

Titre :	Proposition d'un calendrier d'éclaircies pour la production de bouleaux à papier de gros diamètres
Auteur(s) :	Christian Godbout, ing.f., M. Sc., Ph. D.
Date :	Septembre 2019

1. Contexte

Le bouleau à papier (*Betula papyrifera* Marsh.) est une espèce de feuillu dont le bois d'œuvre est utilisé pour fins de sciage et de déroulage. Or, la qualité d'une bille de bois d'œuvre est liée à son diamètre. En effet, les meilleures classes de qualité de sciage et de déroulage exigent un diamètre minimal plus grand que celles de moindre qualité (Boulianne 2018, MFFP 2014, Rast *et al.* 1973, SPFSQ 2019). Dans les bétulaies à bouleau à papier n'ayant pas été aménagées, on ne trouve généralement que très peu de tiges qui ont les dimensions pour produire des billes de déroulage ou des billes de sciage de qualité (diamètre à hauteur de poitrine [DHP] $\geq 33,1$ cm pour la classe de qualité B, MFFP 2014). Par exemple, dans une bétulaie à bouleau à papier de classe d'âge de 70 ans et de type écologique FE32 située au Témiscamingue, seulement 15 bouleaux à l'hectare présentaient un DHP $\geq 33,1$ cm, et un seul d'entre eux avait un DHP $\geq 39,1$ cm (classe de qualité A, MFFP 2014) (Godbout 2018). De même, dans une bétulaie à bouleau à papier de classe d'âge de 90 ans et de type écologique MJ22 située en Mauricie, 29 bouleaux/ha présentaient un DHP $\geq 33,1$ cm, et 7 d'entre eux avaient un DHP $\geq 39,1$ cm (Godbout, en préparation). Ainsi, si on aménage les bétulaies à bouleaux à papier pour la production de bois d'œuvre de grande qualité, il faut viser à maximiser le nombre de bouleaux à papier de gros diamètres plutôt que le volume à l'hectare.

L'éclaircie sélective d'arbres d'avenir (*crop tree management*) s'avère une méthode sylvicole pertinente pour la production de bouleaux à papier de gros diamètres et de qualité. Elle est orientée sur la sélection et l'éducation d'un certain nombre d'arbres d'avenir de bonne qualité plutôt que de l'ensemble des arbres du peuplement (Miller *et al.* 2008). Cette approche sylvicole cible d'abord l'arbre et non le peuplement (Hemery *et al.* 2008). Comme la séquence d'interventions sylvicoles s'applique sur un nombre réduit d'arbres sélectionnés, les coûts sont minimisés et les efforts ciblent les arbres destinés à produire le plus de valeur dans le futur (Martinot-Lagarde 1973).

On peut citer tout ou partie de ce texte en indiquant la référence

© Gouvernement du Québec

L'éclaircie sélective d'arbres d'avenir permet d'enlever les arbres qui restreignent le développement en largeur du houppier des bouleaux sélectionnés, tout en s'assurant de laisser sur pied les arbres qui ne leur nuiront pas jusqu'à la prochaine intervention et qui serviront à les élaguer naturellement, tout en contribuant à une partie du volume de bois récolté lors des éclaircies commerciales et de la coupe finale.

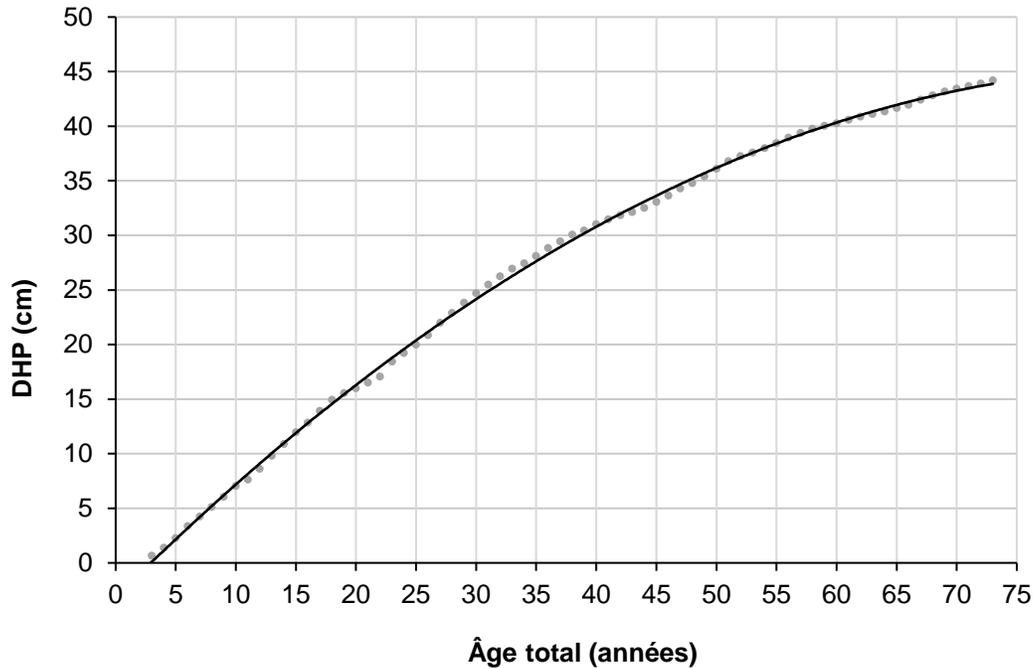
Mais quand devrait-on éclaircir une bétulaie à bouleau à papier, et comment détermine-t-on le nombre de tiges d'avenir à éclaircir? Le présent avis technique propose un calendrier d'éclaircies pour les bétulaies à bouleau à papier de même qu'une démarche pour déterminer le nombre de bouleaux d'avenir à éclaircir lorsque l'objectif est de maximiser la croissance en diamètre de cette essence.

2. Outils de calcul

Afin de construire un calendrier d'éclaircies et de déterminer le nombre de bouleaux d'avenir à éclaircir, deux outils sont nécessaires : 1) une courbe de référence de la croissance en diamètre d'un bouleau à papier libre de croître en fonction du temps, et 2) une courbe de référence de la largeur du houppier d'un bouleau à papier libre de croître en fonction de son DHP.

2.1. Croissance en diamètre d'un bouleau à papier libre de croître en fonction du temps

La figure 1 montre l'évolution de la croissance du DHP d'un bouleau à papier de 44 cm de DHP âgé de 73 ans. Ce bouleau a crû dans une bétulaie à bouleau à papier non aménagée au Témiscamingue, située dans le sous-domaine bioclimatique de l'érablière à bouleau jaune de l'Ouest (classe d'âge : 70 ans; type écologique : FE32; indice de qualité de station [IQS] : 18,4 m à 50 ans) (Godbout 2018). Ce bouleau était l'un des deux plus gros du peuplement (l'autre avait un DHP de 46 cm). C'est un arbre qui a crû en forêt en subissant peu de compétition, car il a atteint un gros diamètre pour son âge. La courbe de la figure 1 a été construite à partir des accroissements annuels mesurés sur un cylindre de bois prélevé sur le tronc à 1,3 m du sol à l'aide d'une tarière. Afin d'estimer le DHP avec écorce au fil du temps, les accroissements annuels ont été cumulés, transformés en proportion de leur somme, puis multipliés par la valeur du DHP. Deux années ont été ajoutées à l'âge à 1,3 m du sol pour obtenir l'âge total, soit le même nombre d'années requis par un bouleau à papier pour atteindre 1,0 m de hauteur pour un IQS de 18 m (Pothier et Savard 1998). Cette courbe servira de référence pour déterminer l'évolution dans le temps du DHP d'un bouleau à papier libre de croître. Même si un seul arbre a servi pour construire cette courbe de référence, on s'attend à peu de variation entre des individus ayant le même âge et le même diamètre pour un IQS semblable, puisque la compétition a exercé peu d'influence sur la croissance observée.



$$DHP \text{ (cm)} = -0,0062 \times \text{âge}^2 + 1,1 \times \text{âge} - 3,2$$

$$\hat{\text{Age}} = 0,00073 \times DHP^3 - 0,0276 \times DHP^2 + 1,39 \times DHP + 1,75$$

