

Université de Montréal

Succès d'une plantation de feuillus en forêt post-agricole avec des protections contre les cervidés sous différentes largeurs d'ouvertures par bande

Par Antoine Magnoux

Département de Sciences biologiques, Faculté des Arts et Science

Mémoire présenté

en vue de l'obtention du grade de Maîtrise ès sciences

Sciences biologiques

Juillet 2016

© Antoine Magnoux, 2016

Résumé

Suite à l'abandon agricole, le nouveau milieu forestier en développement est souvent peu diversifié en espèces d'arbres de grande valeur économique. La solution qu'est la plantation d'enrichissement sous couvert doit intégrer l'effet d'interception lumineuse des manchons protecteurs contre le broutage. À cette fin, des ouvertures du couvert par bandes larges de 3, 6 et 9 mètres, combinées à deux manchons protecteurs à petites et grandes mailles et à un témoin, sont comparés. L'expérience analyse l'effet niveaux de lumière sur la croissance de plants de bouleaux jaunes et de chênes à gros fruits allant de 8 à 46 %. L'ouverture de 9 mètres a été la plus avantageuse pour la croissance en hauteur et en diamètre du bouleau jaune, et ce pour les deux types de protections. Le protecteur à petites mailles a limité la croissance de l'espèce dans les trois largeurs d'ouvertures. Le diamètre du chêne à gros fruits a été le plus faible dans cette même protection. Avec une lumière accrue, le diamètre du chêne à gros fruits a augmenté ainsi que la longueur moyenne des branches et la surface foliaire du bouleau jaune. La bonne croissance juvénile ou initiale du bouleau jaune en fait une espèce d'intérêt pour l'enrichissement en forêts. Une ouverture intermédiaire d'une largeur de six mètres est envisageable pour réduire les perturbations et les coûts. La protection de type grandes mailles améliore davantage la croissance que l'autre, sous toutes les tailles d'ouvertures.

Mots clés : Plantation d'enrichissement, plantation sous couvert, lumière, forêt post-agricole, ouverture par bande, broutage, manchon protecteur

Abstract

Following abandonment of agricultural land, regrowth forests typically show a low diversity of tree species. One possible solution, enrichment underplanting, must consider protection against browsing, which hinders sunlight from reaching the seedlings. We examined the effects on growth of three different widths of strip opening (3, 6 or 9 meters) mixed with two protective sleeves (a small mesh and a large one). In the experiment, light levels reaching seedlings of yellow birch and burr oak range from 8 to 46 %PAR. The nine meters strip was the best to promote diameter and height growth of yellow birch, regardless of the protective sleeves used. The small mesh sleeve produced a smaller growth in all the openings, for both species in diameter and only for yellow birch in height. Burr oak diameter was also reduced by the small mesh protection. With increased light, mean length of branches and leaf area for yellow birch increased, as well as diameter for burr oak. Good growth of yellow birch makes it a species of interest for enrichment planting. A strip opening of 6 meters width could be enough to ensure artificial regeneration of yellow birch, while limiting disturbances and reducing costs. Large mesh sleeve would be best to maximize growth.

Keywords: Enrichment planting, underplanting, light, PAR, post-agricultural forest, strip opening, deer browsing, tree shelter

Table des matières

Introduction	1
Régénération naturelle des terrains agricoles abandonnés.....	2
<i>Amélioration de la croissance selon la lumière disponible</i>	4
<i>Broutage par le cerf de Virginie</i>	5
<i>Compétition interspécifique</i>	7
Objectifs et hypothèses.....	7
Méthode	8
Zone d'étude	8
Dispositif expérimental	9
Échantillonnage	10
<i>Caractéristiques du peuplement</i>	10
<i>Mesures du sol</i>	10
<i>Température de l'air</i>	11
<i>Disponibilité de la lumière</i>	11
<i>Mesures de croissances et morphométriques</i>	12
Analyses statistiques	13
Résultats	13
Survie.....	13
Lumière.....	13
Croissance.....	14
<i>Mesures morphométriques</i>	15
Température du sol et de l'air.....	15
Discussion	16
Survie.....	16
Lumière.....	17
<i>Au niveau des ouvertures</i>	17
<i>En interactions avec les protections</i>	17
Croissance.....	18
<i>Bouleau jaune</i>	18
<i>Chêne à gros fruits</i>	20

