

<b>Titre :</b>	Synthèse des connaissances sur la densité initiale de reboisement
<b>Auteur(s) :</b>	Julie Barrette, ing.f., Ph. D., Guillaume Giroud, ing.f., Ph. D., Charles Ward, ing.f., M. Sc., Luca Serban ing.f., Ph. D., Martin Barrette, ing.f., Ph. D.
<b>Date :</b>	Janvier 2020

**Réduire la densité initiale de reboisement peut sembler un bon moyen de réduire l'ensemble des coûts d'une plantation. Cette tendance est de plus en plus observée dans le milieu forestier québécois. Toutefois, certaines incertitudes demeurent quant à la densité à privilégier lors du reboisement. La Direction de la recherche forestière s'est penchée sur le sujet. Cette synthèse expose l'état des connaissances actuelles sur la densité initiale de reboisement pour les quatre principales essences résineuses plantées au Québec.**

## 1. Contexte

Si l'on inclut le coût des plants, la mise en terre représente la dépense la plus importante d'une plantation (BMMB 2019, Serban en préparation). Une réduction de la densité initiale de reboisement, c'est-à-dire du nombre de plants à l'hectare, permettrait de réduire significativement l'ensemble des coûts. Toutefois, la densité à privilégier lors du reboisement demeure incertaine pour optimiser à la fois le rendement en volume à l'hectare et la qualité du bois. Cet enjeu de connaissance est encore plus important dans le contexte actuel, où les décisions d'aménagement doivent intégrer de nombreux autres aspects comme la rentabilité financière, la période de révolution, le potentiel de séquestration du carbone et les risques que posent pour les plantations les changements climatiques et les perturbations naturelles.

Dans le but de soutenir le travail des aménagistes forestiers, nous proposons cette revue de littérature qui documente les effets de la densité initiale de reboisement dans des plantations d'épinettes noires (*Picea mariana* (Mill.) B.S.P.), d'épinettes blanches (*Picea glauca* (Moench) Voss), d'épinettes de Norvège (*Picea abies* (L.) Karst.) et de pins gris (*Pinus banksiana* Lamb.). Plus spécifiquement, nous avons examiné les effets de la densité initiale de reboisement sur :

- les **caractéristiques dendrométriques**,
- la **qualité du bois**,
- la **rentabilité financière**,
- et le **potentiel de séquestration du carbone** par la biomasse forestière.

---

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

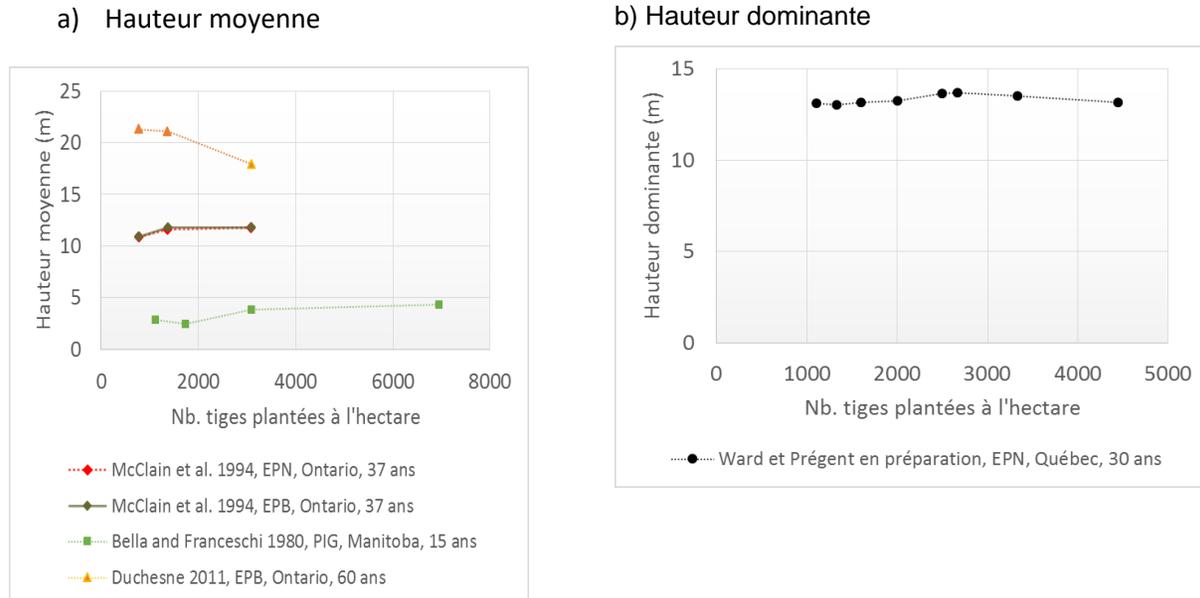
En conclusion, nous proposons un tableau synthèse des principaux avantages et inconvénients associés à une réduction de la densité initiale de reboisement pour les quatre principales essences résineuses plantées au Québec.

## **2. Les caractéristiques dendrométriques**

### *2.1. La densité initiale de reboisement a peu d'effets sur la hauteur des arbres*

Il est difficile d'évaluer si la hauteur moyenne des arbres tend à augmenter ou à diminuer lorsque le nombre de tiges plantées à l'hectare diminue. Selon plusieurs études européennes, principalement menées sur l'épinette de Norvège, la hauteur moyenne augmenterait lorsqu'on réduit le nombre de tiges plantées à l'hectare (Bartoli et Decourt 1971, Sjolte-Jorgensen 1967). Les résultats obtenus en Ontario, dans une plantation d'épinettes blanches de 60 ans, suivent la même tendance (Duchesne 2011). Toutefois, d'autres études réalisées au Canada avec diverses essences résineuses ont donné des résultats contraires (Bella et Franceschi 1980, McClain *et al.* 1994). La figure 1a montre les variations observées dans ces différentes études de la hauteur moyenne en fonction du nombre de tiges à l'hectare.

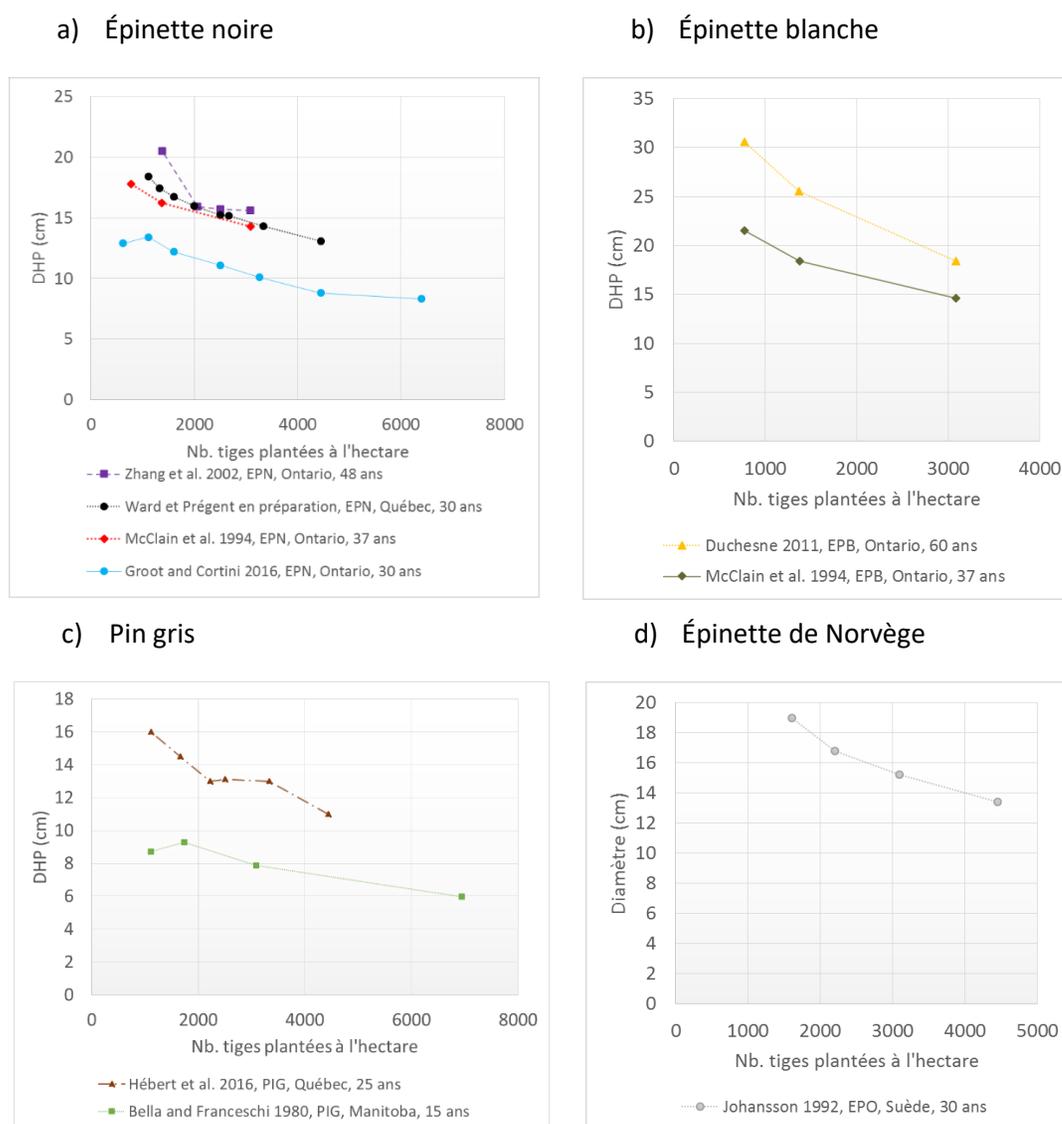
En ce qui concerne la hauteur dominante, les études réalisées tant en Europe qu'en Amérique du Nord concluent assez unanimement que l'espacement initial a très peu d'effet (voire aucun) sur cette mesure (Bartoli et Decourt 1971, Ward et Prégent en préparation). La figure 1b illustre la variation de la hauteur dominante en fonction de l'espacement initial d'une plantation d'épinettes noires de 30 ans au Québec (Ward et Prégent en préparation). Comme on peut le constater, la hauteur dominante dans une plantation est sensiblement la même, que ce soit avec une densité initiale de 4 444 tiges·ha<sup>-1</sup> (13,2 m) ou de 1 111 tiges·ha<sup>-1</sup> (13,1 m).