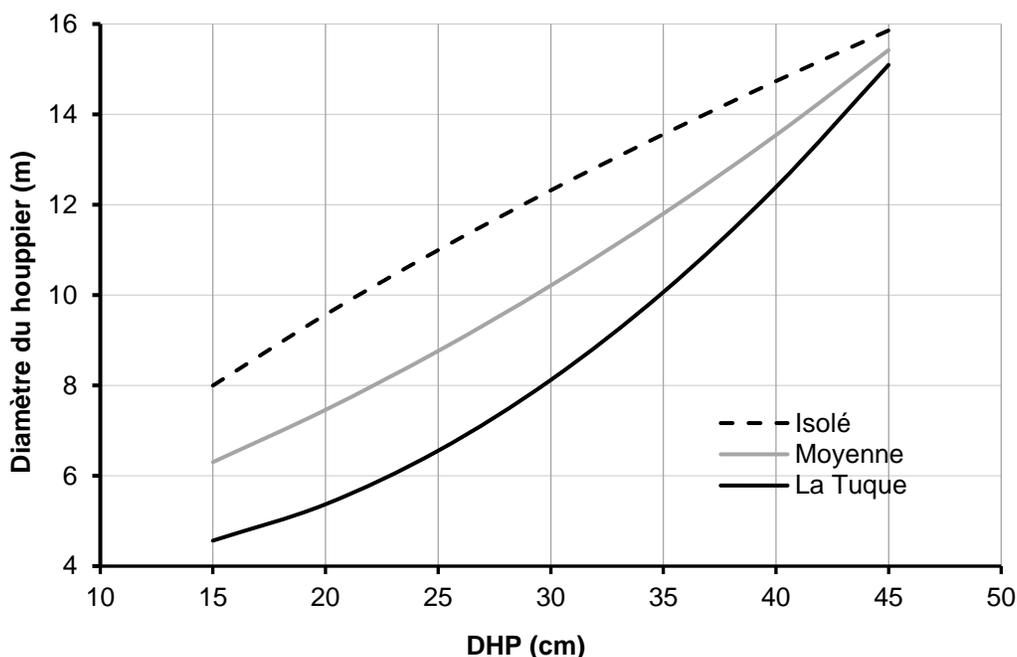
Figure 1. Évolution dans le temps du DHP avec écorce d'un bouleau à papier de DHP de 44 cm et âgé de 73 ans. Ce bouleau a crû librement dans une bétulaie à bouleau à papier non aménagée au Témiscamingue, située dans le sous-domaine bioclimatique de l'érablière à bouleau jaune de l'Ouest (classe d'âge : 70 ans; type écologique : FE32; IQS : 18,4 m à 50 ans). Les 2 équations permettent de déterminer le DHP du bouleau à un âge donné, et inversement, de déterminer à quel âge le bouleau atteint un DHP donné.

2.2. Évolution du diamètre du houppier d'un bouleau à papier en croissance libre en fonction du DHP

La figure 2 présente trois courbes de l'évolution du diamètre du houppier d'un bouleau à papier en fonction de son DHP. L'une représente l'évolution du diamètre du houppier d'un bouleau à papier poussant isolément (Russell et Weiskittel 2011); ces valeurs constituent les dimensions maximales que peut atteindre le houppier du bouleau à papier pour un DHP donné. Cependant, ces valeurs ne peuvent être atteintes en forêt, sauf si un arbre est suffisamment distancé des autres pour que la lumière latérale ne soit pas bloquée. Une seconde courbe représente les plus grands diamètres de houppier de bouleaux à papier observés dans une bétulaie à bouleau à papier non aménagée à La Tuque selon leur DHP¹; cette courbe fournit une estimation des dimensions du houppier de bouleaux à papier qui ont crû avec peu de compétition. Malgré tout, on peut présumer que plus les DHP des bouleaux de ce peuplement non aménagé étaient petits, plus ces arbres ont subi l'effet de la compétition — sans quoi ils auraient atteint un DHP de 45 cm au même titre que ceux qui ont crû avec peu de compétition. Cette deuxième courbe sous-estime donc le diamètre du

¹ Les valeurs observées pour l'ensemble des bouleaux à papier du peuplement, de même que le choix des valeurs pour construire la courbe de référence, sont présentées à l'annexe 1.

houppier, en particulier pour les arbres de petit DHP. On remarque d'ailleurs que l'écart entre cette courbe et la précédente s'amenuise pour les gros DHP. Afin de tenter de corriger cette sous-estimation, et ainsi se rapprocher de la courbe que suivraient des bouleaux à papier libres de croître en peuplement forestier, la moyenne des valeurs des deux courbes a été calculée (figure 2). Cette troisième courbe (moyenne) se veut une estimation qui se rapproche certainement des vraies valeurs, quoique celles-ci restent à mesurées. Elle sera utilisée pour estimer le **diamètre maximal** du houppier des bouleaux à papier libres de croître en peuplement forestier. Quant à la courbe de La Tuque, basée sur des valeurs observées en présence d'une certaine compétition, elle sera utilisée pour estimer le **diamètre minimal** du houppier des bouleaux libres de croître. Les valeurs de ces deux dernières courbes (courbe moyenne et courbe de La Tuque) serviront de balises pour estimer l'espacement à laisser entre les bouleaux à papier pour qu'ils soient libres de croître (section 4).



Arbre isolé : $DiamètreHouppier = 1,48 \times DHP^{0,623}$
Moyenne : $DiamètreHouppier = 0,0029 \times DHP^2 + 0,13 \times DHP + 3,7$
La Tuque : $DiamètreHouppier = 0,0076 \times DHP^2 - 0,105 \times DHP + 4,4$

Figure 2. Évolution du diamètre du houppier d'un bouleau à papier en fonction de son DHP, selon qu'il s'agit d'un arbre isolé, d'un arbre issu du peuplement de La Tuque (voir l'annexe 1) ou de la moyenne des deux.

2.3. Calcul du nombre de bouleaux à l'hectare

En connaissant le diamètre du houppier des bouleaux à papier, on peut calculer le nombre maximal d'arbres que peut loger une superficie de 1 hectare.

Lorsque la disposition spatiale des bouleaux est en carré (figure 3a), la distance de centre à centre entre les houppiers de deux arbres voisins est identique pour toutes les colonnes ou les rangées. La superficie utilisée par chaque arbre est un carré dont les côtés ont la dimension du diamètre du houppier. En divisant cette superficie par celle d'un hectare, on obtient le nombre de bouleaux qu'un hectare peut loger. Par exemple, si le houppier a un diamètre de 10 m, il occupe une superficie carrée de $10 \text{ m} \times 10 \text{ m} = 100 \text{ m}^2$ et le nombre de bouleaux par hectare sera de $10\,000 \text{ m}^2 \div 100 \text{ m}^2 = 100$.

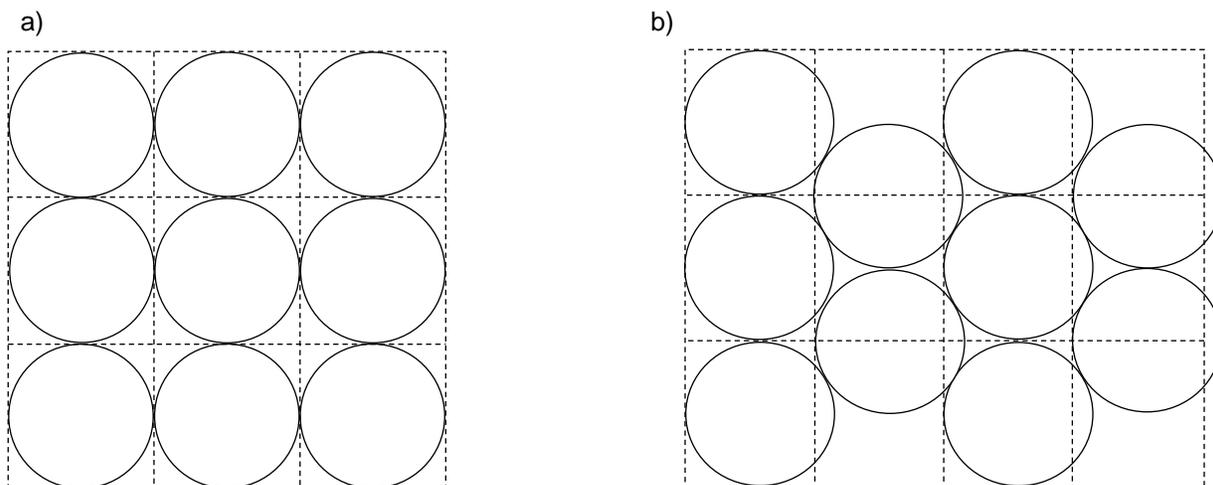
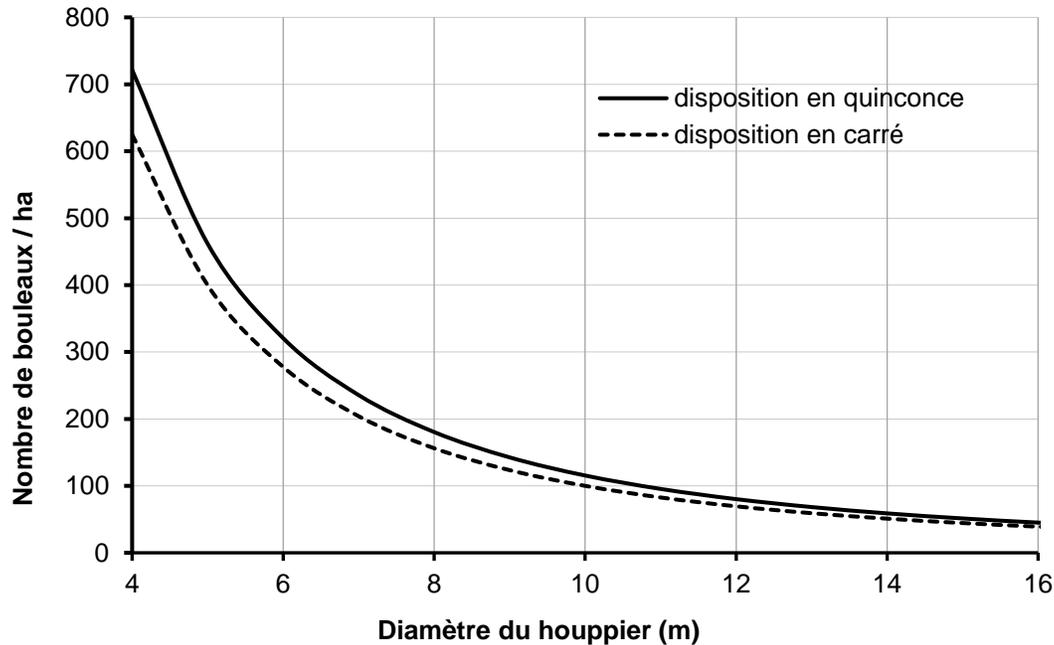


Figure 3. Schémas de disposition spatiale des houppiers des bouleaux à papier pour le calcul du nombre de bouleaux à l'hectare. a) Disposition en carré; b) Disposition en quinconce.

