varie de 1 à 5 ans; bleu = cernes dont l'âge cambial varie de 6 à 10 ans; jaune = cernes dont l'âge cambial varie de 11 à 15 ans; sans couleur (naturel) = cernes dont l'âge cambial est de 16 ans ou plus.

Tous les échantillons obtenus à la suite du tronçonnage ont servi à déterminer les propriétés du bois des MEH grâce aux méthodes présentées dans le tableau 1. Nous avons mesuré la densité basale, la teneur en humidité, la rigidité et la résistance à la rupture en flexion du bois. La densité basale du bois correspond au rapport entre sa masse anhydre et son volume saturé. Nous avons déterminé la teneur en humidité du bois sur une base anhydre (équation 2) :

$$TH = \frac{(M_{\text{humide}} - M_{\text{anhydre}})}{M_{\text{anhydre}}} \times 100 \quad [2]$$

où TH est la teneur en humidité (en %), M_{humide} est la masse humide du bois (en g) et $M_{anhydre}$ est la masse anhydre du bois (en g). La rigidité est caractérisée par le module d'élasticité, qui correspond au rapport de la contrainte à la déformation de la pièce de bois résultant d'une contrainte exercée en flexion, c'est-à-dire perpendiculairement à son axe longitudinal. Enfin, la résistance à la rupture en flexion est caractérisée par le module de rupture, qui correspond à la contrainte maximale exercée en flexion sur la pièce de bois à l'instant de la rupture.

Tableau 1. Méthodes destructives de détermination des propriétés du bois étudiées.

Propriété	Échantillon	Méthode
Densité basale (en $g \cdot cm^{-3}$)	« Pointe de tarte »	Immersion Norme ASTM* D2395
Teneur en humidité (en %)	« Pointe de tarte »	Étuve (base anhydre) Norme ASTM D4442-92
Rigidité : Module d'élasticité (en MPa)	Planche (2 po × 4 po)	Banc d'essai en flexion statique Norme ASTM D198-15
Résistance à la rupture : Module de rupture (en MPa)	Planche (2 po × 4 po)	Banc d'essai en flexion statique Norme ASTM D198-15

* ASTM: American Society for Testing and Materials.

2.4. Analyse des données

Nous avons étudié la variation de certaines propriétés du bois des MEH selon la hauteur dans la tige grâce à des régressions polynomiales qui appliquent des modèles linéaires mixtes sur les données de teneur en humidité et de densité basale obtenues aux hauteurs de 0,15, 1,30, 6,54, 11,78 m (et jusqu'à 17,02 m, pour les arbres assez grands). Pour ces analyses, nous avons utilisé la procédure MIXED du progiciel SAS, version 9.4 (SAS Institute Inc. 2018) et la méthode pas à pas par élimination (*backward*). Au départ, ces régressions prenaient en compte le facteur parcelle et celui de l'arbre niché dans le facteur parcelle comme effets aléatoires, ainsi que le facteur hauteur dans la tige comme effet fixe. Ce dernier effet a été décomposé en composantes polynomiales linéaire, quadratique et cubique, lorsque c'était approprié. Puisque les mesures étaient autocorrélées et inégalement espacées, nous avons utilisé une structure de covariance spatiale de forme puissance ($sp(pow)$). L'ampleur des effets aléatoires a été vérifiée selon le test approximatif de Wald (Wald 1943). Nous avons ensuite calculé les moyennes ajustées ($lsmeans$) et leur erreur type, puis effectué des comparaisons multiples *a posteriori* selon la méthode de Scheffé (Scheffé 1999) pour appuyer l'interprétation des graphiques. À noter qu'afin de réduire la multicolinéarité entre les différentes composantes, nous avons, au préalable, centré les valeurs de la hauteur dans la tige sur la

moyenne. Par la suite, nous avons appliqué l'opération inverse pour présenter les figures. Nous avons ajusté les degrés de liberté selon l'approximation de Kenward-Roger (Kenward et Roger 1997). La forme des composantes à effets fixes du modèle final était la suivante :

$$\text{Variable}_{\text{prédite}} = b_0 + b_1 \times (\text{Ht} - \overline{\text{Ht}}) + b_2 \times (\text{Ht} - \overline{\text{Ht}})^2 + b_3 \times (\text{Ht} - \overline{\text{Ht}})^3 \quad [3]$$

où b_0 est l'ordonnée à l'origine, b_j est le coefficient de régression associé au terme $(\text{Ht} - \overline{\text{Ht}})^j$ ($j = 1, 2$ ou 3) et $(\text{Ht} - \overline{\text{Ht}})$ est la hauteur de tige centrée sur la moyenne des hauteurs dans la tige. Dans la présente étude, la moyenne des hauteurs dans la tige est d'environ 5,61 m.

Par la suite, nous avons analysé la variation de certaines propriétés du bois selon l'âge cambial des MEH. Pour ce faire, nous avons effectué différentes analyses statistiques afin de mettre en relation le MOE et le MOR des planches avec l'âge du bois, représenté par les proportions de couleurs sur la face transversale des planches. Ainsi, nous avons testé des analyses en composantes principales et des régressions. Toutefois, dans le présent avis technique, nous ne présentons que des diagrammes ternaires, c'est-à-dire les représentations graphiques les plus pertinentes et qui apportent le plus de nouvelles informations. Comme ces diagrammes peuvent représenter les valeurs de MOE et de MOR selon seulement 3 couleurs, nous avons dû effectuer une segmentation (*clustering*) des données selon la méthode de Ward (Saporta 2006) afin de choisir les 2 couleurs qui pouvaient être regroupées en faisant perdre le minimum d'informations. Cet exercice a révélé que les propriétés associées aux couleurs « jaune » (cernes dont l'âge cambial varie de 11 à 15 ans) et « naturel » (cernes dont l'âge cambial est de 16 ans et plus) étaient les plus semblables et donc, celles à regrouper. Nous avons construit les diagrammes ternaires et segmenté les données à l'aide des logiciels compositions (Van den Boogaart *et al.* 2018), FactorMineR (Lê *et al.* 2008), fastcluster (Müllner 2013) et leaflet (Cheng *et al.* 2018) dans l'environnement R, version 1.2.1335 (RStudio Inc.) (R Core Team 2019).