**Figure 1.** Variation a) de la hauteur moyenne (m) et b) de la hauteur dominante (m) pour l'épinette noire (EPN), l'épinette blanche (EPB) et le pin gris (PIG), en fonction du nombre de tiges plantées à l'hectare, d'après plusieurs études publiées ou en préparation.

## 2.2. Le diamètre augmente lorsqu'on réduit la densité initiale de reboisement

Jusqu'à présent, toutes les études démontrent que l'espacement initial et le diamètre des arbres sont fortement et positivement corrélés (Duchesne 2011, Groot et Cortini 2016, Hébert *et al.* 2016, Johansson 1992, McClain *et al.* 1994, Pfister *et al.* 2007, Zhang *et al.* 2005a, Ward et Prigent en préparation). Quelle que soit l'espèce, le gain en diamètre est important lorsqu'on diminue le nombre de tiges mises en terre à l'hectare (figure 2). Par exemple, après 60 ans, le diamètre moyen à hauteur de poitrine (DHP) des tiges d'épinettes blanches mises en terre à une densité de 771 tiges·ha<sup>-1</sup> était 1,6 fois plus grand que celui des tiges plantées à une densité de 3 086 tiges·ha<sup>-1</sup> (Duchesne 2011). De plus, à faible densité de reboisement, le nombre de déclassements causés par la flache diminue étant donné l'augmentation en diamètre des tiges (Zhang *et al.* 2002). Ce défaut, occasionné lors du sciage, est caractérisé par un manque du bois en bordure des pièces. Toutes ces observations sont importantes à considérer, surtout si l'on cherche à réduire le temps de révolution pour produire de gros sciages, généralement plus rentables (Barrette *et al.* 2017, Duchesne 2011). Pour augmenter les chances de faire du profit à l'usine de sciage, il serait préférable de cibler la production de plus grosses tiges, avec un DHP d'au moins 20 cm lors de la récolte (Auty *et al.* 2014, Barrette *et al.* 2012). Avec un DHP plus petit, le nombre et la dimension des sciages produits couvriront plus difficilement les frais d'exploitation et de transformation du bois. D'après Sjolte-Jorgensen (1967), l'effet de l'espacement sur le diamètre des tiges se jouerait dans les 20 à 30 premières années de croissance. Après cette période, les différences demeureraient constantes. C'est d'ailleurs ce qui a été observé (figure 2b) avec des épinettes blanches mises en terre et suivies sur plusieurs années dans un dispositif de recherche à Thunder Bay, en Ontario (Duchesne 2011, McClain *et al.* 1994).

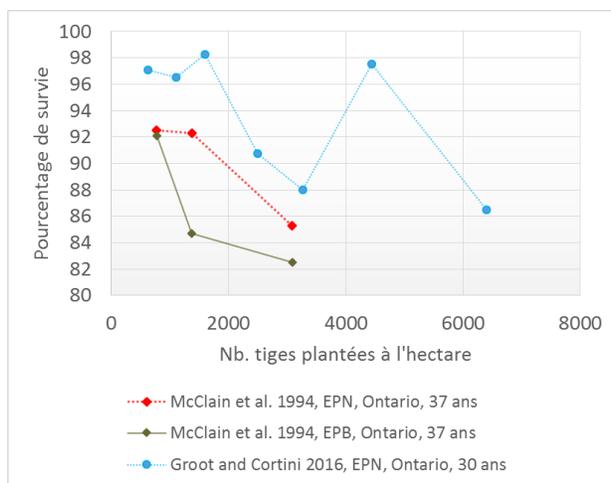


**Figure 2.** Variation du DHP (cm) en fonction du nombre de tiges plantées à l'hectare pour a) l'épinette noire (EPN), b) l'épinette blanche (EPB), c) le pin gris (PIG) et d) l'épinette de Norvège (EPO), d'après plusieurs études publiées.

### 2.3 Le nombre de petites tiges et la mortalité diminuent lorsqu'on réduit la densité initiale de reboisement

L'effet de l'espacement initial sur la distribution diamétrale des tiges a été étudié pour plusieurs des essences résineuses actuellement plantées au Québec (Johansson 1992, Kang *et al.* 2004, McClain *et al.* 1994). Dans l'ensemble, les résultats sont unanimes : pour une même période, les plantations à espacements serrés génèrent un plus grand nombre de petites tiges, alors que celles à espacements larges génèrent un plus grand nombre de grosses tiges. Le temps nécessaire pour atteindre un diamètre marchand est donc plus long lorsque la densité de plantation est forte.

Par ailleurs, le taux de mortalité est généralement plus élevé dans les plantations denses (figure 3), même si les taux de survie ou de mortalité rapportés dans la littérature peuvent être influencés par plusieurs autres facteurs et événements imprévisibles qui surviennent au cours de la vie d'une plantation (Johansson 1992, Kang *et al.* 2004, McClain *et al.* 1994). Il est à noter que dans les deux études présentées à la figure 3, la mortalité indiquée ne comprend pas les arbres morts qui ont été remplacés au cours des premières années.



**Figure 3.** Pourcentage de survie des épinettes noires (EPN) et des épinettes blanches (EPB) en fonction du nombre de tiges plantées à l'hectare, d'après deux études publiées.

#### 2.4 En bas âge, le volume à l'hectare diminue lorsqu'on réduit la densité initiale de reboisement, mais à maturité, les différences tendent à s'estomper.

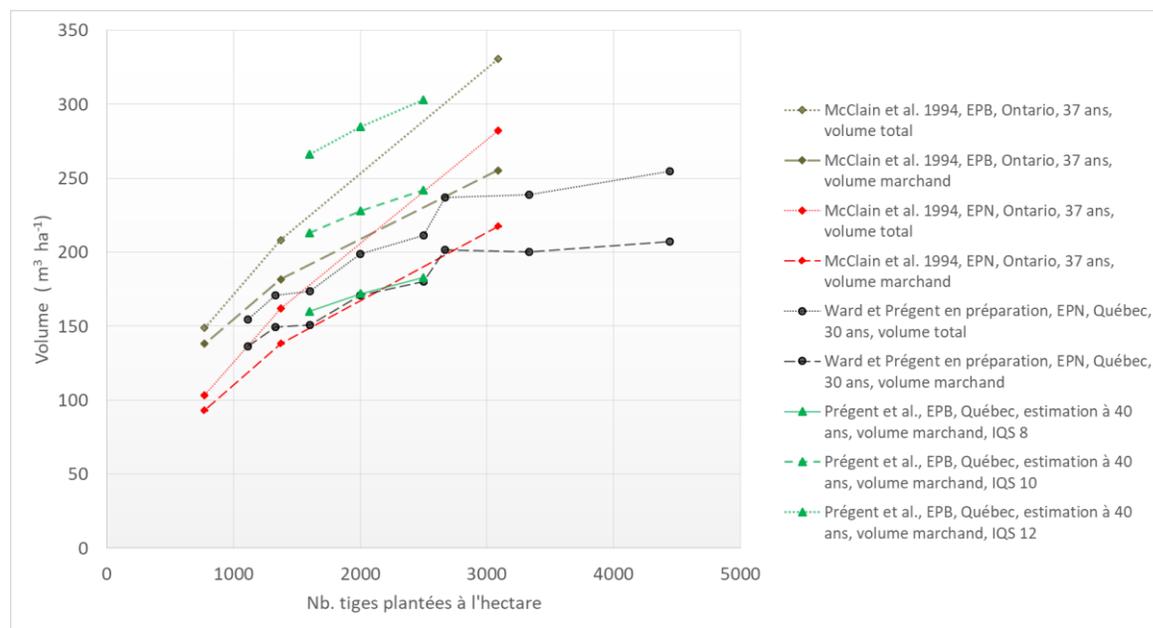
Avant que la maturité d'une plantation ne soit atteinte, le volume à l'hectare des plantations de faibles densités est nettement inférieur à celui des plantations de fortes densités. À titre d'exemple, en Ontario, les volumes produits à l'hectare par des plantations d'épinettes noires et d'épinettes blanches de 37 ans étaient jusqu'à 2 fois moindres pour une faible densité de plantation que pour une forte densité (McClain *et al.* 1994) (figure 4).

Idéalement, les volumes totaux à l'hectare obtenus avec différentes densités initiales de reboisement devraient être comparés sur la base de l'accroissement annuel courant, afin de déterminer le moment à partir duquel ceux-ci commencent à devenir identiques pour les différentes densités. Selon Bartoli et Decourt (1971), l'accroissement annuel courant à l'hectare des plantations de faibles densités serait d'abord inférieur, puis deviendrait supérieur à celui des plantations denses. Ainsi, après un certain nombre d'années, le volume sur pied serait le même. En ce moment, les données que nous avons pour les plantations du Québec ne nous permettent pas de confirmer hors de tout doute ces hypothèses. Il est toutefois possible d'observer que les écarts des volumes marchands simulés à 40 ans dans des plantations d'épinettes blanches sont plutôt minces pour des densités de reboisement variant de 1 600 à 2 500 tiges·ha<sup>-1</sup> (Prégent *et al.* 2010) (figure 4). À titre d'exemple, d'après ces simulations, le volume

marchand des plantations d'épinettes blanches reboisées à 1 600 tiges·ha<sup>-1</sup> serait 7 % inférieur à celui des plantations reboisées à 2000 tiges·ha<sup>-1</sup>, peu importe l'indice de qualité de station (IQS).

De plus, d'après la figure 4, on observe que la différence entre le volume total et le volume marchand diminue en même temps que la densité initiale de reboisement. Cela indique que pour une même période de croissance, un espacement large favorisera plus rapidement la formation de tiges marchandes.