Lorsque la disposition spatiale des bouleaux est en quinconce (figure 3b), aussi appelée en triangle (Schütz 1990, p. 181), la distance de centre à centre entre 2 arbres voisins est identique selon la diagonale ou la verticale, mais non selon l'horizontale. Ainsi, les arbres sont plus rapprochés que pour la disposition en carré, ce qui permet de maximiser le nombre d'arbres pour une superficie donnée. La superficie orthogonale utilisée par chaque arbre est un rectangle dont la longueur correspond au diamètre du houppier et la largeur, à la racine carrée des trois quarts du carré du diamètre du houppier ($\sqrt{0,75 \times D_H^2}$). Par exemple, si le houppier a un diamètre de 10 m, il occupe une superficie rectangulaire de $10 \times \sqrt{(0,75 \times 10 \times 10)} = 86,6 \text{ m}^2$. Le nombre de bouleaux sera de $10\,000 \div 86,6 = 155,5/\text{ha}$, soit 15,5 % plus de tiges que pour la disposition spatiale en carré (Schütz 1990).

La figure 4 présente la courbe du nombre d'arbres qu'une superficie d'un hectare peut loger en fonction du diamètre du houppier, pour ces deux schémas de disposition spatiale. En combinant la courbe de La Tuque et la courbe moyenne de la figure 2 avec la courbe de la disposition en carré de la figure 4, on obtient les limites supérieure et inférieure de l'estimation du nombre maximal de bouleaux à papier libres de croître

qu'un hectare de forêt peut loger, en fonction du DHP de ces arbres, pour ce schéma de disposition en carré (figure 5). Par exemple, d'après ces courbes, pour une disposition en carré, un hectare pourrait supporter de 180 à 350 bouleaux de DHP de 20 cm libres de croître, ou de 55 à 65 bouleaux de DHP de 40 cm libres de croître.



Disposition en quinconce

$$\text{Nombre} = 10\,000 / \left(D_H \times \sqrt{0,75 \times D_H^2} \right), \text{ où } D_H = \text{diamètre du houppier};$$

$$D_H = \left((10\,000 / \text{Nombre})^2 \div 0,75 \right)^{0,25}$$

Disposition en carré

$$\text{Nombre} = 10\,000 / D_H^2$$

$$D_H = \sqrt{10\,000 / \text{Nombre}}$$

Figure 4. Nombre maximal de tiges/ha en fonction du diamètre du houppier de bouleaux libres de croître. Les équations permettent de déterminer le nombre maximal de bouleaux par hectare lorsque le diamètre du houppier est connu, et inversement, de déterminer le diamètre maximal du houppier lorsque le nombre de bouleaux par hectare est connu.

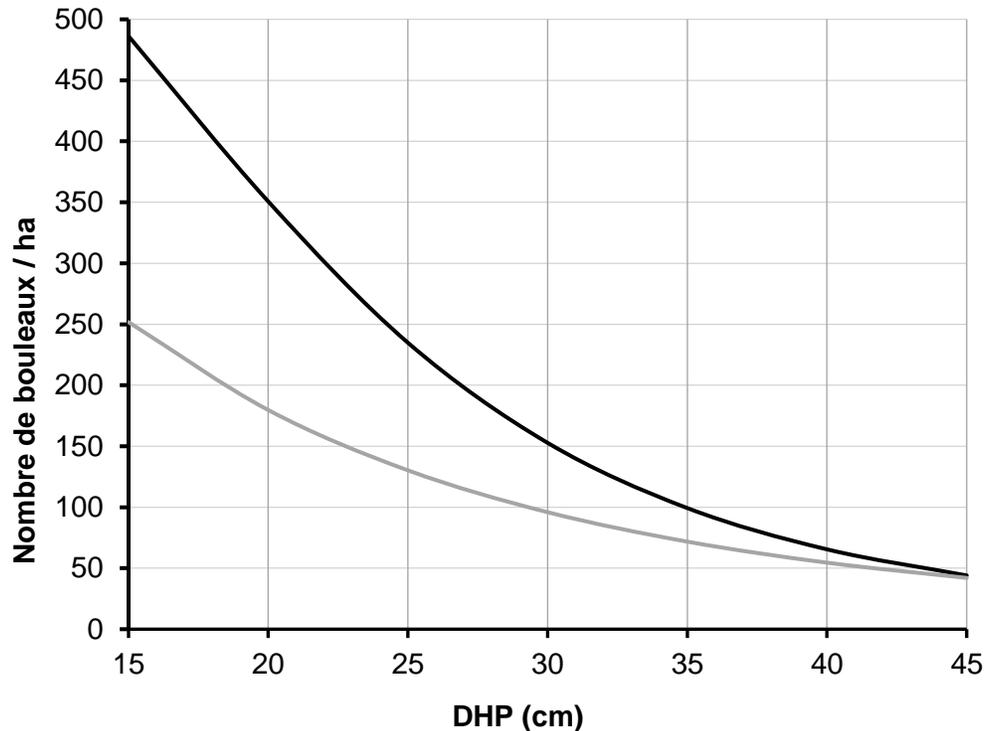


Figure 5. Limites supérieure (en noir) et inférieure (en gris) de l'estimation du nombre maximal de bouleaux à papier libres de croître par hectare en fonction du DHP, pour une disposition spatiale en carré. Les valeurs ont été calculées à partir des diamètres du houppier de la figure 2.

3. Proposition d'un calendrier d'éclaircie

Le tableau 1 présente un calendrier d'éclaircies qui permet d'optimiser dans le temps la classe de qualité des billes récoltées lors des éclaircies sur une station dont l'IQS qui se situerait autour de 18 à 19 m²/ha. Ce tableau repose sur les normes ministérielles de qualité des tiges d'essences feuillues (MFFP 2014), qui fixent une classe minimale de DHP pour chacune des classes de qualité (en l'occurrence, 40, 34 et 24 cm pour les classes de qualité A, B et C, respectivement²). Chacune de ces valeurs de DHP correspond aux diamètres minimaux au fin bout sans écorce des billes de sciage de bois feuillus de qualité F1, F2 et F3 des normes de classification américaines (Rast *et al.* 1973), qui sont respectivement de 13 po (33 cm), 11 po (28 cm) et 8 po (20 cm). Les billes de déroulage, quant à elles, sont regroupées dans une seule classe de qualité (A) selon les normes ministérielles de mesurage des billes de bois (Boulianne 2018), pour laquelle la classe minimale de diamètre au fin bout sans écorce des billes est de 28 cm. Selon la même correspondance, la classe de DHP minimale pour qu'un arbre puisse être classé comme bille de déroulage

² Dans les normes ministérielles, les valeurs de 40, 34 et 24 cm correspondent à des classes de DHP de 2 cm. Pour le calendrier présenté ici, elles seront considérées comme des valeurs de DHP, afin de simplifier la démarche proposée.

est de 34 cm. Il faut toutefois noter que pour l'industrie du bois d'œuvre, la valeur par m³ des billes de sciage et de déroulage progresse avec l'augmentation du diamètre au fin bout sans écorce des billes, jusqu'à un diamètre d'au moins 16 po (40 cm, SPFSQ 2019).

Tableau 1. Proposition d'un calendrier d'éclaircies pour une bétulaie à bouleau à papier avec un IQS de 18-19 m à 50 ans.

	Éclaircie précommerciale (EPC)	1^{re} éclaircie commerciale (EC1)	2^e éclaircie commerciale (EC2)	Coupe finale
DHP des arbres d'avenir	7 cm	24 cm	34 cm	40 cm
Âge	10 ans	30 ans	45 ans	60 ans
Classe de qualité maximale des billes		F3 (sciage)	Déroulage	Déroulage
			F2 (sciage)	F1 (sciage)

Divers scénarios sylvicoles peuvent être générés à partir du présent calendrier. Par exemple, on pourrait choisir de devancer ou de retarder la coupe finale, ou bien d'omettre une des deux éclaircies commerciales.

3.1. Éclaircie précommerciale (EPC)

Étant donné que le bouleau à papier amorce un pic de croissance en diamètre vers l'âge de 10 ans et que la moitié du DHP qu'il aura à 75 ans sera atteint à 25-30 ans (Godbout 2019), il est conseillé de pratiquer l'EPC vers l'âge de 10 ans afin que le bouleau à papier puisse exprimer son plein potentiel de croissance durant ce pic de croissance. Cette première éclaircie est la plus importante, car elle permet 1) de sélectionner les plus gros bouleaux à papier qui présentent le moins de défauts, 2) de les rendre relativement libres de croître pour atteindre rapidement un gros DHP (40 cm et plus), et 3) de leur faire acquérir un fût rectiligne en créant un puits de lumière. Elle a pour but de permettre à l'arbre de construire un fût sans branches sur une certaine hauteur tout en croissant bien (Hemery *et al.* 2008). Le DHP des bouleaux à papier sélectionnés à 10 ans comme arbres d'avenir devrait être d'environ 7 cm (figure 1), mais pourrait varier d'un bouleau éclairci à l'autre selon le degré de compétition subi avant l'EPC. Cette variation se répercutera sur la croissance subséquente des arbres éclaircis et donc, sur le temps requis pour atteindre le DHP cible de 24 cm pour la prochaine éclaircie.