Pour chacune des analyses, nous avons vérifié visuellement la normalité des données et l'homogénéité des variances à partir d'un histogramme de fréquences, d'une droite de Henry (ou QQ-plot) et d'un graphique des valeurs résiduelles en fonction des valeurs prédites du modèle. Nous avons exclu de l'étude un arbre qui montrait des valeurs aberrantes, tant dans les tests statistiques que dans le contexte de l'étude. Pour l'ensemble des analyses statistiques réalisées, nous avons adopté un seuil de signification de 0,05 ($\alpha = 0,05$).

3. Résultats et discussion

3.1. Propriétés dendrométriques et propriétés du bois

Les valeurs des propriétés dendrométriques et des propriétés du bois des MEH étudiés sont présentées dans le tableau 2.

Dans l'ensemble, les valeurs moyennes des propriétés du bois mesurées dans la présente étude sont légèrement supérieures à celles rapportées dans la littérature pour d'autres MEH plantés en Amérique du Nord. Pour des MEH âgés de 22 à 27 ans récoltés dans une plantation du Maine (États-Unis) après un élagage pratiqué à l'âge de 18–22 ans, Chui et MacKinnon-Peters (1995) ont déterminé des valeurs moyennes de 7 191 MPa pour le MOE, de 31 MPa pour le MOR et de 0,404 g·cm⁻³ pour la densité basale. De même, Einspahr *et al.* (1983) ont déterminé que des MEH récoltés dans une plantation du Wisconsin (États-Unis) et âgés de 23 ans avaient une densité basale moyenne de 0,413 g·cm⁻³.

Une certaine disparité semble exister entre les moyennes des propriétés du bois obtenues dans la présente étude et celles rapportées dans la littérature, malgré les différences attendues causées par la provenance, l'espacement initial, le climat, la qualité de station ainsi que les méthodes de détermination et le type des échantillons de bois analysés. Puisque l'élagage des MEH à un certain moment de leur vie peut aussi influencer sur la qualité de leur bois, il serait intéressant de comparer les propriétés du bois de MEH élagué avec celles de MEH non élagué issus d'une même plantation. Cette analyse pourrait être réalisée dans la plantation du secteur du Lac à la Truite, qui comporte à la fois des MEH non élagués (parmi lesquels les arbres de la présente étude ont été sélectionnés) et des MEH élagués en 2011.

La différence est faible entre les propriétés mécaniques du bois mesurées dans cette étude et celles obtenues dans d'autres études pour l'épinette blanche (*Picea glauca*) et l'épinette noire (*Picea mariana*) issues de plantations résineuses. À titre d'exemple, les valeurs moyennes de MOE et de MOR mesurées sur des épinettes blanches de 60 ans plantées à raison de 1 370 tiges·ha⁻¹ en Ontario étaient, respectivement, de 8 031 MPa et de 30,1 MPa (Duchesne 2011). Pour des épinettes noires de 48 ans plantées à raison de 2 066 tiges·ha⁻¹, les valeurs moyennes de MOE et de MOR étaient respectivement de 9 679 MPa et de 46,01 MPa (Zhang *et al.* 2002).

Tableau 2. Propriétés dendrométriques et propriétés du bois des 18 mélèzes hybrides à l'étude.

Numéro du MEH	Propriétés dendrométriques				Propriétés du bois			
	Diamètre à 1,30 m (en cm)	Hauteur totale (en m)	Volume total (en dm ³)	Volume marchand (en dm ³)	Densité basale à 1,30 m (en g·cm ⁻³)	Teneur en humidité à 1,30 m (en %)	Module d'élasticité moyen* (MOE, en MPa)	Module de rupture moyen* (MOR, en MPa)
P5-1	20,5	17,1	259,94	247,53	0,429	84,04	6 864 (± 30)	33,69 (± 6,82)
P5-2	17,2	15,6	179,18	164,21	0,440	76,11	6 995 (± 593)	34,87 (± 2,66)
P5-3	22,0	17,2	316,23	293,84	0,413	79,11	8 263 (± 962)	40,29 (± 3,22)
P9-1	18,8	16,8	224,0	214,55	0,408	83,85	8 259 (± 1464)	42,12 (± 1,46)
P9-2	21,5	17,3	290,33	280,43	0,404	88,06	5 873 (± 1462)	31,96 (± 5,52)
P9-3	24,2	19,1	412,00	400,34	0,492	67,46	9 180 (± 2 333)	40,37 (± 16,28)
P10-1	22,5	18,8	369,11	358,28	0,404	91,62	7 875 (± 1565)	35,53 (± 8,05)
P10-2	23,6	19,6	370,29	360,42	0,408	87,86	7 159 (± 1 217)	39,12 (± 8,67)
P10-3	18,9	16,5	230,59	218,75	0,432	79,76	7 096 (± 709)	35,70 (± 4,13)
P11-1	22,4	17,8	300,70	290,31	0,473	63,55	8 067 (± 1 326)	35,55 (± 10,92)
P11-2	20,7	19,0	268,24	252,74	0,462	78,20	7 308 (± 2063)	30,79 (± 9,25)
P11-3	18,1	18,9	223,99	209,20	0,467	78,07	8 599 (± 948)	40,89 (± 3,74)
P12-1	18,6	16,5	241,27	230,01	0,431	93,74	6 959 (± 2 143)	29,99 (± 7,15)
P12-2	21,3	17,6	301,19	291,54	0,444	79,10	8 803 (± 2 103)	39,07 (± 17,62)
P12-3	17,9	18,2	220,57	208,88	0,496	58,77	7 957 (± 1860)	38,63 (± 4,34)
P13-1†	25,4	19,9	438,00	427,83	0,399	73,49	4 785 (± 2 230)	19,77 (± 15,30)
P13-2	22,4	18,0	281,30	271,52	0,409	78,60	7 819 (± 1908)	36,25 (± 8,49)
P13-3	22,4	18,6	295,02	282,57	0,448	64,44	6 673 (± 738)	32,07 (± 2,32)
Moyenne	20,8	17,8	281,41	269,12	0,439	78,37	7 632	36,29
Minimum	17,2	15,6	179,18	164,21	0,404	58,77	5 873	29,99
Maximum	24,2	19,6	412,00	400,34	0,496	93,74	9 180	42,12
Écart type	2,1	1,1	61,47	61,94	0,030	9,95	864	3,76

* Les valeurs entre parenthèses correspondent à l'écart type.