Sur des stations pauvres et mal drainées, plusieurs auteurs ont suggéré que la production maximale en volume serait atteinte avec une densité initiale de reboisement plus faible que celle généralement utilisée pour les milieux riches. Ces hypothèses sont basées sur les résultats d'une étude réalisée sur l'épinette de Norvège en Europe, dans laquelle un gain du volume à l'hectare avait été observé avec une augmentation de l'espacement de 1,5 à 2 m sur des stations présentant de mauvaises conditions de croissance (Sjolte-Jorgensen 1967). Par ailleurs, certains auteurs suggèrent que sur des stations pauvres, des plants croissant dans des conditions plus denses tendraient davantage à « stagner » (Sjolte-Jorgensen 1967).



**Figure 4.** Variation du volume total ou du volume marchand à l'hectare (m<sup>3</sup>·ha<sup>-1</sup>) en fonction du nombre de tiges plantées à l'hectare pour l'épinette noire (EPN) et l'épinette blanche (EPB), d'après plusieurs études publiées ou en préparation.

### 3. La qualité du bois

#### 3.1. Les nœuds sont plus gros lorsqu'on réduit la densité initiale de reboisement

La taille et le nombre de nœuds sont des facteurs qui ont une grande incidence sur la qualité du bois de sciage. Ils sont considérés comme des défauts parce qu'ils diminuent la résistance mécanique des sciages en raison de la déviation du fil qu'ils engendrent (Jozsa et Middleton 1994). La dimension des nœuds a

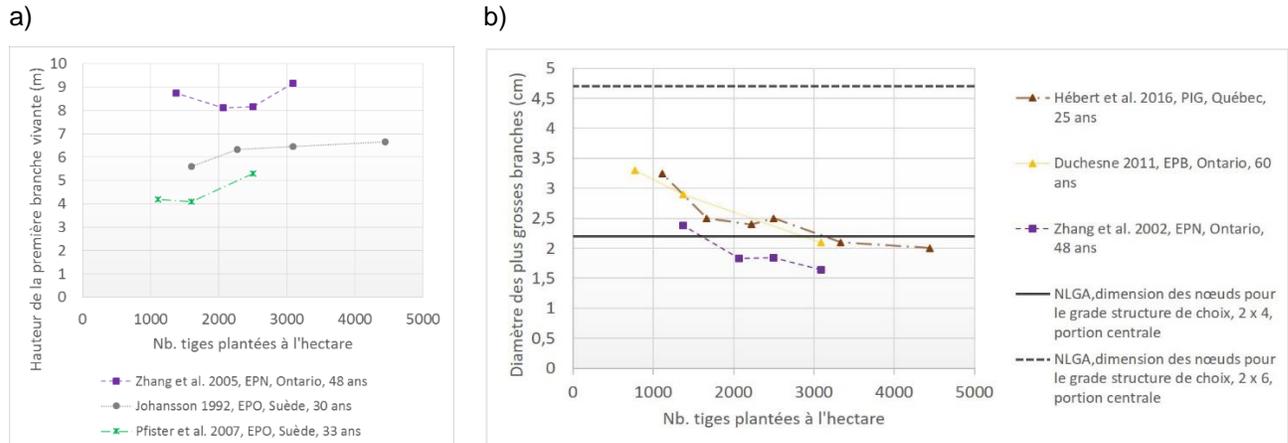
aussi un effet sur la qualité du bois destiné aux pâtes et papiers, puisque les gros nœuds sont plus difficiles à défibrer (Walker *et al.* 1993).

Une faible densité initiale de reboisement favorise la formation de plus grosses branches et, par conséquent, de plus gros nœuds. Toutefois, la présence de gros nœuds peut être compensée en partie par la plus grande taille des arbres croissant à faible densité, ce qui permet l'usinage de sciages plus grands, sur lesquels on tolère de plus gros nœuds (NLGA 2017). Selon la commission nationale de classification des sciages, aussi connue sous le nom de National Lumber Grading Authority (NLGA), la taille des nœuds admissibles sur la portion centrale de la face large d'une planche du grade de structure « de choix » (c.-à-d. le meilleur grade de qualité sciage) est de 7/8 de pouce (2,2 cm) pour une planche 2 x 4 et de 1 pouce et 7/8 (4,7 cm) pour une planche 2 x 6. Des nœuds plus gros d'un pouce (2,5 cm) sont donc admis pour la production de planches 2 x 6, en comparaison à des planches 2 x 4 de même qualité (NLGA 2017). Par ailleurs, il est à noter que les études indiquent généralement que le nombre de branches, et donc de nœuds, ne varierait pas en fonction de la densité initiale de reboisement (Johansson 1992, Pfister *et al.* 2007, Sjolte-Jorgensen 1967).

L'espacement initial aurait toutefois un effet sur la hauteur de la première branche vivante. À titre d'exemple, les auteurs d'une étude réalisée en Suède, dans une plantation d'épinettes de Norvège de 30 ans, ont démontré que le choix de l'espacement initial affectait la hauteur de la première branche vivante ( $h$ ) ( $h = 6,64$  m pour une densité de  $4\,444$  tiges·ha<sup>-1</sup> vs  $5,60$  m pour une densité de  $1\,600$  tiges·ha<sup>-1</sup>; Johansson 1992; figure 5a). D'après ces résultats, une densité de plantation de  $1\,600$  tiges·ha<sup>-1</sup> permettrait de récolter à 30 ans une première bille de 16 pieds (5 m) sans branches vivantes. Les résultats d'une autre étude (Pfister *et al.* 2007), elle aussi réalisée en Suède sur l'épinette de Norvège, vont dans le même sens. Toutefois, dans cette dernière étude, pour une même densité ( $1\,600$  tiges·ha<sup>-1</sup>) et pour un âge de plantation semblable (33 ans), la hauteur de la première branche vivante n'était que de 4,1 m. Cela démontre que d'autres facteurs comme les traitements sylvicoles pratiqués dans la plantation peuvent aussi influencer la hauteur de la première branche vivante. Dans l'étude de Johansson (1992), deux traitements d'éclaircies ont eu lieu, alors que dans l'étude de Pfister *et al.* (2007), un nettoyage suivi d'une éclaircie ont été réalisés. Par ailleurs, Johansson (1992) faisait remarquer que pour toutes les densités de tiges testées, le rapport entre le diamètre des branches et celui de l'arbre demeure constant. En outre, plus on s'approche du sommet de l'arbre, moins la taille des nœuds tend à varier selon la densité initiale de plantation (Sjolte-Jorgensen 1967).

Parmi les espèces résineuses plantées au Québec, le pin gris est le plus susceptible de former de gros nœuds (Zhang *et al.* 2005b). Les graphiques de la figure 5 présentent les variations de la hauteur de la première branche vivante et de la taille des nœuds en fonction du nombre de tiges plantées à l'hectare. Nous avons également ajouté à la figure 5b les dimensions des nœuds à respecter afin de produire des sciages (planches 2 x 4 et 2 x 6) de qualité « de choix », selon les critères de la NLGA, soit le meilleur

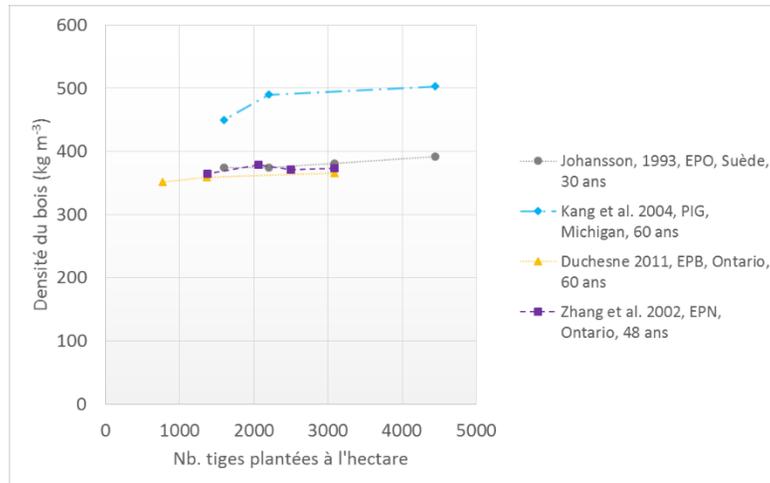
grade qui puisse être produit. On observe que la taille des nœuds peut être un enjeu lorsqu'on vise la production de planches 2 x 4, mais que pour la production de planches 2 x 6, la marge de manœuvre est beaucoup plus grande.



**Figure 5.** Variations a) de la hauteur de la première branche vivante (m) et b) du diamètre des plus grosses branches (cm) en fonction du nombre de tiges plantées à l'hectare pour l'épinette noire (EPN), l'épinette blanche (EPB), l'épinette de Norvège (EPO) et le pin gris (PIG), d'après plusieurs études publiées.

### 3.2. La densité du bois diminue légèrement lorsqu'on réduit la densité initiale de reboisement

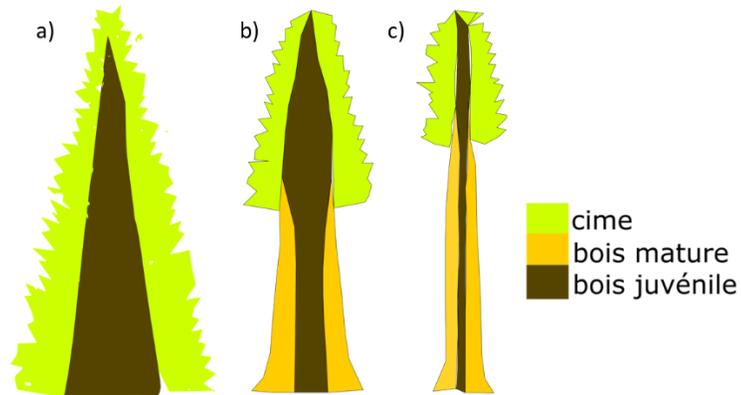
La densité du bois est considérée comme le meilleur indice de sa qualité parce qu'elle est corrélée à ses autres propriétés et à plusieurs caractéristiques technologiques (Haygreen et Bowyer 1989, Panshin et de Zeeuw 1980). La densité du bois est également une propriété de première importance pour l'industrie des pâtes et papiers, puisqu'elle influence directement le rendement en pâte. Plusieurs études ont testé la relation entre la densité initiale de reboisement et la densité du bois pour plusieurs des essences résineuses québécoises (figure 6). Dans l'ensemble, les résultats montrent que la densité du bois diminue légèrement avec une baisse de la densité initiale de reboisement. En effet, un espacement initial plus large favorise une croissance juvénile plus rapide, des cernes plus larges avec une plus faible proportion de bois final, et donc, une densité du bois plus faible (Jozsa et Middleton 1994). Puisque la densité du bois est un bon indicateur des propriétés mécaniques, même une légère baisse de la densité pourrait entraîner une réduction mesurable de la valeur des bois classés MSR (c.-à-d. des bois classés par une machine appliquant une contrainte mécanique, MSR : *machine stress rated lumber*). À titre d'exemple, Giroud *et al.* (2017) ont observé qu'une variation de densité de  $25 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$  équivalait à une variation importante (de l'ordre de 1 GPa) du module d'élasticité dynamique chez l'épinette noire.