3.2. Première éclaircie commerciale

Comme la classe minimale de DHP des arbres est de 24 cm pour la production de billes de sciage, une première éclaircie commerciale pourrait être pratiquée lorsque l'ensemble des bouleaux d'avenir éclaircis lors de l'EPC auront atteint ce DHP. Ainsi, la première éclaircie (EC1) permettra de récolter des billes de

sciage (qualité F3) plutôt que seulement du bois à pâte, si elle avait été pratiquée plus tôt. Cette EC1 est importante non pas pour la valeur du bois qui sera récolté, mais pour assurer une libre croissance aux bouleaux d'avenir jusqu'à la prochaine intervention qui générera du bois de grande valeur. En quelque sorte, elle permet de façonner définitivement le jeune peuplement pour la production future de bois de grande valeur : d'abord, en réduisant la densité des bouleaux d'avenir; ensuite, en enlevant les arbres qui ont poussé entre les bouleaux d'avenir depuis l'EPC et qui ont nui ou qui nuiront au développement de leur houppier jusqu'à la prochaine intervention sylvicole; finalement, en laissant ceux qui favoriseront l'élagage naturel des bouleaux d'avenir.

À cette étape, il est possible de bien anticiper le rendement futur en bois de qualité du peuplement, et de réajuster la planification des interventions sylvicoles, en comparant la croissance en diamètre obtenue à celle prévue par la courbe de croissance de la figure 1. Selon celle-ci, l'âge auquel cette EC1 est pratiquée, c'est-à-dire celui auquel les bouleaux d'avenir atteindront le DHP de 24 cm, se situe vers 30 ans.

3.3. Deuxième éclaircie commerciale

Une deuxième éclaircie (EC2) pourra être pratiquée lorsque les bouleaux à papier auront atteint la classe minimale de DHP pour générer des billes de qualité supérieure (sciage F2 et déroulage), soit 34 cm. Si elle était pratiquée avant l'atteinte de ce DHP, seules des billes de sciage de qualité F3 seraient récoltées, comme lors de l'EC1. L'EC2 permet la récolte d'un volume additionnel de bois et, qui plus est, de bois de qualité. Il faut viser à conserver sur pied les bouleaux dont le houppier occupe environ la moitié de la hauteur de l'arbre et jamais moins du tiers, sans quoi leur croissance en diamètre sera moindre que celle prévue à la figure 1. Selon cette figure, l'âge auquel l'EC2 serait pratiquée, c'est-à-dire l'âge auquel les bouleaux atteindront le DHP de 34 cm, se situe vers 45 ans.

3.4. Coupe finale

La coupe finale devrait être pratiquée lorsque les bouleaux à papier auront atteint ou dépassé la classe minimale de DHP de 40 cm, soit celle de la meilleure classe de qualité de tige sur pied (MFFP 2014). Ces arbres généreront des billes de grande qualité (sciage F1 et déroulage), avec une proportion importante de bois exempt de nœuds. On peut aussi choisir de retarder la coupe finale pour produire des bouleaux de DHP de 45 cm ou plus afin de générer un plus grand volume de bois de grande qualité, prisé par l'industrie forestière. L'âge auquel la coupe finale sera pratiquée dépendra du diamètre fixé pour la coupe finale. Par exemple, si le DHP est fixé à 45 cm, la coupe finale se ferait vers 75 ans, selon la courbe de croissance de la figure 1.

4. Détermination de l'espacement entre les bouleaux à papier d'avenir à éclaircir pour une croissance libre des houppiers

4.1. Démarche théorique

La distance à laisser entre les bouleaux à papier d'avenir lors d'une EC correspondra au diamètre du houppier que des bouleaux d'avenir libres de croître auraient atteint d'ici la prochaine intervention sylvicole. De cette façon, on libère l'espace nécessaire au développement libre du houppier jusqu'à la prochaine intervention, ce qui maximisera la croissance en diamètre des arbres. Il faut donc connaître d'avance le DHP des bouleaux d'avenir de la prochaine intervention pour être en mesure de calculer le diamètre de leur houppier, et ainsi de fixer la distance à laisser entre les arbres d'avenir de la présente intervention. Par exemple, sur la base du calendrier d'éclaircies proposé au tableau 1, si l'on décide de pratiquer une EPC à 10 ans et que l'on prévoit réaliser l'EC1 lorsque les bouleaux auront atteint un DHP de 24 cm, il faut déterminer le diamètre du houppier de bouleaux de 24 cm de DHP ayant crû librement. La figure 2 nous indique que ce diamètre de houppier se situe entre 6,3 m (courbe La Tuque) et 8,5 m (courbe moyenne). Cette étendue de valeurs correspond à la distance qui devrait séparer les bouleaux à papier d'avenir une fois l'EPC pratiquée, si l'on veut qu'ils demeurent libres de croître jusqu'à un DHP de 24 cm. Le nombre correspondant de bouleaux à papier d'avenir à éclaircir, pour une disposition en carré, varie de 139 à 255 tiges/hectare (figure 4).

On peut aussi déterminer l'espacement entre les bouleaux d'avenir en fonction du moment de la prochaine intervention plutôt que du DHP. Par exemple, si l'on décide de pratiquer une EC1 à 30 ans et que la prochaine intervention prévue est une coupe finale à 60 ans, on détermine le DHP des bouleaux à papier à 60 ans à l'aide de la figure 1 (dans ce cas-ci : 40 cm), puis on calcule le diamètre du houppier correspondant à ce DHP à l'aide de la figure 2 (dans ce cas-ci : de 12,4 m [courbe La Tuque] à 13,5 m [courbe moyenne]), qui correspond à l'espacement à laisser entre les bouleaux d'avenir. Le nombre de bouleaux à papier d'avenir correspondant à cet espacement varie de 55 à 65 tiges/ha pour une disposition en carré et de 63 à 76 tiges/ha pour une disposition en quinconce (figure 4).

Le tableau 2 présente la distance à laisser entre les bouleaux d'avenir éclaircis ainsi que le nombre résultant de tiges à l'hectare pour une disposition spatiale en carré, d'après les courbes présentées dans les figures 2, 3 et 4. Pour ces deux variables (distance et nombre), la variation découle de l'incertitude entourant le diamètre du houppier associé à un DHP donné (figure 2).

Outre les bouleaux d'avenir éclaircis, il est primordial de conserver d'autres arbres plus petits (bouleaux à papier et autres essences désirées, y compris des résineux) entre les bouleaux éclaircis. Cela favorise l'élagage naturel des bouleaux d'avenir et permet d'utiliser l'espace disponible créé lors des EC pour produire du bois à pâte ou du bois d'œuvre supplémentaire, tout en fournissant des arbres de remplacement s'il survient de la mortalité parmi les arbres d'avenir.

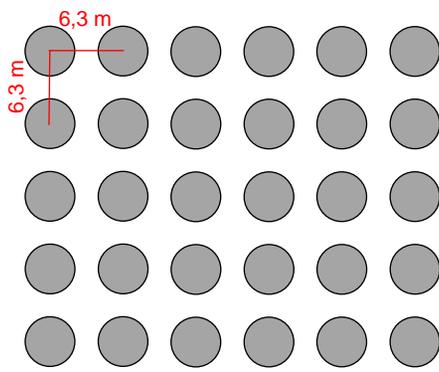
Tableau 2. Calendrier d'éclaircies proposé au tableau 1 précisant la distance à laisser entre les bouleaux d'avenir éclaircis pour une croissance libre des houppiers, de même que le nombre d'arbres résultant à l'hectare pour une disposition spatiale en carré.

	Éclaircie précommerciale (EPC)	1 ^{re} éclaircie commerciale (EC1)	2 ^e éclaircie commerciale (EC2)	Coupe finale
DHP	7 cm	24 cm	34 cm	40 cm
Âge	10 ans	30 ans	45 ans	60 ans
Distance entre les bouleaux d'avenir	6,3 à 8,5 m	9,6 à 11,5 m	12,4 à 13,5 m	
Nombre de bouleaux d'avenir (tiges/ha)	139 à 255	76 à 108	55 à 65	

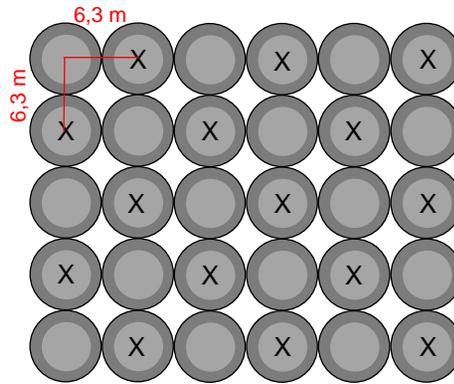
4.2. Contexte pratique

En pratique, l'espacement des bouleaux d'avenir défini par la démarche théorique se concrétisera à l'EPC, qui fixera définitivement la position de chacun des bouleaux d'avenir pour toute la vie du peuplement. Comme les EC subséquentes cibleront toujours les bouleaux d'avenir et non les arbres pouvant se trouver entre ceux-ci, à moins de mortalité d'arbres d'avenir, elles devront donc se faire en tenant compte de ces positions établies à l'EPC.