Conclusion21

Liste des tableaux

Tableau I: Paramètres de trois types de protections contre les cervidés.....	I
Tableau II: Pourcentage moyen (écart-type) de lumière mesuré dans la forêt, au centre des ouvertures par bandes et au centre des interbandes, à différentes hauteurs	I
Tableau III: Effets d'ouverture par bande et de protections individuelles contre les cervidés sur la croissance du bouleau jaune (BOJ) et du chêne à gros fruits (CHG), lors de la 2ème année après la plantation	II
Tableau IV: Effets de la largeur d'ouverture par bande et du type de protection contre les cervidés sur la surface foliaire, la concentration en chlorophylle et différentes caractéristiques morphologiques du bouleau jaune	III
Tableau V: Régression logarithmique (pour la variable générale) et linéaire (pour les variables morphométriques) entre la lumière et différentes variables de croissance, sur des plants de bouleau jaune et de chêne a gros fruit, après deux saisons de croissance.....	IV
Tableau VI: Effet des ouvertures par bandes sur les conditions du sol (écart-type), durant la 2ème année suivant leur création.....	IV

Liste des figures

Figure 1 : Exemple d'un bloc	V
Figure 2 : Protections utilisées	VI
Figure 3: Taux de survie de plants de bouleau jaune et de chêne à gros fruits après deux saisons de croissance selon la largeur d'ouverture par bande et le type de protection	VII
Figure 4: Lumière transmise à l'intérieur de trois types de protection contre les cervidés en fonction de la hauteur	VIII
Figure 5: Moyenne annuelle de % de lumière pénétrant à l'intérieur des protections (intégrée sur toute la hauteur), selon chacune des largeurs d'ouverture par bande	IX
Figure 6: Pourcentage d'arbres qui dépassent leur protection après deux ans de croissance, selon l'ouverture dans laquelle ils ont poussés	X
Figure 7 : Profil de température moyenne de l'air durant 24h, selon l'ouverture.....	X

Liste des sigles

RAP : Radiations actives photosynthétiquement

H/D : Hauteur/diamètre

TDR : Time domain reflectometry (Réflectométrie temporelle)

Remerciements

Mes premiers remerciements vont à mon directeur, Alain Cogliastro, pour le soutien et la compréhension dont il a fait preuve tout au long de ce projet, ainsi que pour ses conseils sur le terrain et ses commentaires sur le manuscrit. Je voudrais remercier aussi mon codirecteur, Alain Paquette, pour les conseils sur le terrain et les commentaires lors de la rédaction. Je souligne la bonne humeur constante et l'entrain de mon directeur et mon codirecteur, malgré les difficultés rencontrées. Je remercie Benoit Diab, Jacques Baril, Alexie Pageau, Pierre-Olivier Guimond-Catafore, Antoine Vallet, Anita Lau, Chloé Vallette, Laura Cavin, Ève Durocher, Jeanne Moisan Perrier, Rita Shirley Choutang Tondji ainsi que toutes les autres personnes ayant contribué aux travaux de terrain. Merci à Stéphane Daigle, qui m'a permis d'effectuer les analyses statistiques en toute confiance. Je remercie le ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs, pour le financement du projet pendant deux années. Un autre merci à tous les collègues du laboratoire, pour les encouragements, le soutien moral et l'environnement stimulant qu'ils ont su construire.