**Figure 6.** Variation de la densité du bois ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ) pour plusieurs espèces résineuses en fonction du nombre de tiges plantées à l'hectare, d'après plusieurs études publiées.

### 3.3 La quantité de bois juvénile augmente lorsqu'on réduit la densité initiale de reboisement

Plusieurs des caractéristiques du bois juvénile sont indésirables pour la production de pâtes et papiers et celle de sciage (Haygreen et Bowyer 1989, Panshin et de Zeeuw 1980). Il est toutefois possible de contrôler la production de bois juvénile en variant la densité initiale de reboisement. Dans les plantations plus denses, la zone de bois juvénile à l'intérieur des arbres est généralement réduite. Le bois juvénile est celui qui se forme sous forte influence de la cime vivante de l'arbre. Il est associé à une forte variation radiale des propriétés du bois dans la tige des arbres. Le bois juvénile se trouve sur toute la longueur de la tige, autour de la moelle. Il se caractérise par une densité plus faible, des fibres plus courtes et flexibles, un angle des microfibrilles plus prononcé par rapport à l'axe longitudinal, un pourcentage plus faible de bois final, une plus grande quantité de bois de compression, une teneur en humidité plus forte, des parois cellulaires plus étroites, des lumens de plus large diamètre, une teneur en cellulose plus faible et une plus grande proportion de lignine que le bois adulte (Bendtsen 1978, Panshin et de Zeeuw 1980; figure 7).



**Figure 7.** Exemples d'arbres avec différentes proportions de cime vivante. a) Croissance rapide avec 100 % de cime vivante et 100 % de bois juvénile. b) Croissance moyenne avec 50 % de cime vivante et une proportion semblable de bois mature et de bois juvénile. c) Croissance lente avec 35 % de cime vivante avec une proportion plus grande de bois mature (adapté de Jozsa et Middleton 1994).

Ainsi, une diminution du nombre de tiges plantées à l'hectare pourrait prolonger la période de production du bois juvénile dans l'arbre. De manière générale, les études sur le lien entre la densité initiale de reboisement sur le bois juvénile semblent montrer que l'effet de l'espacement initial est plus grand dans la zone juvénile que dans la zone mature (Yang 2002). Au-delà de ce principe, il importe de réaliser qu'une croissance radiale plus rapide en bas âge associée à des espacements larges impliquera aussi une augmentation de la taille de la zone juvénile, et ce, même si la période de production de ce type de bois n'est pas prolongée.

D'après les résultats obtenus par Yang et Hazenberg (1994), la transition du bois juvénile au bois mature s'est faite entre les 11<sup>e</sup> et 21<sup>e</sup> anneaux de croissance pour des épinettes noires plantées en Ontario (région de Thunder Bay). D'après cette même étude, l'âge moyen de transition serait de 14 ans à une densité de 3 086 tiges·ha<sup>-1</sup>, et de 15 ans à une densité de 772 tiges·ha<sup>-1</sup>. Pour l'épinette blanche plantée dans le même secteur en Ontario, la transition du bois juvénile au bois mature s'est faite entre les 8<sup>e</sup> et 20<sup>e</sup> anneaux de croissance (Yang 2002). Selon ces résultats, l'âge moyen de transition serait de 12 ans à une densité de 3 086 tiges·ha<sup>-1</sup> et de 16 ans à une densité de 772 tiges·ha<sup>-1</sup>. Dans le cas du pin gris planté au Québec, l'âge moyen de transition du bois juvénile au bois mature serait de 7 ans à une densité de 4 444 tiges·ha<sup>-1</sup>, et de 9 ans à une densité de 1 111 tiges·ha<sup>-1</sup> (Hébert *et al.* 2016). Ainsi, plus l'espacement entre les tiges est grand, plus l'âge de transition est retardé. Toutefois, il importe de rappeler qu'il n'existe pas de méthodes standards pour estimer la transition du bois juvénile au bois mature, et que celles-ci varient actuellement d'une étude à l'autre.

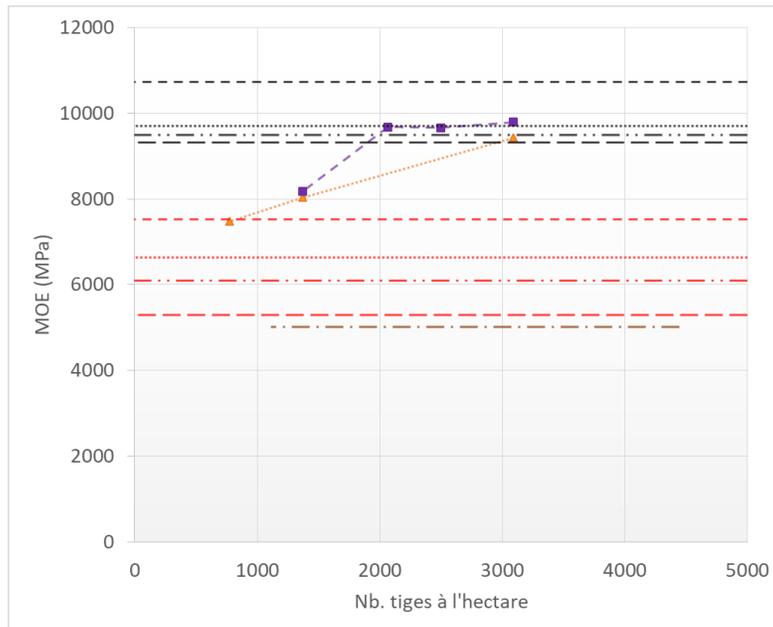
### 3.4 La résistance du bois diminue lorsqu'on réduit la densité initiale de reboisement

Les propriétés de résistance mécanique sont les plus importantes à considérer quand le bois est principalement destiné à un usage structural. Lorsque les arbres sont encore jeunes, l'effet de la densité initiale de reboisement sur les propriétés mécaniques du bois semble relativement minime. Comme on peut l'observer à la figure 8, les valeurs des modules d'élasticité (MOE, c.-à-d. la rigidité du bois) et de rupture (MOR, c.-à-d. la résistance mécanique du bois) des jeunes pins gris de 25 ans étaient similaires pour toutes les densités de reboisement testées (Hébert *et al.* 2016). Aucune différence significative n'a été observée. Toutefois, il faut mentionner que les auteurs de cette étude ont testé les propriétés mécaniques du bois à partir de petits échantillons sans défauts. Pour de plus vieilles plantations d'épinettes noires (Zhang *et al.* 2002) et d'épinettes blanches (Duchesne 2011), nous pouvons observer une réduction des propriétés mécaniques mesurées sur des planches lorsque la densité initiale de reboisement diminue (figure 8).

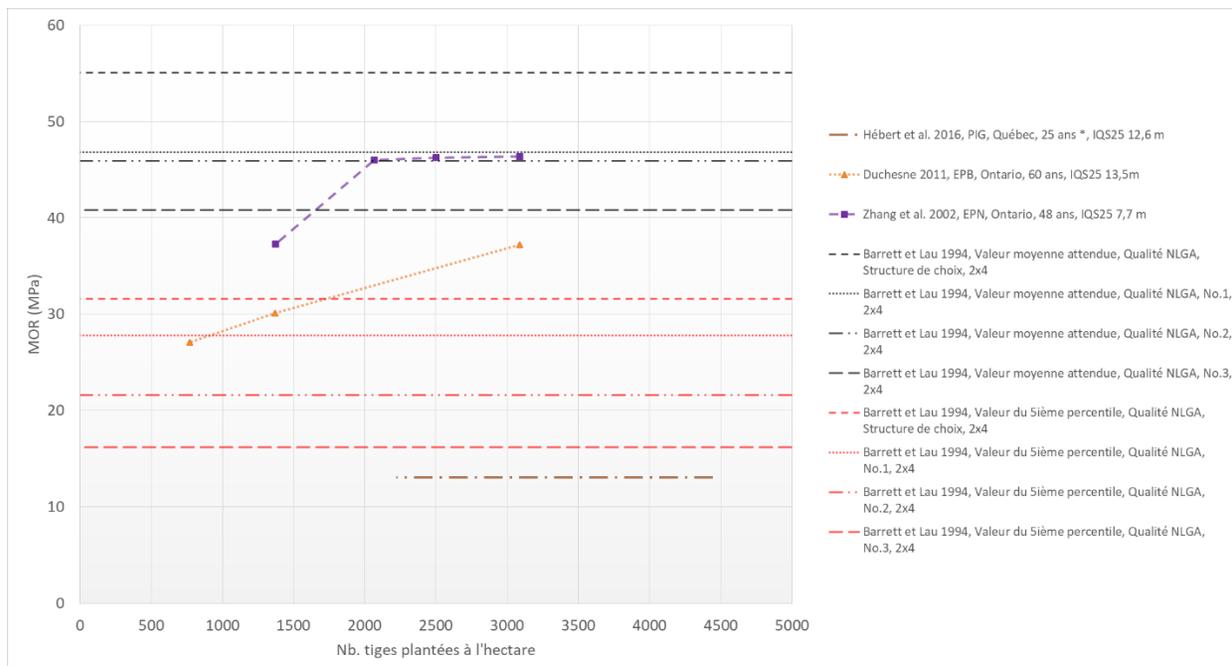
Pour comparer les valeurs obtenues dans la littérature, nous avons représenté, sur les graphiques de la figure 8, les valeurs moyennes de rigidité et de résistance généralement attendues par le Conseil canadien du bois (Barrett et Lau 1994) pour produire du bois de 2 x 4 (structure « de choix », n° 1, n° 2 et n° 3) selon les critères de la NLGA. De plus, nous avons représenté, les valeurs les plus faibles (associées au 5<sup>e</sup> percentile de la distribution) de chacun de ces produits (Barrett et Lau 1994). D'abord, on constate que les valeurs obtenues dans les plantations étudiées sont légèrement inférieures aux valeurs moyennes attendues, surtout en ce qui a trait au MOR (figure 8b). D'après les résultats obtenus, aucun sciage d'épinette noire, d'épinette blanche ou de pin gris ne rencontrerait les valeurs moyennes attendues de MOR pour produire le grade de structure « de choix ». Toutefois, les valeurs des sciages testés d'épinette noire seraient bien au-dessus des valeurs du 5<sup>e</sup> percentile de la distribution. C'est le cas notamment pour l'épinette blanche plantée à plus de 1 370 tiges·ha<sup>-1</sup>. Pour le pin gris, les valeurs des propriétés mécaniques (MOE et MOR) rapportées dans l'étude étaient bien en dessous des valeurs du 5<sup>e</sup> percentile des distributions, ce qui indique que les tiges auraient tout avantage à demeurer dans la plantation encore quelques années avant d'être récoltées (figure 8a et b).