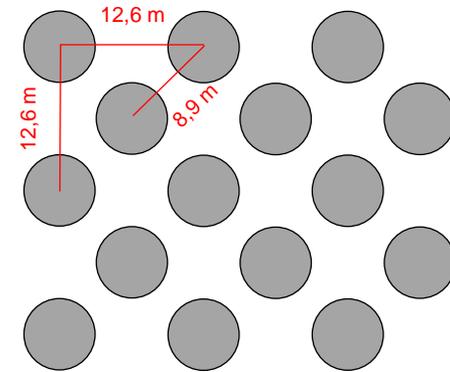
Par exemple, dans le calendrier d'éclaircies du tableau 2, on note que le nombre de bouleaux d'avenir éclaircis diminue à peu près de moitié entre l'EPC (139 à 255 tiges/ha) et l'EC1 (76 à 108 tiges/ha), ce qui correspond, *grosso modo*, à l'enlèvement de 1 arbre d'avenir sur 2 ($139 \div 2 = 70$ et $255 \div 2 = 128$; un nombre de 70 à 128 bouleaux d'avenir éclaircis, ce qui correspond assez bien aux valeurs préconisées de 76 à 108 bouleaux d'avenir). De même, à l'EC2, il est indiqué de laisser de 55 à 65 bouleaux d'avenir éclaircis sur les 76 à 108 éclaircis lors de l'EC1. **En pratique, le rapport de prélèvement obtenu en enlevant 1 bouleau d'avenir sur 2 lors de chacune des EC permet aux bouleaux d'avenir éclaircis de développer leur houppier de façon symétrique pour un schéma de disposition initiale (après EPC) en carré** (figure 6). En effet, les houppiers sont complètement détournés après chacune des éclaircies et peuvent croître librement sur tout leur pourtour, ce qui ne serait pas le cas si la disposition initiale était en quinconce (annexe 2). Cette dernière disposition, même si elle permet 15 % plus de tiges à l'hectare que la disposition en carré, ne permet pas de détourner complètement les houppiers par le prélèvement de 1 bouleau d'avenir sur 2, ce qui nuira au développement du houppier et ralentira la croissance du DHP.



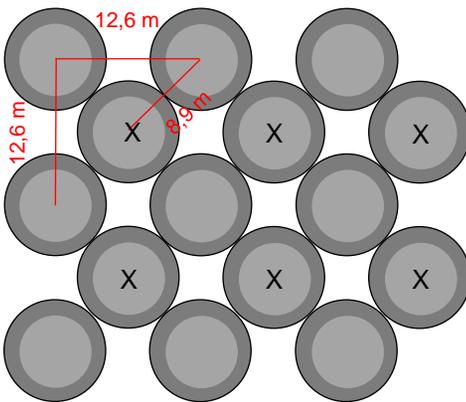
1. Après EPC (250 bouleaux/ha)



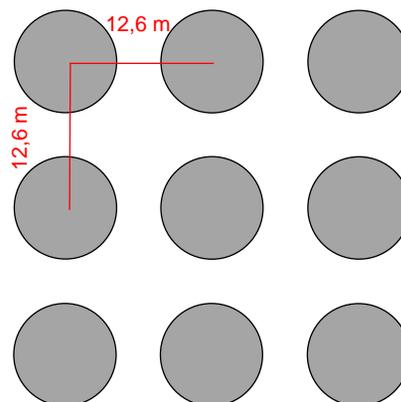
2. Avant EC1 (DHP : 24 cm)



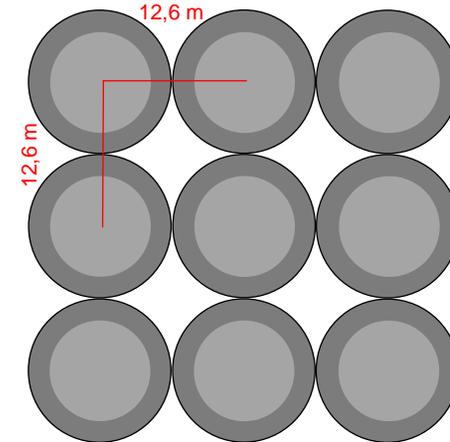
3. Après EC1 (125 bouleaux/ha)



4. Avant EC2 (DHP : 34 cm)



5. Après EC2 (62,5 bouleaux/ha)



6. Avant coupe finale (DHP : 44 cm)

Figure 6. Évolution de la disposition spatiale des houppiers des bouleaux d'avenir éclaircis en fonction des interventions sylvicoles pour un calendrier à 3 éclaircies avec une disposition initiale (après EPC) en carré de 250 bouleaux/ha et un prélèvement de 1 tige sur 2 lors des EC. Les houppiers marqués d'un « X » dans les représentations avant éclaircie correspondent aux arbres qui seront coupés lors de l'éclaircie. Les cercles gris foncé dans les représentations avant intervention (EC et coupe finale) correspondent à l'accroissement en diamètre du houppier depuis la dernière éclaircie. Les lignes rouges indiquent la distance entre les arbres; pour les schémas n° 3 et 4, la distance oblique de 8,9 m peut être calculée en utilisant l'équation $\sqrt{12,6^2 + 12,6^2} / 2$ ou $(\sqrt{8} \times 6,3) / 2$.

Les tableaux 3 et 4 présentent deux exemples de calendrier pour un scénario comprenant une EPC à 10 ans, 2 EC lorsque le DHP des bouleaux d'avenir auront atteint 24 cm et 34 cm, et d'une coupe finale. Le tableau 3 présente un calendrier d'éclaircies dans lequel 250 bouleaux d'avenir par hectare sont éclaircis par l'EPC suivant une disposition spatiale en carré. Ainsi, avec 250 bouleaux d'avenir éclaircis lors de l'EPC, on obtient un espacement de 6,3 m, ce qui correspond au minimum des distances théoriques à respecter (de 6,3 à 8,5 m) pour une libre croissance jusqu'à un DHP de 24 cm. Le DHP estimé à ce moment est de 7 cm (figure 1). Lorsque les bouleaux d'avenir auront atteint un DHP de 24 cm, soit vers l'âge de 30 ans (29 ans, figure 1), une première éclaircie (EC1) sera pratiquée pour récolter la moitié des 250 bouleaux. Les 125 restants disposeront alors d'un espacement (en diagonale) de 8,9 m (soit $(\sqrt{8} \times 6,3 \text{ m}) / 2$, figure 6) avant que les houppiers se touchent, ce qui est légèrement sous la valeur minimale des distances théoriques à respecter (de 9,6 à 11,5 m) pour permettre une libre croissance jusqu'à un DHP de 34 cm. La croissance en diamètre en sera légèrement affectée, et quelques années supplémentaires pourraient être nécessaires pour l'atteinte du DHP cible de 34 cm. Lorsque les bouleaux d'avenir auront atteint un DHP de 34 cm, soit vers l'âge de 45 ans (46 ans, figure 1), une deuxième éclaircie (EC2) sera pratiquée pour récolter la moitié des 125 bouleaux. Les 63 restants seront alors également espacés de 12,6 m (figure 6), ce qui est légèrement moins que la valeur minimale des distances théoriques à respecter (de 12,4 à 13,5 m) pour une libre croissance jusqu'à un DHP de 40 cm. Lorsque les bouleaux d'avenir auront atteint un DHP de 40 cm, soit vers l'âge de 60 ans (figure 1), la coupe finale sera pratiquée.

Tableau 3. Calendrier d'éclaircies basé sur les cibles de DHP du tableau 1, pour lequel 250 bouleaux d'avenir par hectare seront éclaircis après l'EPC, avec une disposition spatiale en carré.

	Éclaircie précommerciale (EPC)	1^{re} éclaircie commerciale (EC1)	2^e éclaircie commerciale (EC2)	Coupe finale
DHP	7 cm	24 cm	34 cm	40 cm
Âge	10 ans	30 ans	45 ans	60 ans
Distance entre les bouleaux d'avenir	6,3 m	8,9 m	12,6 m	
Distance entre les arbres nécessaire pour une croissance libre des houppiers	6,3 à 8,5 m	9,6 à 11,5 m	12,4 à 13,5 m	
Nombre maximal de bouleaux d'avenir (tiges/ha)	250	125	63	62

Tableau 4. Calendrier d'éclaircies inspiré des cibles de DHP du tableau 1, pour lequel 200 bouleaux d'avenir par hectare seront éclaircis après l'EPC, avec une disposition spatiale en carré.