† Notez que l'arbre P13-1 a été retiré du jeu de données parce qu'il montrait des valeurs de MOE et de MOR aberrantes tant dans les tests statistiques que dans le contexte de l'étude. Les valeurs moyennes, minimales, maximales et les écarts types présentés au bas du tableau ne tiennent pas compte des données de cet arbre.

Le Conseil canadien du bois a établi le MOE moyen pour le bois du groupe des sapins de Douglas (*Pseudotsuga menziesii*) et des mélèzes à 12 204 MPa pour le bois de charpente classé « de choix » et à 11 659 MPa pour celui de la classe n° 1, lorsqu'il est soumis à des contraintes en flexion statique (Barrett et Lau 1994). Les valeurs de MOE associées au 5^e percentile de la distribution de ces 2 classes sont de 8 894 MPa et de 8 239 MPa (Barrett et Lau 1994). Ainsi, s'ils étaient récoltés à 20 ans, les MEH de la plantation du secteur du Lac à la Truite n'atteindraient pas les valeurs moyennes de MOE attendues pour la production de bois de sciage de qualité, ni même celles associées au 5^e percentile de leur distribution. Les aménagistes de la région de Lanaudière auraient donc intérêt à ne pas récolter les MEH non élagués de la plantation avant encore quelques années. En effet, l'augmentation de la proportion de bois mature à l'intérieur de la tige des arbres associée au vieillissement devrait permettre l'amélioration des propriétés mécaniques du bois. Par conséquent, si les MEH de la plantation du secteur du Lac à la Truite continuent de croître, ils devraient produire un bois aux caractéristiques correspondant à celles des classes de sciage, ou du moins, s'en approchant. En attendant, le bois récolté lors d'éclaircies gagnerait à être utilisé en mettant à profit les autres caractéristiques naturelles des MEH, telles que la durabilité, la dureté et l'apparence. Ces usages pourraient inclure, par exemple, la production de bois de ferme et de bois d'apparence pour l'intérieur des maisons, comme les plafonds ou les revêtements extérieurs. Puisque le bois est encore jeune et donc, qu'il devrait contenir relativement peu de substances extractibles, la production de pâtes et papiers pourrait aussi être considérée. Toutefois, la coloration foncée du duramen pourrait compliquer cette production (Bergstedt et Lyck 2007).

La densité basale du bois des MEH étudiés (valeur moyenne : 0,439 g·cm⁻³; tableau 2) est plus élevée que celle d'autres essences résineuses en plantation (moyennes de 0,359 g·cm⁻³ pour l'épinette blanche [Duchesne 2011] et de 0,379 g·cm⁻³ pour l'épinette noire [Zhang *et al.* 2002]). Cela indique que le bois des MEH de la plantation du secteur du Lac à la Truite pourrait servir à la production de planchers, puisque la densité basale est, généralement, un bon indicateur de la dureté du bois. Toutefois, la densité basale du bois des MEH étudiés demeure faible par rapport à celle du bois des essences feuillues québécoises généralement utilisées dans la production de planchers (soit 0,62 g·cm⁻³ pour le bouleau jaune [*Betula alleghaniensis* Britton], 0,63 g·cm⁻³ pour l'érable à sucre [*Acer saccharum*], 0,62 g·cm⁻³ pour le chêne rouge [*Quercus rubra* L.], 0,67 g·cm⁻³ pour le chêne blanc [*Quercus alba*] et 0,60 g·cm⁻³ pour le frêne d'Amérique [*Fraxinus americana*]; Panshin et De Zeeuw 1980).

3.2. Variation longitudinale des propriétés du bois

Selon le test approximatif de Wald que nous avons réalisé, la relation entre la densité basale et la hauteur dans la tige ne semble pas être modifiée par le facteur parcelle ($s^2_{\text{parcelle}} = 0,000278 \pm 0,000283$, $Z = 0,98$ et $p_z = 0,1630$). Elle est cependant influencée par le facteur arbre niché dans le facteur parcelle, en raison

de l'autocorrélation présente entre les différentes mesures prises sur un même arbre ($r = 0,8556 \pm 0,0463$, $Z = 18,48$ et $p_z < 0,0001$).

La densité basale des MEH étudiés suit un modèle quadratique qui amène une diminution moyenne de $5,90 \times 10^{-3} \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3} \pm 8,57 \times 10^{-4}$ à chaque mètre de hauteur dans la tige (tableau 3). Cette diminution s'estompe graduellement jusqu'à une hauteur de 13,02 m (figure 5). À cette hauteur, la densité basale estimée est de $3,84 \times 10^{-1} \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$.

Tableau 3. Résultats de la régression quadratique en modèle mixte montrant la relation entre la densité basale du bois (en $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$) et la hauteur dans la tige (en m) des mélèzes hybrides étudiés.

Effet	Valeur estimée	Erreur type	Degrés de liberté*	Valeur du test F	Pr > F
Ordonnée à l'origine†	$4,06 \times 10^{-1}$	$9,53 \times 10^{-3}$			
Hauteur centrée‡					
<i>Effet linéaire</i>	$-5,90 \times 10^{-3}$	$8,57 \times 10^{-4}$	1; 55,4	37,87	< 0,0001
<i>Effet quadratique</i>	$3,98 \times 10^{-4}$	$1,32 \times 10^{-4}$	1; 62,8	9,02	0,0038

* Numérateur; dénominateur selon Kenward-Roger.

† Basée sur la moyenne des classes diamétrales.

‡ Hauteur centrée = Hauteur - 5,61.