De manière générale, même si l'on observe des écarts relativement considérables entre les valeurs moyennes des propriétés mécaniques attendues et celles mesurées à partir des bois de plantations, la majeure partie des sciages semblaient rencontrer les valeurs minimales (c.-à-d. les valeurs au 5<sup>e</sup> percentile). Il reste toutefois qu'un apport trop important de moindre qualité dans les approvisionnements pourrait réduire ces valeurs, comme ce fut le cas aux États-Unis pour le groupe des pins du sud (Southern Forests Products Association, 2013). À la suite des changements importants observés au niveau de la ressource forestière, le bureau d'inspection du pin du sud (Southern Pine Inspection Bureau) a redéfini les standards pour les pins du sud provenant de plantations, pour inclure désormais de nouveaux grades basés sur la densité du bois, la largeur de cernes et la proportion de bois final.

a) Module d'élasticité



b) Module de rupture



**Figure 8.** Variations a) du module d'élasticité (MOE, c.-à-d. la rigidité du bois) et b) du module de rupture (MOR, c.-à-d. la résistance du bois) en fonction du nombre de tiges plantées à l'hectare, d'après plusieurs études publiées. Note : Pour l'étude de Hébert *et al.* (2016), comme il n'y avait pas de différence significative entre les différentes densités de tiges, nous avons représenté la valeur moyenne fournie dans l'article.

Ainsi, d'après les données recensées jusqu'à présent, l'essence de reboisement présentant les meilleures propriétés mécaniques est l'épinette noire, suivie de l'épinette blanche et du pin gris. Toutefois, comme l'étude sur le pin gris a été réalisée à partir de très jeunes tiges, les propriétés mécaniques de cette essence vont continuer à s'améliorer avec le temps. Au-delà des effets de l'espacement initial, ces résultats démontrent que la durée de la période de révolution influencera grandement la qualité du bois produit. Si l'on se fie aux propriétés mécaniques des bois provenant de forêts naturelles, on devrait s'attendre à ce que le bois de pin gris issu de plantations se retrouve au deuxième rang, après celui de l'épinette noire (tableau 1).

**Tableau 1.** Valeurs du module d'élasticité (MOE, c.-à-d. la rigidité du bois) et du module de rupture (MOR, c.-à-d. la résistance du bois) pour trois espèces issues de forêts naturelles (valeurs tirées de Giroud *et al.* 2017 et Jessome 2000) et de plantations (valeurs tirées d'études publiées). Prendre note que les valeurs de références proviennent d'échantillons sans nœuds.

Espèce	Référence	Localisation Âge	Densité (Nb.tiges ha <sup>-1</sup> )	MOE (MPa)	MOR (MPa)
Épinette blanche	Duchesne 2011	Ontario	3086	9427	37,2
		60 ans	1370	8031	30,1
		IQS <sub>25</sub> = 13,5 m	771	7476	27,1
	Jessome 2000, Valeur de référence	Forêt naturelle		9930	62,7
	Giroud et al. 2017, Valeur de référence	Forêt naturelle		10800	
Épinette noire	Zhang et al. 2002	Ontario	3086	9791	46,4
		48 ans	2500	9661	46,2
		IQS <sub>25</sub> = 7,7 m	2066	9679	46,0
			1372	8178	37,2
	Jessome 2000, Valeur de référence	Forêt naturelle		10400	78,3
Giroud et al. 2017, Valeur de référence	Forêt naturelle		12300		
Pin gris	Hébert et al. 2016	Québec 25 ans	1111 à 4444	5017	13,05
	Jessome 2000, Valeur de référence	IQS <sub>25</sub> = 12.6 m Forêt naturelle		10200	77,9
	Giroud et al. 2017, Valeur de référence	Forêt naturelle		10900	

Les résultats des travaux de recherche rapportés dans cette synthèse doivent néanmoins être considérés avec prudence puisqu'ils ne s'appliquent qu'aux conditions de croissance rencontrées dans les dispositifs de recherche. Des études ont démontré l'importance de la variabilité régionale sur les propriétés mécaniques du bois en forêt naturelle (Giroud *et al.* 2017), mais aussi en plantation (Jordan *et al.* 2008). Ainsi, il est raisonnable de penser que les propriétés mécaniques du bois peuvent varier en fonction de la

qualité de station. En effet, sur des stations pauvres, les arbres poussent plus lentement et peuvent former du bois plus dense, possiblement avec de meilleures propriétés mécaniques. Les études de Duchesne (2011) pour l'épinette blanche et d'Hébert *et al.* (2016) pour le pin gris présentaient des conditions de croissance exceptionnelles avec des IQS de 13,5 m et de 12,6 m à 25 ans, respectivement. Par conséquent, les arbres utilisés pour ces travaux ont poussé rapidement, ce qui peut avoir contribué à affaiblir leurs propriétés mécaniques.

Pour l'épinette de Norvège, comme il ne semble pas y avoir eu d'études du lien entre la densité initiale de reboisement et les propriétés mécaniques du bois, nous pouvons penser que les valeurs pour cette essence se situeraient entre celles de l'épinette noire et de l'épinette blanche. D'après Mottet *et al.* (2006), le bois de l'épinette de Norvège poussant au Québec aurait de meilleures propriétés mécaniques en plantation que l'épinette blanche, avec des valeurs de MOE de 9 236 MPa et de MOR de 38,4 MPa dès l'âge de 32 ans. Depuis mars 2019, l'espèce est reconnue et approuvée par l'American Lumber Standards Committee, et placée dans le groupe d'essences nordiques, mais estampillée avec la mention « N Spr (N) ». Elle fait donc partie d'un groupe distinct de celui généralement utilisé pour le groupe des épinettes, des pins et du sapin (communément appelé SPF, pour *spruce-pine-fir*), parce que les propriétés mécaniques de son bois n'atteignaient pas les valeurs attendues pour le groupe SPF.

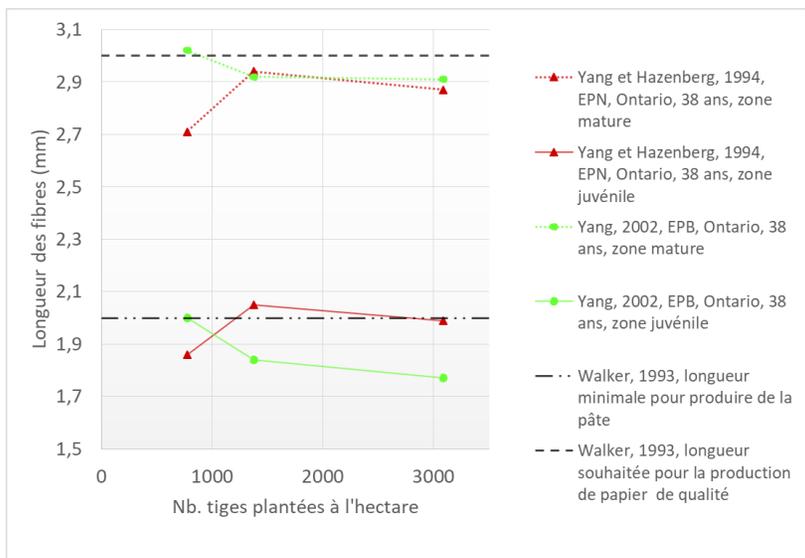
Comme le bois de plantation pousse beaucoup plus rapidement que celui des forêts naturelles, il est normal qu'il présente de moins bonnes propriétés mécaniques. En contrepartie, les plantations permettent d'atteindre de plus gros volumes à un plus jeune âge, ce qui peut représenter un avantage intéressant pour une production rapide de bois. L'augmentation plus rapide en diamètre des tiges pourra ainsi permettre de générer de plus gros sciages (par exemple, des 2 x 6), lesquels devraient avoir une plus grande valeur.

À titre de comparaison, nous fournissons, au tableau 1, les valeurs des propriétés mécaniques mesurées à partir des bois d'épinette blanche, d'épinette noire et de pin gris issus de forêts naturelles.