	Éclaircie précommerciale (EPC)	1^{re} éclaircie commerciale (EC1)	2^e éclaircie commerciale (EC2)	Coupe finale
DHP	7 cm	24 cm	34 cm	44 cm
Âge	10 ans	30 ans	45 ans	75 ans
Distance entre les bouleaux d'avenir	7,1 m	10,0 m	14,2 m	
Distance entre les arbres nécessaire pour une croissance libre des houppiers	6,3 à 8,5 m	9,6 à 11,5 m	14,5 à 15,0 m	
Nombre maximal de bouleaux d'avenir (tiges/ha)	200	100	50	50

Le tableau 4 présente un calendrier d'éclaircies dans lequel 200 bouleaux d'avenir par hectare sont éclaircis par l'EPC suivant une disposition spatiale en carré. La réduction du nombre de bouleaux de 250 à 200 à l'hectare lors de l'EPC vise à ce qu'à la coupe finale, les bouleaux d'avenir atteignent un DHP de plus de 40 cm, soit 44 cm. Ainsi, avec 200 bouleaux d'avenir éclaircis lors de l'EPC, on obtient un espacement de 7,1 m, ce qui cadre bien dans l'étendue des distances théoriques à respecter de 6,3 à 8,5 m pour une libre croissance jusqu'à un DHP de 24 cm. Le DHP estimé à ce moment est de 7 cm (figure 1). Lorsque les bouleaux d'avenir auront atteint un DHP de 24 cm, soit vers l'âge de 30 ans (29 ans, figure 1), une première éclaircie (EC1) sera pratiquée pour récolter la moitié des 200 bouleaux. Les 100 restants disposeront alors d'un espacement (en diagonale) de 10,0 m (soit $(\sqrt{8} \times 7,1\text{m}) / 2$, figure 6) avant que les houppiers se touchent, ce qui est un peu moins que la valeur minimale de l'étendue des valeurs théoriques de 9,6 à 11,5 m pour une libre croissance jusqu'à un DHP de 34 cm. Lorsque les bouleaux d'avenir auront atteint un DHP de 34 cm, soit vers l'âge de 45 ans (46 ans, figure 1), une deuxième éclaircie (EC2) sera pratiquée pour récolter la moitié des 100 bouleaux. Les 50 restants seront alors également espacés de 14,2 m (figure 6), ce qui est un peu moins que la valeur minimale des distances théoriques à respecter de 14,5 à 15,0 m pour une libre croissance jusqu'à un DHP de 44 cm. Lorsque les bouleaux d'avenir auront atteint un DHP de 44 cm, soit vers l'âge de 75 ans (72 ans, figure 1), la coupe finale sera pratiquée.

5. Les modalités d'application de l'éclaircie précommerciale

En principe, l'EPC devrait être pratiquée en plein, c'est-à-dire que tous les arbres autres que les bouleaux d'avenir éclaircis devraient être coupés afin d'éliminer la concurrence avec les arbres environnants et procurer l'espace nécessaire au développement du houppier jusqu'à l'EC1. Les arbres feuillus (bouleaux, peupliers, érables) coupés vont produire des rejets de souche qui créeront une strate inférieure qui favorisera leur élagage naturel. Cependant, pour plusieurs années suivant l'EPC, les bouleaux d'avenir éclaircis seront à risque de pencher, de plier, de briser ou de casser à la suite d'épisodes de verglas, de neige mouillante ou de grands vents. De plus, ils pourraient conserver leurs branches basses et développer de grosses branches si la strate inférieure n'est pas suffisamment dense, ce qui diminuerait la qualité du bois et pourrait éventuellement entraîner une coloration de cœur (non souhaitable) lors de l'élagage (naturel ou artificiel) de ces grosses branches (Belleville *et al.* 2008, 2011, Niemistö *et al.* 2019).

Dans ce contexte, l'EPC par puits de lumière représente une avenue plus prudente. Même si l'on recherche la croissance maximale en diamètre, les arbres d'avenir doivent former un fût sans branches sur une certaine longueur (5 m), ce qui constituera la bille de pied de grande valeur lors de la récolte. Cependant, lors de l'EPC, il est essentiel d'enlever tous les peupliers, autant dans les puits de lumière qu'à l'extérieur de ceux-ci, car ils poussent plus rapidement que le bouleau à papier et nuisent considérablement à sa croissance (LaBonté et Nash 1978). Idéalement, il faudrait aussi couper ou étêter les arbres feuillus situés entre les puits de lumière qui sont susceptibles de nuire au développement en largeur du houppier des bouleaux d'avenir éclaircis jusqu'à l'EC. Les tiges plus basses doivent impérativement être laissées sur pied afin de remplir l'espace entre les bouleaux d'avenir éclaircis et favoriser l'élagage de leur fût. En même temps, il faut viser à maintenir chez les arbres d'avenir un houppier sur environ la moitié de leur hauteur. Les espèces résineuses ne devraient pas être enlevées, puisqu'elles croissent moins rapidement que le bouleau à papier et qu'en raison de la forme conique de leur houppier, elles offrent moins de concurrence au développement des houppiers des bouleaux d'avenir.

L'EPC par puits de lumière risque d'entraîner une concurrence plus forte que souhaité entre les houppiers des bouleaux d'avenir. Si les houppiers n'atteignent pas un diamètre aussi grand que celui défini dans le calendrier proposé, la croissance en diamètre des tiges sera moindre que prévu. Plus cette concurrence s'exercera tard durant cette période entre l'EPC et l'EC, moins la croissance en diamètre en sera affectée et plus elle pourra reprendre un rythme accéléré après l'EC. Comme cette concurrence variera entre les bouleaux d'avenir, le DHP des bouleaux d'avenir sera plus variable, lui aussi. Dans un tel cas, avant de pratiquer l'EC, il faudra alors décider d'attendre ou non que l'ensemble des bouleaux aient atteint un $DHP \geq 24$ cm, quitte à générer moins de bois de sciage. À partir de l'EC1, le peuplement sera bien défini, le détournement des houppiers sera réalisé et le calendrier d'éclaircies sera plus facile à prévoir.

Si l'élagage naturel est déficient, il pourrait être nécessaire d'élaguer artificiellement les arbres d'avenir avant l'EC1 pour enlever les branches basses. Le fait d'éclaircir entre 200 et 250 bouleaux à l'hectare lors de l'EPC (au lieu de 400, comme il est souvent préconisé) réduira les coûts de cette intervention. De plus, puisque la moitié de ces bouleaux seront coupés lors de l'EC1, alors que les bénéfices de l'élagage sur la qualité des billes ne se seront pas encore concrétisés (laps de temps trop court pour la production de bois sans nœuds et faible qualité de billes de sciage [F3] en raison de leur petit diamètre), on peut n'élaguer que les arbres qui resteront sur pied après l'EC1, soit un bouleau sur deux.

Lors de l'EPC, il faudra s'assurer de respecter le plus possible une distribution en carré des arbres d'avenir éclaircis (figure 3a) afin que l'espace créé par les EC pour le développement des houppiers soit le plus régulier possible. Par exemple, la distance de 6,3 m proposée au tableau 3 correspond à celle à laisser entre les rangées de bouleaux d'avenir éclaircis et entre ceux d'une même rangée, mais ne constitue pas un rayon de dégagement, comme ce serait le cas pour une distribution en quinconce (figure 3b). Martinot-Lagarde et Perrotte (1973) décrivent une technique pour réaliser une distribution en carré des arbres sur le terrain.

6. Discussion

6.1. *Éclaircie commerciale basée sur le DHP des arbres*

Un scénario d'EC basé sur le diamètre des arbres plutôt que sur leur âge permet de mieux planifier la valeur potentielle des billes produites. Le fait de planifier les EC et la récolte finale en fonction de l'atteinte du DHP minimal par classe de qualité d'arbre sur pied (24, 34 et 40 cm, respectivement; MFFP 2014), permet de profiter du changement de classe, donc de l'augmentation de la valeur de l'arbre, dès qu'il se produit. L'apport de revenus dans le temps est ainsi optimisé, ce qui constitue un élément-clé de la rentabilité des scénarios d'éclaircies (Tahvonen *et al.* 2013).

6.2. *Ajustements des temps pour l'atteinte des DHP cibles.*

Le calendrier d'éclaircies proposé dans cet avis technique permet d'optimiser la récolte de bois de qualité, car il est basé sur le DHP minimal de chacune des classes de qualité des tiges d'essences feuillues. Dans ce calendrier, c'est le DHP des bouleaux à papier qui détermine le moment d'intervenir par une EC. Comme l'objectif sous-jacent est de produire des bouleaux à papier de DHP ≥ 40 cm à l'âge de 60-70 ans, ce scénario mise une croissance rapide des arbres d'avenir, et donc, sur des bouleaux à papier dont le houppier est libre de croître. Si le développement du houppier n'est pas optimal, la croissance en diamètre sera plus faible et le temps pour atteindre un DHP donné sera plus long que ce que le calendrier prévoit. De même, si l'IQS de la station est plus faible, le temps sera plus long entre chacune des EC et avant la coupe finale. Le calendrier pourrait alors être modifié pour des interventions sylvicoles plus espacées dans le temps, comme à 10, 35, 50 et 70 ans, ou même à 10, 35, 60 et 90 ans, plutôt qu'à 10, 30, 45 et 60 ans

(tableau 3). Étant donné que la coupe finale est la dernière intervention sylvicole d'un calendrier, elle pourra toujours être retardée pour produire des bouleaux avec de plus gros diamètres que prévu, sans pour autant nuire à d'autres étapes du calendrier. La croissance en diamètre pourrait alors ne plus être optimale, mais les houppiers seront suffisamment développés pour permettre une très bonne croissance.

Une courbe de croissance atteignant des valeurs plus élevées que celle de la figure 1 aurait pu être tracée si on avait cherché à représenter le potentiel maximal de croissance. Nous avons préféré nous en tenir à une croissance un peu plus modeste et plus réaliste pour l'ensemble des bouleaux d'avenir. Dans le cas de plantations, la courbe définie à la figure 1 pourrait cependant sous-estimer la croissance du DHP dans le temps.