Introduction

Au cours des dernières années, les surfaces de déforestation ont été compensées par la reforestation naturelle ou artificielle, pour atteindre une certaine stabilité des superficies forestières. Cependant, la déforestation réduit la part des peuplements matures (Masek *et al.* 2011). Il en résulte que l'âge moyen des forêts diminue et que leur composition est fortement transformée. Dans le cas des chênaies en Amérique du Nord, bien que la surface terrière soit maintenue depuis longtemps, on observe une transition vers des tiges réduites en diamètre et plus nombreuses, avec une diminution de la dominance de certaines espèces, comme le chêne blanc et le chêne noir (Hanberry *et al.* 2014).

Il pourrait être envisagé d'aménager les forêts post-agricoles, afin de réduire la pression sur l'exploitation des peuplements matures ou pour créer des îlots forestiers diversifiés et fonctionnels dans les espaces déficitaires en surfaces forestières (Stanturf *et al.* 2014). En effet, de nombreuses terres agricoles de l'est de l'Amérique du Nord ont graduellement été abandonnées par manque de compétitivité avec les terres plus fertiles de l'ouest (Ramankutty et Foley, 1999). Ces terres sont de bonnes cibles pour la régénération forestière étant donné leur abondance dans la portion est du continent américain (Drummond et Loveland, 2010). De plus, elles présentent un bon équilibre entre le potentiel de régénération et les difficultés d'intervention pour accélérer cette régénération (Crouzeilles *et al.* 2016). La composition en espèces des peuplements issus de l'abandon agricole est fortement influencée par le contexte spatial et l'usage antérieur des terres (McLachlan et Bazely, 2003, Perring *et al.* 2012). L'éloignement des sources de propagules limite la diversité de la régénération presque exclusivement aux espèces pionnières (Staaland *et al.* 1998, D'orangeville *et al.* 2008). De telles compositions en espèces présentent peu d'intérêts pour les futurs usages industriels du bois (essences non désirables, qualité inférieure) alors que la faible biodiversité de ces écosystèmes nouvellement formés est peu propice aux loisirs tels la randonnée ou l'observation des oiseaux. La résilience de ces forêts face aux perturbations (événements météorologiques, maladie, insectes...) est également préoccupante alors que s'ajoutent certains problèmes entomologiques comme celui de la présence récente de l'agrile du frêne (*Agrilus planipennis*), insecte ravageur exotique (Haack *et al.* 2002, Poland et McCullough, 2006). Afin d'éviter les scénarios désastreux, la maîtrise des modalités de régénération artificielle des forêts anthropisées devient nécessaire.

Régénération naturelle des terrains agricoles abandonnés

Suite à l'abandon d'une terre agricole, les premières espèces à s'installer, en Amérique du Nord, seront des herbacées (*Ambrosia*, *Aster*, *Andropogon*) (Oosting, 1942, Keever, 1993, Benjamin *et al.* 2005) et quelques fois certains arbres pionniers, comme le bouleau gris et le peuplier faux-tremble (Meilleur *et al.* 1994). Un tel stade de succession végétale peut perdurer longuement : Oosting (1942) rapportait qu'une terre abandonnée en Caroline du Nord pouvait prendre plus de 150 ans avant d'être dominée par les espèces climaciques. En Illinois, Bazzaz (1968) soulignait qu'après 40 ans, seuls des semis d'arbres commençaient à apparaître. Au Québec, D'Orangeville *et al.* (2008) ont observé dans les forêts post-agricoles de très faibles proportions d'espèces de feuillus ayant une valeur commerciale et peu de possibilités d'évolution vers un peuplement dominé par des espèces à bois noble. Dans de tels cas, l'apparition tardive de plusieurs espèces (comme les chênes) s'explique par le contexte spatial agricole, qui limite la propagation des semences et l'installation des semis (Bazzaz, 1968, Butaye *et al.* 2001, D'Orangeville *et al.* 2011). La composition des fragments forestiers résiduels comprend parfois des espèces plus longévives qui composaient autrefois les communautés climaciques du territoire (Stanturf *et al.* 2014), mais de tels fragments doivent être à proximité des sites à régénérer afin de propager efficacement leurs semences, soit moins de 200 mètres (Butaye *et al.* 2001, D'Orangeville, 2008). Il a été rapporté par Blackham *et al.* (2014) que des espèces favorisant les oiseaux comme vecteur de propagation pouvaient parfois se retrouver en quantité dominante. Toutefois, la fragmentation des terres agricoles conserve un impact négatif, car l'animal doit accéder au terrain et y avoir un intérêt (Bowen *et al.* 2007). Pour s'implanter dans un milieu, certaines espèces nécessitent des conditions particulières, qui sont souvent absentes des forêts post-agricoles. Par exemple, le bouleau jaune requerrait des débris forestiers pour s'implanter, notamment en provenance de *Thuja occidentalis* (Bolton et D'Amato 2011), conditions susceptibles d'être satisfaites avec de plus vieilles forêts et généralement absentes dans les plantations (Siitonen *et al.* 2000).