### 3.5 *La longueur des fibres diminuerait lorsqu'on réduit la densité initiale de reboisement*

La longueur des fibres est un élément important à considérer surtout pour l'industrie des pâtes et papiers. Selon Walker (1993), la longueur minimale des fibres requise pour produire une pâte acceptable est de 2 mm. Des fibres longues de 3 mm favorisent une meilleure résistance du papier au déchirement. En Ontario, Yang et Hazenberg (1994) et Yang (2002) ont étudié la relation entre la densité initiale de reboisement et la longueur des fibres dans la zone juvénile et la zone mature du bois d'épinettes noires et d'épinettes blanches, issues de plantations de 38 ans. Leurs résultats démontrent un effet significatif de la densité de reboisement sur la longueur des fibres. Pour l'épinette noire, les fibres étaient en moyenne plus courtes dans les tiges provenant de la plantation à faible densité que dans celles provenant des plantations plus denses, et ce, tant dans la zone de bois juvénile que dans la zone de bois mature (figure 9). La tendance inverse a été observée pour l'épinette blanche (figure 9). L'auteur de l'étude portant sur l'épinette

blanche (Yang 2002) a indiqué que d'autres travaux seraient nécessaires pour confirmer ces observations, qui vont à l'encontre de ce qui est généralement rapporté dans la littérature. Les résultats de Kang *et al.* (2004) pour le pin gris de 60 ans planté au Michigan correspondent davantage à ce qu'on attend. Les longueurs moyennes de fibres (sans distinction entre les zones juvénile et mature) variaient de 3,13 mm pour la densité la plus forte (4 444 tiges·ha<sup>-1</sup>), à 2,58 mm pour la densité la plus faible (1 600 tiges·ha<sup>-1</sup>).

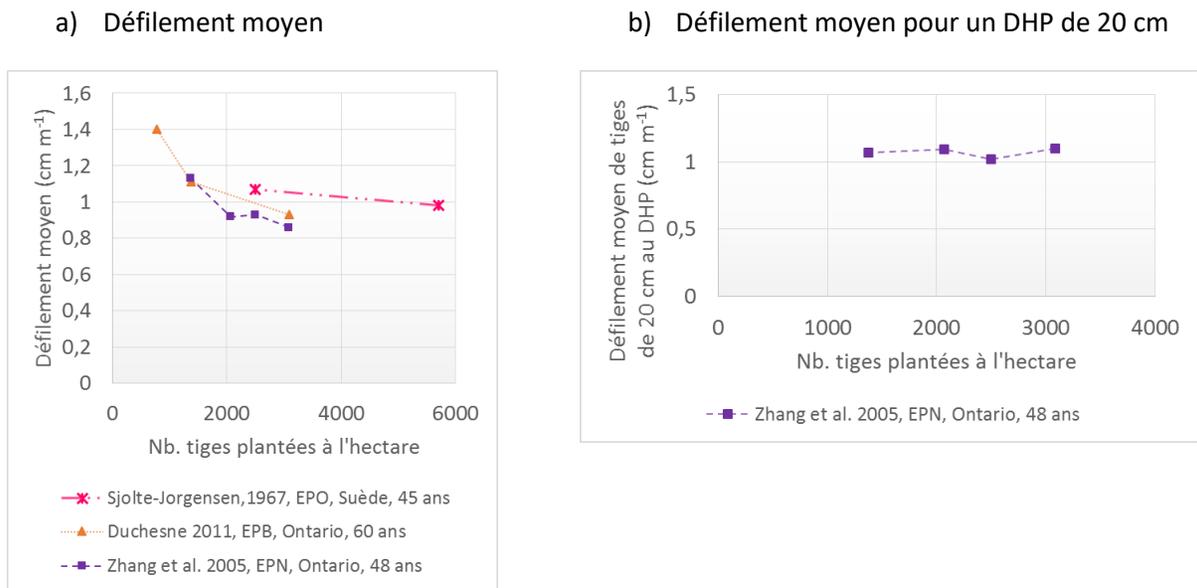


**Figure 9.** Variation de la longueur moyenne des fibres (mm) en fonction du nombre de tiges plantées à l'hectare, d'après plusieurs études publiées.

Comme les copeaux sont souvent obtenus à partir des dosses qui proviennent de la zone de bois mature, on peut s'attendre à ce que la longueur des fibres d'épinette noire et d'épinette blanche soit suffisante pour produire du papier de qualité, surtout lorsque les arbres sont plantés à plus de 1 600 tiges·ha<sup>-1</sup>. Dans la zone juvénile, les fibres des épinettes noires plantées à plus de 1 600 tiges·ha<sup>-1</sup> étaient suffisamment longues pour la production de pâte, mais pas celles des épinettes blanches.

### 3.6 *Le défilement des tiges augmente lorsqu'on réduit la densité initiale de reboisement, mais la rectitude des tiges varierait peu*

De façon générale, les études portant sur le lien entre la densité initiale de reboisement et le défilement des tiges montrent que celui-ci augmente dans les plantations à faible densité. La différence la plus marquée a été observée pour l'épinette blanche (figure 10a). Toutefois, lorsque l'on compare les mesures de défilement pour un DHP donné (figure 10b), on observe qu'une tige de DHP de 20 cm, par exemple, aura sensiblement le même défilement à toutes les densités de reboisement (Zhang *et al.* 2005a). L'effet de la densité initiale de reboisement sur le défilement est habituellement plus prononcé vers le sommet de l'arbre. Cela constitue un avantage relativement important d'un point de vue économique, puisque la bille ayant le plus de valeur monétaire se trouve au bas de la tige. Ainsi, pour la production de billes de grande valeur, l'effet de la densité initiale semble moins préoccupant.



**Figure 10.** Variation a) du défilement moyen ( $\text{cm}\cdot\text{m}^{-1}$ ) et b) du défilement moyen de tiges de DHP de 20 cm ( $\text{cm}\cdot\text{m}^{-1}$ ) pour diverses essences en fonction du nombre de tiges plantées à l'hectare, d'après plusieurs études publiées.

Les fourches, les courbures et les défauts de rectitude des tiges ont surtout été étudiés chez le pin gris. Selon Zhang *et al.* (2005b), ces variables ne sont pas influencées par la densité initiale de reboisement, puisque les proportions de tiges comportant des fourches, des courbures et autres déformations importantes étaient semblables, soit de l'ordre de 15 à 25 % pour toutes les densités de plantations étudiées (de 1 325 à 4 035 tiges·ha<sup>-1</sup>). Toutefois, Belley *et al.* (2013) ont observé des déformations de courbure plus importantes lorsque les pins gris étaient plantés à moins de 1 600 tiges·ha<sup>-1</sup>.

### 3.7 Il y aurait moins de carie du bois lorsqu'on réduit la densité initiale de reboisement

Peu d'études ont traité du lien entre la densité initiale de reboisement et la carie du bois de plantation au Québec ou dans les provinces avoisinantes. D'après une étude réalisée au Michigan sur le pin gris de plantation, la carie du bois serait plus présente dans les plantations à fortes densités que dans les plantations à densités faibles (Zhang *et al.* 2005b). En effet, cette étude a démontré que la carie était la cause de 25 % des déclassements des sciages vers les catégories n° 3 et Économie dans la plantation de 1 325 tiges·ha<sup>-1</sup>, et de 57 % des déclassements dans la plantation de 4 035 tiges·ha<sup>-1</sup>. Les auteurs de certaines études citées par Sjolte-Jorgensen (1967) réalisées sur l'épinette de Norvège en Europe ont également remarqué que plus les tiges étaient densément plantées, plus les chances étaient fortes que les racines s'infectent entre elles. D'autres auteurs cités par Sjolte-Jorgensen (1967) n'ont toutefois pas remarqué de lien entre l'espacement initial de la plantation et la carie du bois. Il semble donc difficile de déterminer si la densité initiale de reboisement aura un impact sur la carie du bois. Certains auteurs suggèrent aussi que l'application de travaux sylvicoles dans des plantations denses pourrait accroître les

risques d'infections, en raison du grand nombre de souches formées. La carie de cœur est un phénomène qui se développe avec l'âge. À titre d'exemple, Zhang *et al.* (2005b) rapportaient qu'aucune pièce de bois n'avait été déclassée par la présence de carie dans un peuplement de pin gris âgé de 50 ans, alors qu'on en comptait 5,2 % après 73 ans et 21,5 % après 90 ans.

#### **4. La rentabilité financière augmente lorsqu'on réduit la densité initiale de reboisement**

Les études portant sur la rentabilité financière des plantations sont unanimes pour dire qu'il est plus avantageux de reboiser à faible densité qu'à forte densité (Huang *et al.* 2005; Serban en préparation; Zhang *et al.* 2005b). Selon Serban (en préparation), la valeur actuelle nette (VAN) d'une plantation d'épinettes noires au Québec pourrait être jusqu'à 7 fois plus grande avec une densité initiale de 1 111 tiges·ha<sup>-1</sup> qu'avec une densité de 4 444 tiges·ha<sup>-1</sup>. Les résultats de Smith *et al.* (2015), en Australie, suivent la même tendance. Les auteurs concluent que le scénario le plus avantageux financièrement est de planter selon un espacement large et de ne pas réaliser d'éclaircie. De manière générale, les études indiquent une augmentation du taux de récupération en valeur (\$/m<sup>3</sup>) avec une diminution de la densité de reboisement. Le ratio avantages-coûts du capital investi suivrait aussi la même tendance (Zhang *et al.* 2005b). D'autres études ont aussi démontré que les valeurs foncières des terres (LEV : *land expectation value* en anglais) atteignaient leur maximum à de faibles densités de plantation (Serban en préparation; Smith *et al.* 2015) puisqu'aucun traitement d'éclaircie n'était nécessaire, ce qui permettait de réduire l'ensemble des coûts.