N. B. La moyenne des hauteurs dans la tige correspond à 5,61 m.

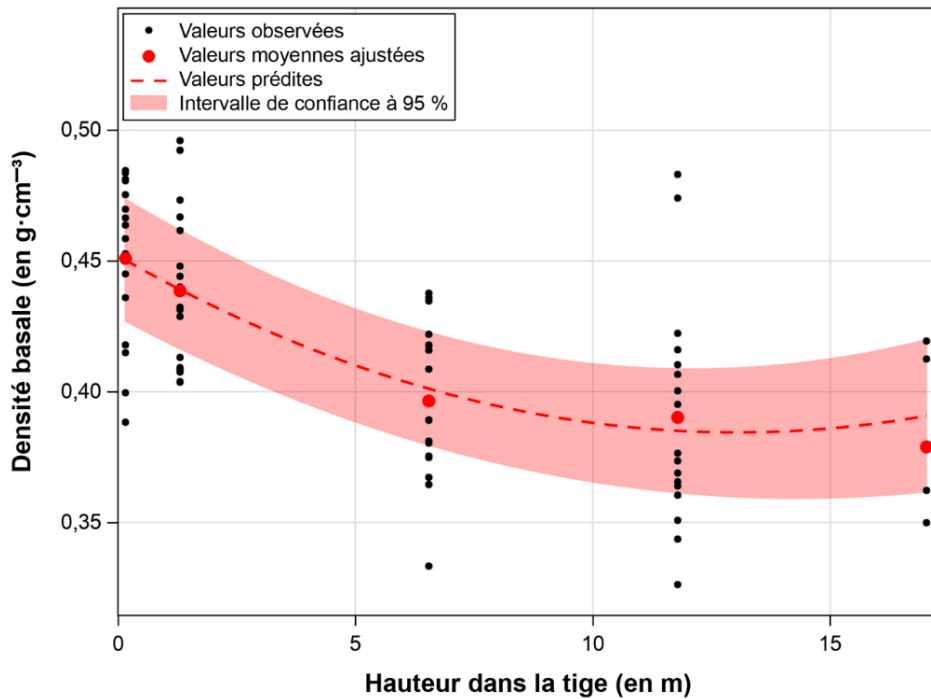


Figure 5. Relation entre la densité basale du bois (en $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$) et la hauteur dans la tige (en m) des mélèzes hybrides à l'étude.

La densité basale moyenne prédite dans le premier 1,15 m au-dessus de la souche (environ 0,445 g.cm⁻³) est significativement supérieure ($p \leq 0,0001$) aux valeurs prédites à 6,54 m (environ 0,401 g.cm⁻³), 11,78 m (environ 0,385 g.cm⁻³) et 17,02 m (environ 0,391 g.cm⁻³).

Tout comme pour la densité basale du bois, selon le test approximatif de Wald que nous avons réalisé, la relation entre la teneur en humidité du bois et la hauteur dans la tige ne semble pas être modifiée par le facteur parcelle ($S^2_{\text{parcelle}} = 43,5355 \pm 61,7143$, $Z = 0,71$ et $p(Z) = 0,2403$). Elle est, cependant, influencée par le facteur arbre niché dans le facteur parcelle, en raison de l'autocorrélation présente entre les différentes mesures prises sur un même arbre ($r = 0,8601 \pm 0,0469$, $Z = 18,35$ et $p(Z) < 0,0001$).

La relation entre la teneur en humidité et la hauteur dans la tige des MEH étudiés est de forme cubique. La teneur en humidité du bois des arbres-échantillons augmente en moyenne de 6,06 % $\pm 6,83 \times 10^{-1}$ % à chaque mètre de hauteur dans la tige (tableau 4). Cette augmentation s'accroît jusqu'à atteindre une valeur estimée de 123,29 % au point d'inflexion (9,30 m). Au-delà de cette hauteur, la teneur en humidité se stabilise graduellement (figure 6).

Tableau 4. Résultats de la régression cubique en modèle mixte montrant la relation entre la teneur en humidité du bois (en %) et la hauteur dans la tige (en m) des mélèzes hybrides étudiés.

Effet	Valeur estimée	Erreur type	Degrés de liberté*	Valeur du test F	Pr > F
Ordonnée à l'origine [†]	97,14	4,81			
Hauteur centrée [‡]					
<i>Effet linéaire</i>	6,06	$6,83 \times 10^{-1}$	1; 55,5	145,92	< 0,0001
<i>Effet quadratique</i>	$4,18 \times 10^{-1}$	$1,09 \times 10^{-1}$	1; 63,8	2,37	0,1285
<i>Effet cubique</i>	$-3,77 \times 10^{-2}$	$1,25 \times 10^{-2}$	1; 48,7	9,06	0,0041

* Numérateur; dénominateur selon Kenward-Roger.

[†] Basée sur la moyenne des classes diamétrales.

[‡] Hauteur centrée = Hauteur - 5,61.

N. B. La moyenne des hauteurs dans la tige correspond à 5,61 m.

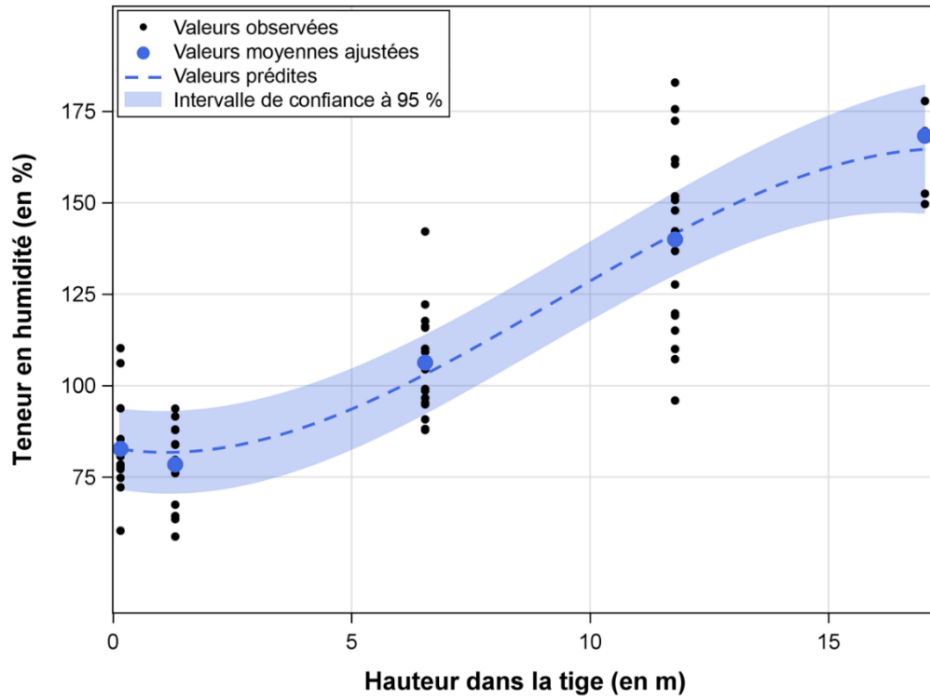


Figure 6. Relation entre la teneur en humidité du bois (en %) et la hauteur dans la tige (en m) des mélèzes hybrides à l'étude.