6.3. Distance entre les bouleaux d'avenir.

La distance à laisser entre les bouleaux d'avenir à éclaircir pour obtenir la croissance souhaitée du DHP reste à être vérifiée en pratique. Il faut donc considérer les valeurs proposées comme des repères et non comme des absolus. Elles ne sont pas basées sur le suivi dans le temps de l'évolution du houppier de bouleaux à papier, mais plutôt sur la mesure à un moment donné du houppier de bouleaux à papier de différentes grosseurs. De plus, l'âge des bouleaux mesurés dans le peuplement de La Tuque variait de 65 à 100 ans, avec un pic entre 70 et 75 ans (Godbout, en préparation), alors que pour calculer la distance entre les bouleaux d'avenir, on utilise une courbe de croissance en diamètre basée sur un bouleau de 73 ans. Cela peut entraîner une sous-estimation de la valeur minimale du diamètre du houppier (et dans une moindre mesure, de la valeur maximale) des gros bouleaux à papier de la figure 2, car la mesure des houppiers peut avoir été faite sur des arbres ayant 10 ou 20 ans de plus que 73 ans. Le fait que les espacements proposés ne soient pas des valeurs uniques mais plutôt une étendue de valeurs permet de composer avec la distribution spatiale non uniforme des tiges en forêt naturelle.

6.4. Nombre de bouleaux d'avenir éclaircis lors de l'EPC.

Dans la fiche d'aide à la décision sur l'EC par puits de lumière de peuplement feuillus (Guillemette *et al.* 2014), il est suggéré d'éclaircir de 250 à 400 bouleaux à papier d'avenir à l'hectare. À la lumière des calculs effectués ci-dessus, une cible de 250 bouleaux d'avenir éclaircis ou même moins serait plus avisée que 400 à l'hectare, si aucune intervention n'est prévue avant une vingtaine d'années.

6.5. Nombre de bouleaux à papier de 40 cm et plus à 75 ans.

Dans un contexte sylvicole où l'on désire maximiser la croissance du bouleau à papier, il paraît souhaitable de connaître à quels âges ou à quels DHP les interventions sylvicoles auront lieu. Ceci permet de planifier la distance entre les bouleaux d'avenir éclaircis. Cette densité s'avère moins forte que ce que l'on pourrait croire au premier abord. Ainsi, il ne semble pas possible de produire plus de 55 à 65 bouleaux à papier à l'hectare qui ont un DHP de 40 cm à 60 ans. Si on allongait la période de

production, par exemple jusqu'à 90 ans, plus de bouleaux à papier de DHP de 40 cm pourraient être produits en augmentant le nombre de bouleaux d'avenir lors de l'EPC, puisqu'une croissance du DHP moins rapide, et par conséquent un houppier moins gros, serait nécessaire (Hein et Spiecker 2009).

6.6. *Production par les arbres d'accompagnement*

Il est important de comprendre que le nombre de bouleaux à papier d'avenir ne correspond pas nécessairement au nombre total de bouleaux à papier dans le peuplement, car d'autres bouleaux à papier qui occuperont une position sociale d'intermédiaire ou de codominant croîtront entre les arbres d'avenir qui, eux, seront dominants. Il faut bien sûr entretenir aussi les cohortes d'arbres (bouleau à papier ou autres) qui occupent des positions sociales inférieures, favorisent l'élagage naturel des bouleaux d'avenir éclaircis et occupent l'espace pour maximiser la production de bois, notamment dans les trouées créées après les EC. Toutefois, il faudrait viser à ce que le houppier des bouleaux d'avenir éclaircis demeure vivant sur la moitié de la hauteur de ces arbres, et toujours plus que le tiers.

6.7. *Pourridié-agaric*

Lors d'une EC réalisée dans une bétulaie à bouleau à papier de 70 ans au Témiscamingue (Godbout 2018), il a été observé que les sporophores du champignon de l'armillaire, champignon responsable de la maladie du pourridié-agaric, étaient 10 fois plus nombreux pendant les années suivant l'EC. La présence de souches vivantes permet à ce champignon de proliférer et augmente le risque d'infection des arbres résiduels après coupe. Cela pourrait expliquer, en partie du moins, le dépérissement du bouleau à papier après coupe partielle (Hall 1933, Roy *et al.* 2001, Tremblay 1999). Dans le calendrier d'éclaircies proposé, c'est à l'EC2 que ce problème peut être appréhendé, car plus les souches créées lors de l'éclaircie sont grosses, plus elles prennent de temps pour se décomposer et plus la population d'armillaire peut perdurer. Cependant, comme le pourridié-agaric est une maladie de faiblesse (qui atteint les arbres peu vigoureux), ce problème devrait être négligeable chez les bouleaux d'avenir éclaircis, qui sont en principe des arbres très vigoureux.

7. **Conclusions**

- En faisant coïncider les éclaircies commerciales avec l'atteinte, pour les arbres d'avenir, du DHP minimal requis en fonction des classes de qualité des billes de bois, on optimise la récolte de bois de qualité dans le temps.
- L'espacement laissé entre les arbres d'avenir devrait permettre la croissance libre du houppier jusqu'à la prochaine éclaircie (ou jusqu'à la coupe finale), si l'on désire obtenir une croissance en diamètre accélérée et soutenue.
- Le nombre de bouleaux à papier de 40 cm de DHP à 60 ans qu'un hectare peut contenir demeure relativement faible (55 à 65 tiges/ha pour une disposition en carré).

- La période entre l'EPC et la première EC contribue le plus à l'atteinte d'un gros DHP à 60 ans, mais c'est aussi la période où il y a le plus d'incertitude quant à la façon de réussir à maintenir pendant 20 ans une croissance en diamètre accélérée des bouleaux d'avenir tout en favorisant leur élagage naturel.

8. Références

- Belleville, B., A. Achim et A. Cloutier, 2008. *Analyse de la distribution et des sources d'initiation du cœur rouge à l'intérieur des tiges de bouleau à papier*. Université Laval, Centre de recherche sur le bois, Note de recherche n° 27. 2 p.
- Belleville, B., A. Cloutier et A. Achim, 2011. *Detection of red heartwood in paper birch (Betula papyrifera) using external stem characteristics*. Can. J. For. Res. 41: 1491-1499.
- Boulianne, M., 2018. *Manuel de mesurage des bois récoltés sur les terres du domaine de l'État. Exercice 2018-2019*. Gouvernement du Québec, ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs, Bureau de mise en marché des bois, Direction de la tarification et des opérations financières. 315 p. [https://bmmb.gouv.qc.ca/media/44518/manuel_de_mesurage.pdf]
- Godbout, C., 2018. *Éclaircie commerciale d'une bétulaie à bouleau à papier de 70 ans au Témiscamingue : résultats 10 ans après la coupe*. Gouvernement du Québec, ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs, Direction de la recherche forestière. Mémoire de recherche forestière n° 180. 41 p. [<https://www.mffp.gouv.qc.ca/documents/forets/recherche/Memoire180.pdf>]
- Godbout, C., 2019. *Mieux vaut éclaircir le bouleau à papier en bas âge!* Gouvernement du Québec, ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs, Direction de la recherche forestière. Avis de recherche n° 118. 2 p. [<https://mffp.gouv.qc.ca/documents/forets/recherche/Avis118.pdf>]
- Guillemette, F., S. Bédard et J. Gravel, 2014. *L'éclaircie précommerciale par puits de lumière de peuplements feuillus*. Gouvernement du Québec, ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs, Direction de l'aménagement et de l'environnement forestier et Direction de la recherche forestière. Fiche d'aide à la décision n° F-003. 4 p. [<https://mffp.gouv.qc.ca/publications/forets/entreprises/fiches/eclaircie-precommerciale-puits-lumiere-feuillus.pdf>]
- Hall, R.C., 1933. *Post-logging decadence in northern hardwoods*. University of Michigan, School of Forestry and Conservation, Bulletin n° 3. 63 p.
- Hein, S. et H. Spiecker, 2009. *Controlling diameter growth of common ash, sycamore and wild cherry*. Dans : Spiecker, H., S. Hein, K. Makkonen-Spiecker et M. Thies (éds). *Valuable broadleaved forests in Europe*. European Forest Institute, Research Report 22. p. 123-147.