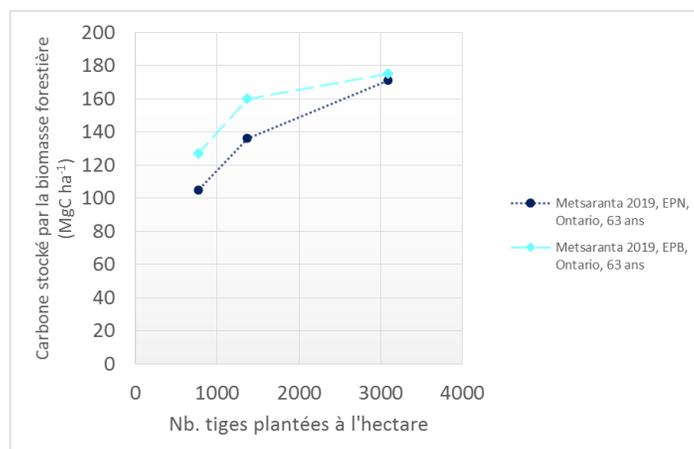
Toutefois, il importe de réaliser que les résultats des études économiques n'incluent pas toujours la perte de rendement en sciage causée par la présence de plus gros défauts, eux-mêmes plus fréquemment observés dans les plantations peu denses. À titre d'exemple, Duchesne (2011) a démontré que le meilleur rendement (valeur des produits à l'hectare) pour l'épinette blanche n'était pas obtenu avec la plus faible densité de reboisement (771 tiges·ha<sup>-1</sup>), mais plutôt avec une densité intermédiaire de 1 372 tiges·ha<sup>-1</sup>. Zhang *et al.* (2002) mentionnaient également que la présence de gros nœuds pour l'épinette noire augmentait avec un espacement plus grand (1 372 tiges·ha<sup>-1</sup> comparativement à 2 066 tiges·ha<sup>-1</sup> et plus), ce qui avait diminué la qualité des produits du sciage. Pour le pin gris, la perte de rendement en sciage n'avait pas varié selon la densité de plantation; au contraire, la plantation de plus faible densité (1 325 tiges·ha<sup>-1</sup>) avait généré la meilleure production en bois d'œuvre de structure de catégorie « de choix » (Zhang *et al.* 2005b).

De toute évidence, pour maximiser le rendement financier et les propriétés mécaniques du bois, il est préférable de retarder la récolte pour favoriser la formation de bois mature et obtenir un diamètre supérieur à 20 cm, ce qui favorisera la création d'un panier de produits qui maximisera la production de bois de sciage de qualité (bois d'œuvre) et diminuera la proportion de copeaux (Auty *et al.* 2014; Barrette *et al.* 2012). Les gains financiers varieront aussi en fonction de l'indice de qualité de station (Serban en préparation; Watt *et al.* 2017). Sur des stations pauvres, les arbres sont généralement plus petits et ont de plus grosses

branches que sur des stations riches, où ils sont plus élancés (Tombleson *et al.* 1990). Cette différence de morphologie influencera la composition du panier de produits et, conséquemment, le rendement financier (Watt *et al.* 2017). Par ailleurs, les arbres croissant sur des stations riches atteindront des dimensions marchandes beaucoup plus tôt que ceux poussant sur des stations pauvres. Ceci permettra d'optimiser plus rapidement la composition du panier de produits.

##### 5. Le potentiel de séquestration de carbone par la biomasse forestière diminuerait lorsqu'on réduit la densité initiale de reboisement.

Jusqu'à maintenant, peu d'études ont traité du lien entre la densité initiale de reboisement et la séquestration de carbone par la biomasse forestière. D'après les recherches de Metsaranta (2019) dans une plantation de 63 ans en Ontario, le potentiel de séquestration par la biomasse forestière serait plus grand pour les plantations de fortes densités. Il en serait de même pour les volumes à l'hectare calculés. Selon leur étude, la plantation d'épinettes blanches stockerait plus de carbone que celle d'épinettes noires à une faible densité de reboisement (figure 11). Toutefois, à forte densité, la différence de stockage entre les espèces serait presque nulle.



**Figure 11.** Carbone stocké par la biomasse forestière ( $\text{Mg C}\cdot\text{ha}^{-1}$ ) en fonction du nombre de tiges d'épinettes noires (EPN) et d'épinettes blanches (EPB) plantées à l'hectare, d'après une étude publiée.

Dans un contexte de changement climatique, il est important de s'assurer que le bois issu de plantations pourra être utilisé pour produire du bois de sciage, afin de stocker du carbone le plus longtemps possible. Il est en effet préférable de stocker du carbone sous forme de produits du bois qui ont une durée de vie plus longue, comme les sciages et les panneaux de bois, plutôt que sous forme de copeaux ou de granules de bois (Lavoie 2017). D'après les modèles développés par Kurz *et al.* (1992), la proportion de carbone retenue dans les copeaux du bois baisse à seulement 10 % après 10 ans, alors que les sciages retiennent encore 50 % du carbone stocké après 80 ans.

## 6. Synthèse et limites de la recherche bibliographique

Cette revue de littérature démontre que les connaissances actuelles sont encore insuffisantes pour que l'on puisse déterminer avec confiance la densité initiale de reboisement optimale pour les principales essences résineuses plantées au Québec.

Depuis plusieurs années, la pratique courante au Québec a été de planter environ 2 000 tiges-ha<sup>-1</sup>. Toutefois, si l'on désire raccourcir le temps de révolution et augmenter le volume de bois disponible à l'usine de sciage, il serait souhaitable de réduire la densité initiale de reboisement afin de favoriser la production plus rapide de bois marchand. Comme nous avons pu le constater tout au long de cette synthèse, il y a des avantages, mais aussi des désavantages à réduire la densité initiale de reboisement. Le tableau 2 résume ceux que nous avons présentés dans ce document.

**Tableau 2.** Avantages et inconvénients liés à une réduction de la densité initiale de reboisement pour les principales essences résineuses plantées au Québec.

Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"><li>• Diminution des coûts d'achat de plants et de mise en terre, ce qui tend à améliorer la rentabilité financière***</li><li>• Production plus rapide de bois marchand de grandes dimensions***</li><li>• Production de sciages de plus grande taille, pouvant tolérer des nœuds de plus gros diamètre***</li><li>• Risques possiblement moins grands d'infections et de carie du bois*</li><li>• Pourcentage de survie généralement accru**</li><li>• Avantages accrus sur stations pauvres*</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Proportion de bois juvénile plus grande***</li><li>• Propriétés mécaniques moins bonnes***</li><li>• Fibres plus courtes**</li><li>• Nœuds plus gros***</li><li>• Défilement plus grand**</li><li>• Capacité moins grande de stockage de carbone à l'hectare par la biomasse forestière*</li></ul>

\*\*\* bien documenté; \*\* moyennement documenté; \* peu documenté

Par ailleurs, afin de maximiser le rendement financier, il est essentiel de cibler la production de grosses tiges, lesquelles devraient avoir un DHP d'au moins 20 cm lors de la récolte (Auty *et al.* 2014; Barrette *et al.* 2012). Toutefois, si ces grosses tiges sont issues d'une plantation de faible densité, elles pourraient contenir plus de défauts, ce qui pourrait affecter la qualité des sciages produits. Certains des sciages pourraient ainsi ne pas atteindre les normes requises pour le bois de structure selon les critères établis par la NLGA. Dans ce cas, le bois pourrait devoir être reclassé dans un autre groupe, ce qui pourrait affecter la valeur des produits. Cette situation s'est déjà produite pour l'épinette de Norvège.

En principe, le nombre de tiges à planter à l'hectare devrait être choisi en fonction du diamètre marchand et de la qualité du bois souhaité pour une période de révolution donnée.

## 7. Perspectives

Dans le futur, il serait intéressant d'élargir notre compréhension du lien entre les valeurs de MOE et de MOR pour les bois de plantation établis au Québec. Comme nous avons pu l'observer dans cette synthèse, certaines incertitudes demeurent en ce qui a trait à la transformation des bois de plantation pour la production de sciages de qualité, surtout lorsqu'ils proviennent de plantations établies à faible densité. Ces bois pourront-ils être vendus à des fins de construction et rencontrer les valeurs minimales établies par le Conseil canadien du bois, ou devront-ils être reclassés dans un autre groupe?

Actuellement, 85 % des plants mis en terre au Québec sont améliorés génétiquement. Dans ces plantations réalisées avec du matériel amélioré, il devrait y avoir plus d'avantages à réduire la densité initiale de reboisement. Selon des études récentes réalisées par Despons *et al.* (2019), le gain génétique attendu des plants améliorés d'épinettes noires pourrait atteindre jusqu'à 36 % en ce qui a trait aux propriétés mécaniques du bois. Pour l'épinette blanche, une étude de Lenz *et al.* (2013) suggère un gain potentiel de 20 % lorsque les propriétés mécaniques et la densité du bois sont améliorées. Notons que les résultats présentés dans le cadre cette revue de littérature provenaient uniquement de plantations n'ayant bénéficié d'aucune amélioration génétique.

Lors des analyses de rentabilité financière, il serait également essentiel de mesurer l'effet d'une réduction de la densité initiale de reboisement sur l'ensemble de la chaîne de valeurs, y compris la qualité des produits du bois qui seront récoltés. Souvent, les résultats des études économiques n'incluent pas la perte de rendement en sciage causée par la présence de plus gros défauts que l'on peut observer dans les plantations peu denses.

## 8. Remerciements

Nous tenons à remercier Mme Denise Tousignant et M. Alexandre Dallaire-Théroux pour la révision linguistique du document, de même que Mme Nathalie Langlois pour la mise en page.

## 9 Références

Auty, D., A. Achim, P. Bédard et D. Pothier, 2014. *Statsaw: Modelling lumber product assortment using zero-inflated poisson regression*. Can. J. For. Res. 44(6): 638-647. [<https://doi.org/10.1139/cjfr-2013-0500>]

Barrett, J.D. et W. Lau, 1994. *Canadian lumber properties*. Canadian Wood Council. Ottawa, Ontario.