La teneur en humidité moyenne prédite dans le premier 1,15 m au-dessus de la souche (environ 80,23 %) est significativement inférieure ($p < 0,0001$) aux valeurs prédites à 6,54 m (environ 103,09 %), 11,78 m (environ 141,55 %) et 17,02 m (environ 164,61 %).

La hauteur dans la tige influence les propriétés du bois des MEH étudiés : plus le bois se trouve haut dans la tige, moins il est dense et plus il est humide. Ces observations correspondent à celles rapportées dans la littérature. En effet, la teneur en humidité des résineux est plus élevée dans l'aubier que dans le duramen (Peck 1953; Bendtsen 1978; Glass et Zelinka 2010; Pallardy 2008). De plus, la cime des arbres est essentiellement composée d'aubier, et donc, elle ne contient pas (ou très peu) de duramen. Le processus de duraminisation est un phénomène physiologique associé au vieillissement des arbres qui varie en fonction des espèces. Plusieurs facteurs peuvent influencer le développement du duramen, entre autres, la dimension de la cime, la vitesse de croissance, la proportion d'aubier utilisable ou encore la génétique (Taylor *et al.* 2002). Chez les mélèzes, le duramen peut être observé dès l'âge de 5 ans (Hirai 1952 dans Pâques 2001). Chez des MEH de 15 ans, Pâques (2001) a même observé que le duramen occupait déjà 60 % du bois formé le long d'un rayon mesuré à hauteur de poitrine. Cela expliquerait donc pourquoi, bien que les arbres étudiés ici soient jeunes, le bois proche de leur souche est moins humide que celui situé plus haut dans leur cime. La densité basale, quant à elle, est plus forte dans le bois mature que dans le bois juvénile chez les résineux (Bendtsen 1978; Thomas 1984; Kretschmann 1998; Gryc *et al.* 2011). L'observation d'une densité basale plus faible dans la cime des arbres, essentiellement composée de bois juvénile, est cohérente avec ce principe.

Puisque les propriétés du bois des MEH varient selon la hauteur dans la tige, il serait intéressant de définir des usages distincts pour le bois plus dense et moins humide provenant de la partie inférieure de l'arbre, d'une part, et pour celui moins dense et plus humide provenant de la partie supérieure de l'arbre, d'autre part. En foresterie, il est assez courant de réserver à différents usages finaux le bois de bonne qualité se trouvant proche de la souche et celui de moins bonne qualité se trouvant dans la cime (Barrette *et al.* 2017).

De plus, l'une des principales difficultés rencontrées lorsqu'on transforme le bois du mélèze hybride est le séchage. En effet, le bois de mélèze a la réputation d'être plus difficile à sécher que celui des autres résineux. C'est pourquoi on recommande habituellement de le sécher lentement afin de réduire les risques de déformation et de gerces du bois (Koubaa et Zhang 2009) et aussi, d'ajuster les patrons de débitage et les pratiques d'empilage et de lattage afin de minimiser le gauchissement. Considérant la grande différence que nous avons observée entre la teneur en humidité du bois de cime et celle du bois de souche, il serait peut-être utile de séparer les billes de bois sur la base de leur teneur en humidité avant de les faire sécher. Ceci pourrait contribuer à réduire les variations d'humidité dans le séchoir à bois.

3.3. Variation radiale des propriétés du bois

Le MOE et le MOR du bois augmentent légèrement lorsque les proportions de bleu et de jaune/naturel augmentent dans les sciages (figure 7). Ces tendances semblent montrer que lorsque le bois vieillit, sa rigidité et sa résistance à la rupture en flexion s'améliorent. À noter cependant qu'aucune tendance n'est observable lorsque la proportion de rouge varie. Cela peut s'expliquer par le fait qu'un certain nombre de planches avaient 0 % de rouge.