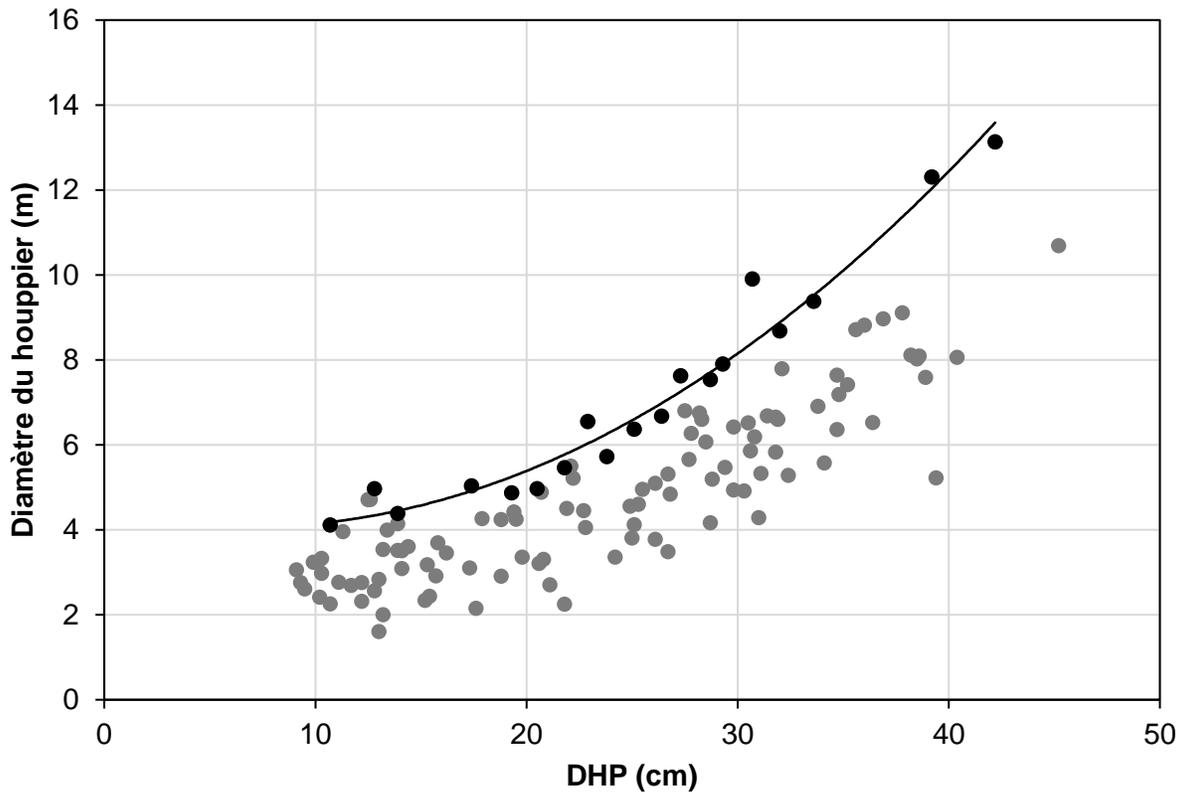
- Hemery, G., H. Spiecker, E. Aldinger, G. Kerr, C. Collet et S. Bell, 2008. *COST Action E42: Growing valuable broadleaved tree species*. Final Report. 40 p.
[http://www.valbro.uni-freiburg.de/pdf/COST_E42_Final_Report_2008.pdf]
- LaBonté, G.A. et R.W. Nash, 1978. *Cleaning and weeding paper birch—a 24-year case history*. J. For. 76(4): 223-225.
- Martinot-Lagarde, P., 1973. *Les arbres de place*. Bulletin technique de l'Office national des Forêts 4: 23-33.
- Martinot-Lagarde, P. et G. Perrotte, 1973. *La technique de désignation d'arbres de place par carré*. Bulletin technique de l'Office national des Forêts 4: 35-60.
- [MFFP] Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs, 2014. *Classification des tiges d'essences feuillues. Normes techniques. 2^e édition*. Gouvernement du Québec, ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs, Direction des inventaires forestiers. 98 p.
[<https://mffp.gouv.qc.ca/publications/forets/connaissances/classif-tiges-essence-feuillues-6.pdf>]
- Miller, G.W., J.W. Stringer et D.C. Mercker, 2008. *Technical guide to crop tree release in hardwood forests*. University of Tennessee Extension, Professional Hardwood Notes. Publication PB1774. 24 p.
[https://www.nrs.fs.fed.us/pubs/jrnl/2007/nrs_2007_miller_001.pdf]
- Niemistö P., H. Kilpeläinen et H. Heräjärvi, 2019. *Effect of pruning season and tool on knot occlusion and stem discolouration in Betula pendula—situation five years after pruning*. Silva Fenn. 53(1): 1-29.
- Pothier, D. et F. Savard, 1998. *Actualisation des tables de production pour les principales espèces forestière du Québec*. Gouvernement du Québec, ministère des Ressources naturelles, Direction de la recherche forestière. Code de diffusion RN98-3054. 183 p.
[<https://mffp.gouv.qc.ca/publications/forets/connaissances/actualisation-tables-production.pdf>]
- Rast, E.D., D.L. Sonderman et G.L. Gammon, 1973. *A guide to hardwood log grading*. U.S.D.A., For. Serv., Northeast. For. Exp. Sta., Gen. Tech. Rep. NE-1. 31 p.
[https://www.fs.fed.us/ne/newtown_square/publications/technical_reports/pdfs/scanned/gtr1.pdf]
- Roy, V., R. Jobidon et L. Blais, 2001. *Étude des facteurs associés au dépérissement du bouleau à papier en peuplement résiduel après coupe*. For. Chron. 77(3): 509-517.
- Russell, M.B. et A.R. Weiskittel, 2011. *Maximum and stand-level crown width equations for the major tree species in the Acadian Region*. North. J. Appl. For. 28(2): 84-91.
- Schütz, J.P., 1990. *Le problème de la sélection et du choix des arbres d'élite*. Dans : *Sylviculture 1. Principes d'éducation des forêts*. Presses polytechniques et universitaires romandes. Lausanne (Suisse). p. 176-184.

[SPFSQ] Syndicat des producteurs forestiers du sud du Québec, 2019. *Liste des prix du bois de sciage. Mise à jour au 10 janvier 2019*. L'arbre PLUS, janvier à mai 2019 : 9-14.
[<https://spbestrie.qc.ca/wp-content/uploads/2019/01/Le-Sciage-hiver-2019.pdf>]

Tahvonen, O., S. Pihlainen et S. Niinimäki, 2013. *On the economics of optimal timber production in boreal Scots pine stands*. Can. J. For. Res. 43: 719-730.

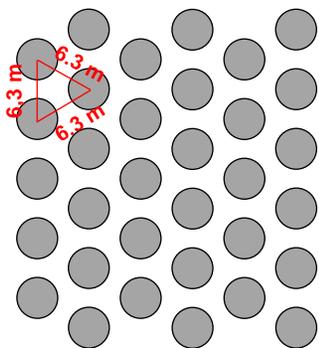
Tremblay, V., 1999. *Dendroécologie du dépérissement du bouleau blanc (Betula papyrifera Marsh.) après coupe forestière dans la réserve faunique des Laurentides*. Mémoire de maîtrise. Université Laval, Québec (Québec). 58 p.

Christian Godbout
Service de la sylviculture et du rendement des forêts

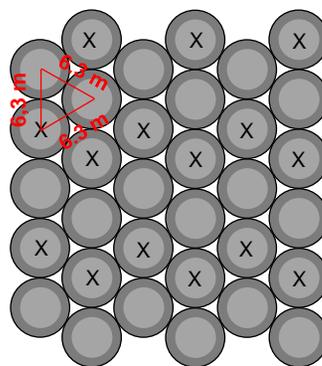


$$\text{DiamètreHouppier} = 0,0076 \times DHP^2 - 0,105 \times DHP + 4,4$$

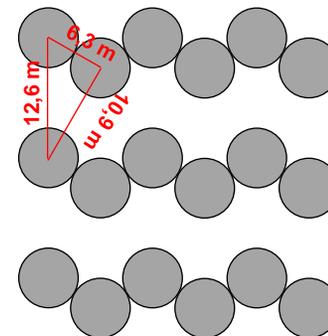
Annexe 1. Évolution du diamètre du houppier de bouleaux à papier en fonction de leur DHP, dans une bétulaie à bouleau à papier de classe d'âge de 90 ans à La Tuque. Les valeurs représentent la moyenne quadratique du diamètre du houppier pris dans l'axe de la plus grande largeur et de celui mesuré perpendiculairement à cet axe. Les points noirs correspondent aux points retenus pour modéliser les valeurs maximales observées du diamètre des houppiers (courbe de LaTuque, figure 2).



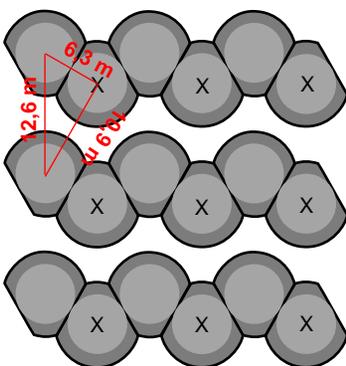
1. Après EPC (290 boudeaux/ha)



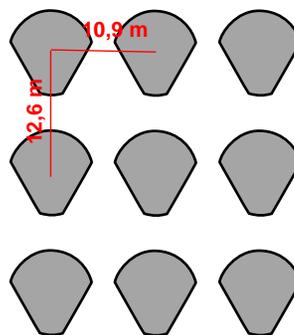
2. Avant EC1 (DHP : 24 cm)



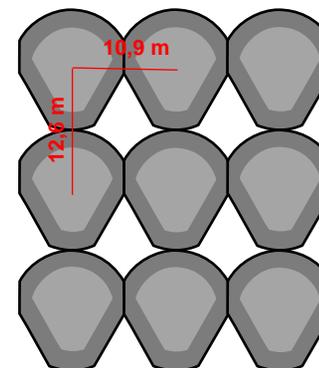
3. Après EC1 (145 boudeaux/ha)



4. Avant EC2 (DHP : 34 cm)



5. Après EC2 (72,5 boudeaux/ha)



6. Avant coupe finale (DHP : 40 cm)

Annexe 2. Évolution de la disposition spatiale des houppiers des bouleaux d'avenir en fonction des interventions sylvicoles pour un calendrier à 3 éclaircies avec une disposition initiale (après EPC) en quinconce et un prélèvement de 1 tige sur 2 lors des EC. Les houppiers marqués d'un « X » dans les représentations avant éclaircie correspondent aux arbres qui seront coupés lors de l'éclaircie. Les cercles gris foncé dans les représentations avant intervention (EC et coupe finale) correspondent à l'accroissement en diamètre du houppier depuis la dernière éclaircie. Les lignes rouges indiquent la distance entre les arbres.