- Barrette, J., D. Pothier, D. Auty, A. Achim, I. Duchesne et N. Gélinas, 2012. *Lumber recovery and value of dead and sound black spruce trees grown in the north shore region of Québec*. Ann. For. Sci. 69(5): 603-615. [<https://doi.org/10.1007/s13595-011-0178-8>]
- Barrette, J., E. Thiffault, A. Achim, M. Junginger, D. Pothier et L. DeGrandPré, 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>]
- Bartoli, M. et N. Decourt, 1971. *Densité de plantation : Étude bibliographique et premiers résultats d'une expérience sur le Douglas (Pseudotsuga menziesii Mirb.)*. Ann. For. Sci. 28(1): 59-81.
- Bella, I.E. et J.P. Franceschi, 1980. *Spacing effects 15 years after planting three conifers in Manitoba*. Environment Canada, Canadian Forestry Service. Northern Forest Research Centre. Edmonton, AB. Information Report n° NOR-X-223. 10 p.  
[<https://cfs.nrcan.gc.ca/pubwarehouse/pdfs/11593.pdf>]
- Belley, D., M. Beaudoin, I. Duchesne, S. Vallerand, Q. Tong et D. Swift, 2013. *Assessment of white spruce and jack pine stem curvature from a nelder spacing experiment*. Wood Fiber Sci. 45(3): 237-249.
- Bendtsen, A.B., 1978. *Properties of wood from improved and intensively managed trees*. For. Prod. J. 28(10): 61-72.
- [BMMB] Bureau de mise en marché des bois, 2019. *Valeurs des traitements sylvicoles non commerciaux pour l'année financière 2019-2020 — forêt publique*. Gouvernement du Québec, ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs, Bureau de mise en marché des bois, Direction des évaluations économiques et financières. 11 p.  
[[https://bmmb.gouv.qc.ca/media/48887/cadre\\_application\\_vtsnc\\_2019-2020.pdf](https://bmmb.gouv.qc.ca/media/48887/cadre_application_vtsnc_2019-2020.pdf)]
- Desponts, M., M. Peroon et J. DeBlois, 2019. *Produire plus rapidement du bois de meilleure qualité : une réalité*. Gouvernement du Québec, ministère des Forêts de la Faune et des Parcs, Direction de la recherche forestière. Avis de recherche forestier n° 125. 2 p.  
[<https://mffp.gouv.qc.ca/documents/forets/recherche/Avis125.pdf>]
- 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](http://partenariat.qc.ca/videoconferences/presentation_iduchesne_27%20octobre%202011.pdf)]
- Giroud, G., J. Bégin, M. Defo et C.-H. Ung, 2017. *Regional variation in wood density and modulus of elasticity of Quebec's main boreal tree species*. For. Ecol. Manage. 400: 289-299.  
[<https://doi.org/10.1016/j.foreco.2017.06.019>]

- Groot, A. et F. Cortini, 2016. *Effects of initial planting density on tree and stand development of planted black spruce up to age 30*. For. Chron. 92(2): 200-208. [<https://doi.org/10.5558/tfc2016-039>]
- Haygreen, J.G. et J.L. Bowyer, 1989. *Forest products and wood science: An introduction*. Second Edition. Iowa State University Press. Ames, IA (États-Unis). 500 p.
- Hébert, F., C. Krause, P.-Y. Plourde, A. Achim, G. Prigent et J. Ménétrier, 2016. *Effect of tree spacing on tree level volume growth, morphology, and wood properties in a 25-year-old Pinus banksiana plantation in the boreal forest of Quebec*. Forests 7(11): 276. [<https://doi.org/10.3390/f7110276>]
- Huang, C.-H., G.D. Kronrad et J.D. Morton, 2005. *The financially optimal loblolly pine planting density and management regime for nonindustrial private forestland in east Texas*. South. J. Appl. For. 29(1): 16-21.
- Jessome, A.P., 2000. *Résistance et propriétés connexes des bois indigènes au Canada*. Forintek Canada Corporation. 37 p.
- Johansson, K., 1992. *Effects of initial spacing on the stem and branch properties and graded quality of Picea abies (L.) Karst.* Scand. J. For. Res. 7(1-4): 503-514. [<https://doi.org/10.1080/02827589209382743>]
- Jordan, L., A. Clark, L.R. Schimleck, D.B. Hall et R.F. Daniels, 2008. *Regional variation in wood specific gravity of planted loblolly pine in the United States*. Can. J. For. Res. 38(4): 698-710. [<https://doi.org/10.1139/x07-158>]
- Jozsa, L.A. et G.R. Middleton, 1994. *A discussion of wood quality attributes and their practical implications*. Forintek Canada Corp. Special Publication n° SP-34. 51 p.
- Kang, K.-Y., S.Y. Zhang et S.D. Mansfield, 2004. *The effects of initial spacing on wood density, fibre and pulp properties in jack pine (Pinus banksiana Lamb.)*. Holzforschung 58(5): 455-463. [<https://doi.org/10.1515/HF.2004.069>]
- Kurz, W.A., M.J. Apps, T.M. Webb et P.J. McNamee, 1992. *The carbon budget of the Canadian forest sector: Phase 1*. Forestry Canada, Northwest Region, Northern Forestry Centre. Edmonton, AB. Information report n° NOR-X-326. 93 p. [<https://cfs.nrcan.gc.ca/pubwarehouse/pdfs/11881.pdf>]
- Lavoie, P., 2017. *La forêt et les produits forestiers dans la lutte aux changements climatiques*. Dans : Forum des communautés forestières — FQM, 28 novembre 2017. Québec, QC. [<https://www.fqm.ca/wp-content/uploads/2017/12/PATRICK-LAVOIE-FCF-final-20171130.pdf>]
- Lenz, P., D. Auty, A. Achim, J. Beaulieu et J. Mackay, 2013. *Genetic improvement of white spruce mechanical wood traits—early screening by means of acoustic velocity*. Forests 4(3): 575-594.

- McClain, K., D. Morris, S. Hills et L. Buse, 1994. *The effects of initial spacing on growth and crown development for planted northern conifers: 37-year results*. For. Chron. 70(2): 174-182.
- Metsaranta, J.M., 2019. *Long-term tree-ring derived carbon dynamics of an experimental plantation in relation to species and density in northwestern Ontario*. For. Ecol. Manage. 441: 229-241.
- Mottet, M.-J., G. Daoust et S.Y. Zhang, 2006. *Impact of the white pine weevil (Pissodes strobi (Peck)) on Norway spruce (Picea abies (L.) Karst.) plantations. Part 2: Lumber properties*. For. Chron. 82(6): 834-843. [<https://doi.org/10.5558/tfc82834-6>]
- [NLGA] National Lumber Grades Authority, 2017 *Règles de classification pour le bois d'œuvre canadien*. La commission nationale de classification des sciages.
- 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*. Fourth Edition. McGraw-Hill. New York, NY (États-Unis). 722 p.
- Pfister, O., C. Wallentin, U. Nilsson et P.-M. Ekö, 2007. *Effects of wide spacing and thinning strategies on wood quality in Norway spruce (Picea abies) stands in southern Sweden*. Scand. J. For. Res. 22(4): 333-343. [<https://doi.org/10.1080/02827580701504951>]
- Prégent, G., G. Picher et I. Auger, 2010. *Tarif de cubage, tables de rendement et modèles de croissance pour les plantations d'épinette blanche au Québec*. Gouvernement du Québec, ministère des Ressources naturelles et de la Faune, Direction de la recherche forestière. Mémoire de recherche forestière n° 160. 73 p.  
[<https://mffp.gouv.qc.ca/publications/forets/connaissances/recherche/Pregent-Guy/Memoire160.pdf>]
- Serban, L., en préparation. *Analyse financière de la forêt expérimentale de Madawaska pour les plantations d'épinette noire*.
- Sjolte-Jorgensen, J., 1967. *The influence of spacing on the growth and development of coniferous plantations*. Int. Rev. For. Res. 2: 43-94. [<https://doi.org/10.1016/B978-1-4831-9976-4.50008-X>]
- Smith, R.G.B., K. Glencross, J.D. Nichols, G. Palmer et R. Viranamangga, 2015. *Effect of initial spacing on first thinning product recovery, and financial outcomes in whitewood (Endospermum medullosum) plantations in Vanuatu*. Small-scale For. 15(1): 45-49.  
[<https://doi.org/10.1007/s11842-015-9307-9>]
- Southern Forest Products Association, 2013. *Southern pine reference design values*. Southern pine use guide, 2013 edition. 3 p. [[https://www.southernpine.com/app/uploads/TABLE2\\_L1.pdf](https://www.southernpine.com/app/uploads/TABLE2_L1.pdf)]

- Tombleson, J.D., J.C. Grace et C.S. Inglis, 1990. *Response of radiata pine branch characteristics to site and stocking*. Dans : James, R.N. et G.L. Tarlton (éd.), *New approaches to spacing and thinning in plantation forestry*. New Zealand Forest Research Institute. FRI Bulletin n° 151: 229-231.
- Walker, J.F.C., B.G. Butterfield, J.M. Harris, T.A.G. Langrish et J.M. Uprichard, 1993. *Primary wood processing—Principles and practice* Chapman and Hall, London (Royaume-Uni). 595 p.
- Ward, C. et G. Prigent, en préparation. *La forêt expérimentale de Madawaska*.
- Watt, M.S., M.O. Kimberley, J.P. Dash, D. Harrison, J.J. Monge et L. Dowling. 2017. *The economic impact of optimising final stand density for structural saw log production on the value of the new zealand plantation estate*. For. Ecol. Manage. 406: 361-369. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2017.07.044>.
- Yang, C.K., 2002. *Impact of spacing on juvenile wood and mature wood properties of white spruce (Picea glauca)*. Taiwan J. For Sci. 17(1): 13-29.
- Yang, K.C. et G. Hazenberg, 1994. *Impact of spacing on tracheid length, relative density, and growth rate of juvenile wood and mature wood in Picea mariana*. Can. J. For. Res. 24(5): 996-1007. <https://doi.org/10.1139/x94-130>.
- Zhang, S., 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.
- Zhang, S.Y., Y.C. Lei et C. Bowling, 2005a. *Quantifying stem quality characteristics in relation to initial spacing and modeling their relationship with tree characteristics in black spruce (Picea mariana)*. North. J. Appl. For. 22(2): 85-93. <https://doi.org/10.1093/njaf/22.2.85>.
- Zhang, T., G. Chauret, I. Duchesne et R. Schneider, 2005b. *Maximisation de la valeur du pin gris*. Partenariat Innovation Forêt. Fiche technique. 4 p. <http://partenariat.gc.ca/wp-content/uploads/2015/07/OT-02.pdf>

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

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

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

Luca Serban, ing.f., Ph. D.

Martin Barrette, ing.f., Ph. D.

Service de la sylviculture et du rendement des forêts