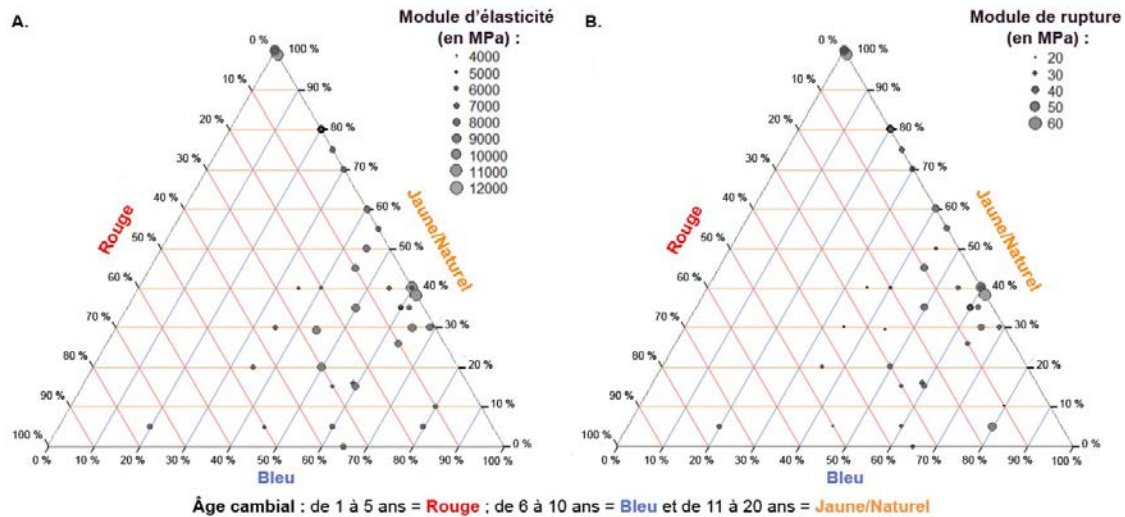


Figure 7. Diagrammes ternaires montrant les relations entre certaines propriétés du bois et l'âge cambial représenté par la proportion de couleurs (en % — voir ci-dessus) sur les planches des mélèzes hybrides étudiés. A. Relation entre le module d'élasticité (MOE, en MPa) et la proportion de couleurs sur les planches. B. Relation entre le module de rupture (MOR, en MPa) et la proportion de couleurs sur les planches. Pour connaître la composition en couleurs d'une planche ayant un MOE ou un MOR donné, il suffit de suivre les lignes de chaque couleur en partant du point représentant la propriété du bois. De plus, la taille du symbole indique la valeur approximative du MOE (A) ou du MOR (B). Par exemple, pour le point le plus en bas à gauche, la planche est composée de 75 % de rouge, 20 % de bleu et 5 % de jaune/naturel, et présente un MOE d'environ 8 000 MPa et un MOR d'environ 30 MPa.

Comme la hauteur dans la tige, l'âge cambial semble influencer les propriétés du bois des MEH. En effet, plus le bois est jeune, moins il est rigide et résistant à la rupture en flexion et plus il est vieux, plus il est rigide et résistant à la rupture. Ces observations concordent avec celles rapportées dans la littérature et s'expliquent par des différences de morphologie entre le bois de transition et le bois juvénile. Par rapport au bois plus vieux, le bois juvénile est caractérisé par une plus faible densité, des fibres plus courtes, un angle des microfibrilles plus prononcé par rapport à l'axe longitudinal et des parois cellulaires plus minces (Panshin et De Zeeuw 1980, Jozsa et Middleton 1994, Alteyrac 2005, Pâques et Rozenberg 2009). Ces différences contribuent à en diminuer les propriétés mécaniques.

Puisque les propriétés du bois juvénile des MEH semblent être inférieures à celles de leur bois de transition, le bois situé près de la moelle gagnerait à servir à d'autres fins que des usages en structure. En effet, lorsque l'âge cambial était compris entre 0 et 5 ans, le bois des MEH était le moins rigide et le moins résistant. Comme ces arbres poussent très rapidement, l'espace occupé par les premiers anneaux de croissance peut être relativement grand. Gardiner et Moore (2014) ont suggéré d'utiliser la portion centrale des arbres provenant de plantations à croissance rapide comme composante pour l'intérieur de bois stratifiés ou comme complément à la fabrication de matériaux innovants tels que les biociments, les bioplastiques et le bois d'ingénierie.

4. Conclusion et recommandations

Le bois des MEH de la plantation du secteur du Lac à la Truite n'a pas encore atteint les propriétés attendues pour être utilisé comme bois de construction. Cependant, ces arbres sont encore jeunes et semblent prometteurs. Ainsi, les aménagistes de la région de Lanaudière ont tout intérêt à ne pas récolter les MEH non élagués de cette plantation avant encore quelques années, afin de permettre à la proportion de bois mature d'augmenter à l'intérieur de la tige. Le bois serait alors plus rigide et plus dense. Si jamais une éclaircie était envisagée dans la plantation avant que le bois des arbres atteigne les propriétés attendues, d'autres usages devraient être privilégiés afin de tirer profit des caractéristiques naturelles du bois juvénile (par exemple, la production de bois d'apparence ou de pâtes et papiers).

Pour conclure, lorsqu'il est bien usiné et séché, le bois de MEH devrait pouvoir trouver sa place sur de nouveaux marchés prometteurs. Les Européens l'utilisent d'ailleurs depuis plusieurs années dans de multiples applications, y compris la construction de maisons (Riou-Nivert 2001). Dans l'avenir, un travail en collaboration avec les ingénieurs du bois pourrait mener au développement de techniques de mise en œuvre (sciage, lattage, séchage) permettant d'augmenter la stabilité dimensionnelle des produits finis. L'acquisition continue de nouvelles connaissances devrait aider à mettre en confiance les principaux utilisateurs de MEH. L'évaluation d'autres propriétés du bois des MEH contribuerait aussi à en tirer d'autres usages.

Remerciements

Nous tenons à remercier vivement Lise Charette pour son aide avec les analyses statistiques, de même que Jean Noël pour la création de la figure 1 à partir des données des cartes écoforestières. Nous souhaitons également remercier Réjean Poliquin, Hervé Lortie, Guy Chantal, Alexandre Dumas et Carol Parent pour la récolte des données. Enfin, nous voulons remercier Denise Tousignant, Alexandre Dallaire-Théroux et Lyne Giasson pour l'édition et la mise en page du présent document.

Références bibliographiques

Alteyrac, J., 2005. *Influence de la densité de peuplement et de la hauteur dans l'arbre sur les propriétés physico-mécaniques du bois d'épinette noire (Picea mariana (Mill.) B.S.P.)*. Thèse de doctorat, Faculté de foresterie et de géométrie, Université Laval. Québec, Canada. 136 p.

<https://corpus.ulaval.ca/jspui/bitstream/20.500.11794/18069/1/22792.pdf>

ASTM D198-15, 2015. *Standard test methods of static tests of lumber in structural sizes*. ASTM International. West Conshohocken, PA (États-Unis). 28 p. <https://doi.org/10.1520/D0198-15>

- ASTM D2395-02, 2002. *Standard test methods for specific gravity of wood and wood based materials*. ASTM International. West Conshohocken, PA (États-Unis). 8 p. <https://doi.org/10.1520/D2395-02>
- ASTM D4442-20, 2020. *Standard test methods for direct moisture content measurements of wood and wood-base materials*. ASTM International. West Conshohocken, PA (États-Unis). 5 p.
- Barrett, J.D. et W. Lau, 1994. *Canadian Lumber Properties*. Canadian Wood Council. Ottawa, ON. 345 p.
- Barrette, J., E. Thiffault, A. Achim, M. Junginger, D. Pothier et L. De Grandpré, 2017. *A financial analysis of the potential of dead trees from the boreal forest of eastern Canada to serve as feedstock for wood pellet export*. Appl. Energy 198: 410-425. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.03.013>
- Bendtsen, B., 1978. *Properties of wood from improved and intensively managed trees*. For. Prod. J. 28(10): 69-72.
- Bergstedt, A. et C. Lyck, 2007. *Larch wood—a literature review*. Forest & Landscape Denmark (University of Copenhagen). Hørsholm Kongevej (Danemark). 108 p.
- Carswell, C.L. et E.K. Morgenstern, 1995. « Phenology and growth of nine larch species and hybrids tested in New Brunswick, Canada ». Dans : Schmidt, W.C. et K.J. McDonald (édit.), *Ecology and management of Larix forests: A look ahead: proceedings of an international symposium*. U.S.D.A., For. Serv., Int. Res. Stn. Whitefish, MT (États-Unis) p. 318-322.
<https://doi.org/10.5962/bhl.title.109332>
- Cheng, J., B. Karambelkar et Y. Xie, 2018. leaflet: *Create interactive web maps with the Javascript 'leaflet' library*. R package version 2.0.2.
- Chui, Y. et G. MacKinnon-Peters, 1995. *Wood properties of exotic larch grown in eastern Canada and north-eastern United States*. For. Chron. 71(5) : 639-646. <https://doi.org/10.5558/tfc71639-5>
- Duchesne, I., 2011. *Effets de l'espacement initial en plantation sur la qualité du bois : cas de l'épinette blanche*. Conférence présentée au Centre de Foresterie des Laurentides. 27 octobre 2011. Québec, QC. 33 p.
http://partenariat.qc.ca/videoconferences/presentation_iduchesne_27%20octobre%202011.pdf
- Einspahr, D., T. McDonough et T. Joachimides, 1983. *Kraft pulping characteristics of European, Japanese, and European x Japanese larch hybrids*. TAPPI J. 66(8): 72-76.
- Gardiner, B. et J. Moore, 2014. « Creating the wood supply of the future ». Dans : Fenning, T. (édit.), *Challenges and opportunities for the world's forests in the 21st century*. Springer Science & Business Media. Édimbourg, Écosse (Royaume-Uni) p. 677-704.

- Glass, S. et S. Zelinka, 2010. « Moisture relations and physical properties of wood ». Dans : *Wood handbook: Wood as an engineering material*. U.S.D.A, Forest Service, Forest Products Laboratory. Madison, WI (États-Unis). General Technical Report FPL-GTR-190 p. 4.1-4.19.
<https://www.fs.usda.gov/treearch/pubs/37428>
- Google, 2017. *Google Earth version 7.1.5.1557, 2017* — Saint-Michel-des-Saints, Québec, Canada.
<https://earth.google.com/web/>
- Gosselin, J., 2014. *Guide de reconnaissance des types écologiques de la région écologique 3c — Hautes collines du Bas-Saint-Maurice, 2^e édition*. Gouvernement du Québec, Ministère des Ressources naturelles, Direction des inventaires forestiers, Division de la classification écologique et productivité des stations. 196 p.
<https://mffp.gouv.qc.ca/publications/forets/connaissances/guide-ecologique-3c.pdf>
- Gryc, V., H. Vavrcik et K. Horn, 2011. *Density of juvenile and mature wood of selected coniferous species*. J. For. Sci. 57(3): 123-130. <https://doi.org/10.17221/18/2010-JFS>
- Henry, A. et M.G. Flood, 1919. *The history of the Dunkled larch, Larix eurolepis, with notes on other hybrids*. Proc. R. Ir. Acad., Sect. B, 35: 55-66. <https://www.jstor.org/stable/20517054>
- Holst, M.J., 1974. *Performance of Japanese larch and the Dunkeld hybrid larch at the Petawawa Forest Experiment Station*. For. Chron. 50(3): 109-110.
<https://pubs.cif-ifc.org/doi/pdf/10.5558/tfc50109-3>
- [ISSG] Invasive Species Specialist Group, 2020. *Global Invasive Species Database*. Base de données. Consulté le 14 janvier 2020. <http://www.iucngisd.org/gisd/search.php>
- Jacques, D., M. Marchal et Y. Curnel, 2004. *Relative efficiency of alternative methods to evaluate wood stiffness in the frame of hybrid larch (Larix x eurolepis Henry) clonal selection*. Ann. For. Sci. 61(1): 35-43. <https://doi.org/10.1051/forest:2003082>
- Jozsa, L.A. et G.R. Middleton, 1994. *A discussion of wood quality attributes and their practical implications*. Canada–British Columbia partnership agreement on forest resource development: FRDA II. Forintek Canada Corporation. Vancouver, C.-B. Special Publication No. SP-34. 42 p.
- Kenward, M.G. et J.H. Roger, 1997. *Small sample interference for fixed effects from restricted maximum likelihood*. Biometrics 53(3): 983-997.

- Koubaa, A. et S.Y. Zhang, 2009. « Mélèzes exotiques : *Larix decidua* Mill. et *Larix kaempferi* (Lamb.) Carrière ». Dans : Zhang, S.Y. et A. Koubaa (édit.), *Les résineux de l'est du Canada : écologie forestière, caractéristiques, transformation et usages*. FPInnovations. Québec, QC. p. 232-255.
<https://library.fpinnovations.ca/fr/permalink/fpipub39152>
- Kretschmann, D., 1998. *Properties of juvenile wood*. U.S.D.A., Forest Service, Forest Products Laboratory. Madison, WI (États-Unis). Techline VI-7 (09/98). 1 p.
<https://www.fpl.fs.fed.us/documnts/techline/properties-of-juvenile-wood.pdf>
- Larsson-Stern, M., 2003. *Aspects of hybrid larch (Larix x eurolepis henry) as a potential tree species in southern Swedish forestry*. Thèse de maîtrise. Université suédoise des sciences agricoles. Uppsala, Suède. 28 p. <https://pub.epsilon.slu.se/441/1/LicLarsson-Stern.pdf>
- Lê, S., J. Josse et F. Husson, 2008. FactomineR: *An R package for multivariate analysis*. J. Stat. Softw. 25(1) : 1-18. <https://doi.org/10.18637/jss.v025.i01>
- [MELCC] Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques, 2020. *Sommaire des normales climatiques du Québec 1981-2010*. Consulté le 9 mars 2020.
<http://www.environnement.gouv.qc.ca/climat/normales/sommaire.asp?cle=7077570>
- [MFFP] Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs, 2016. *Placettes-échantillons temporaires : normes techniques*. Gouvernement du Québec, ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs, Direction des inventaires forestiers. Norme d'inventaire écoforestier. 172 p.
<https://mffp.gouv.qc.ca/publications/forets/connaissances/Norme-PET.pdf>
- [MFFP] Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs, 2018. *Carte écoforestière du 5^e inventaire écoforestier du Québec méridional — Méthodes et données associées*. Gouvernement du Québec, Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs, Direction des inventaires forestiers. 128 p. https://mffp.gouv.qc.ca/forets/inventaire/pdf/carto_5E_methodes_donnees.pdf
- Müllner, D., 2013. Fastcluster: *Fast hierarchical, agglomerative clustering routines for R and Python*. J. Stat. Softw. 53(9): 1-18. <https://doi.org/10.18637/jss.v053.i09>
- [OIFQ] Ordre des ingénieurs forestiers du Québec, 1997. *Manuel de foresterie*. Éditions MultiMondes. Québec, QC. 1 576 p.
- Pallardy, S., 2008. *Physiology of woody plants (3rd edition)*. Academic Press. Cambridge, MA (États-Unis) 464 p.

- Panshin, A.J. et C. De Zeeuw, 1980. *Textbook of wood technology: Structure, identification, properties, and uses of the commercial woods of the United States and Canada (4th edition)*. McGraw-Hill Book Company. New York, NY (États-Unis). 722 p.
- Pâques, L.E., 2001. *Genetic control of heartwood content in larch*. *Silvae Genet.* 50(2): 69-75.
- Pâques, L.E. et Rozenberg P., 2009. *Ranking larch genotypes with the Rigidimeter: relationships between modulus of elasticity of standing trees and of sawn timber*. *Ann. For. Sci.* 66(4): 1-7.
<https://doi.org/10.1051/forest/2009011>
- Pâques, L.E., F. Millier et P. Rozenberg, 2010. *Selection perspectives for genetic improvement of wood stiffness in hybrid larch (Larix x eurolepis Henry)*. *Tree Genet. Genomes* 6: 83-92.
<https://doi.org/10.1007/s11295-009-0230-0>
- Peck, E., 1953. *The sap or moisture content in wood*. U.S.D.A., Forest Service, Forest Products Laboratory. Madison, WI (États-Unis). 15 p. <https://www.fpl.fs.fed.us/documnts/fplr/fplr0768.pdf>
- Perron, J.-Y., 2003. *Tarif de cubage général : volume marchand brut*. Gouvernement du Québec, Ministère des Ressources naturelles, de la Faune et des Parcs, Direction des Inventaires Forestiers. 53 p.
<https://mffp.gouv.qc.ca/forets/inventaire/pdf/tarif-de-cubage-64.pdf>
- Perron, M., 2011. *Le mélèze hybride du Québec : performant et racé*. Gouvernement du Québec, Ministère des Ressources naturelles et de la Faune, Direction de la recherche forestière. Avis de recherche forestière n° 37. 2 p.
<https://mffp.gouv.qc.ca/publications/forets/connaissances/recherche/Perron-Martin/Avis37.pdf>
- Piepho, H.-P. et R. Edmondson, 2018. *A tutorial on the statistical analysis of factorial experiments with qualitative and quantitative treatment factor levels*. *J. Agron. Crop. Sci.* 204(5): 429-455.
<https://doi.org/10.1111/jac.12267>
- R Core Team, 2019. *R : A language and environment for statistical computing*. R Foundation for Statistical Computing. Système d'analyse statistique. <https://www.r-project.org/>
- Riou-Nivert, P., 2001. *Le mélèze — Institut pour le développement forestier*. Éditions Forêt privée française, Paris (France). 144 p.
- Saporta, G., 2006. *Probabilités, analyse des données et statistique*. Éditions TECHNIP, Paris (France). 622 p.
- SAS Institute Inc., 2018. *SAS/STAT® 15.1 User's Guide*. SAS Institute Inc. Cary, NC (États-Unis).

- Scheffé, H., 1999 (réédition). *The analysis of variance*. Wiley Classics Library Edition, John Wiley & Sons, New York, NY (États-Unis). 477 p.
- Taylor, A.M., B.L. Gartner et J.J. Morrell, 2002. *Heartwood formation and natural durability—a review*. Wood Fiber Sci. 34(4): 587-611.
- Thiffault, N., V. Roy, G. Prigent, G. Cyr, R. Jobidon et J. Ménétrier, 2003. *La sylviculture des plantations résineuses au Québec*. Nat. Can. 127(1): 63-80.
- Thomas, R., 1984. *The characteristics of juvenile wood. Symposium on utilization of the changing wood resources in the southern United States*. North Carolina State University, Raleigh, NC (États-Unis). p. 40-52.
- Van den Boogaart, K., R. Tolosana-Delgado et M. Bren, 2018. compositions: *Compositional data analysis. R package version 1.40-2*.
- Wald, A., 1943. *Tests of statistical hypotheses concerning several parameters when the number of observations is large*. Trans. Am. Math. Soc. 54(3): 426-482. <https://doi.org/10.2307/1990256>.
- Zhang, S.Y., G. Chauret, H.Q. Ren et R. Desjardins, 2002. *Impact of initial spacing on plantation black spruce lumber grade yield, bending properties, and msr yield*. Wood Fiber Sci. 34(3): 460-475.

Léna Levoy, étudiante à la maîtrise, B. Sc.

Julie Barrette, ing.f., Ph. D.

Jasmin Ricard, étudiant au baccalauréat

Martin Perron, biologiste, Ph.D.

Guillaume Giroud, ing.f., Ph. D.

Charles Ward, ing.f., M. Sc.

Service de la sylviculture et du rendement des forêts