Il est possible de prédire localement la régénération en comparant avec des terrains ayant subi le même type d'agriculture (Keever 1983). Par exemple, au Québec, une zone de pâturage présenterait souvent une bonne régénération tandis qu'une zone d'agriculture intensive n'obtiendrait que très rarement, voir jamais, de régénération satisfaisante (Benjamin *et al.* 2005). Le retour à une communauté forestière apparentée à celle d'origine serait fonction de l'intensité et de la durée de la pratique agricole (Cramer *et al.* 2008). Plus l'agriculture est intensive et prolongée, plus la succession risque d'être ralentie et de conduire à un nouvel écosystème dominé par des arbustes et des herbacées (Hobbs *et al.* 2006). Les

difficultés de régénération ne sont pas exclusives aux arbres et se retrouvent aussi dans les strates inférieures, notamment au niveau des herbacées (Flinn et Vellend, 2005). Les techniques d'agriculture à travers le monde vont en s'intensifiant (Bennett et Balvanera, 2007), ainsi, les nouveaux écosystèmes pourraient augmenter en fréquence, car il sont souvent issus de l'agriculture intensive (Cramer *et al.* 2008). Malgré les tendances visibles, la régénération de ces milieux particuliers reste un phénomène avec de fortes composantes aléatoires qui limitent les modèles de succession (Bataneih *et al.* 2013). Ainsi, plusieurs conditions nécessaires à une régénération naturelle conduisant à des forêts de plus grande valeur écologique ou commerciale ne sont pas présentes dans de multiples jeunes peuplements post-agricoles. L'intervention humaine est donc parfois requise pour remédier aux effets des conditions manquantes et accroître la diversité des fonctions forestières.

Plantation d'enrichissement sous couvert

Il existe plusieurs techniques d'intervention pour améliorer la régénération forestière, selon les circonstances et le but visé. En l'absence d'une quantité suffisante de semis d'espèces désirables, c'est la plantation d'enrichissement sous couvert (enrichment underplanting, undercover filling plantation) qui est privilégiée (Adjers *et al.* 1995, Hooper *et al.* 2002, Dey *et al.* 2012, Blackham *et al.* 2014). La technique consiste à planter des arbres d'espèces voulues dans la forêt ciblée, en créant des éclaircies dans la canopée afin d'augmenter la lumière disponible pour améliorer la croissance des plants introduits (Paquette *et al.* 2006a, Johnson *et al.* 2009). Cette méthode permet d'accélérer et de diriger la succession à partir d'un choix d'espèces ayant une bonne valeur commerciale ou écologique. Elle offre l'avantage de réduire le niveau de perturbation par rapport à la coupe totale d'une forêt déjà en place, sa mise en andains et la plantation du site (Robison *et al.* 2004, Paquette *et al.* 2009, Stanturf *et al.* 2014). La technique pourrait aussi être appliquée à d'autres situations, par exemple pour assurer une régénération en prévention des pertes anticipées de la canopée par l'expansion de l'agrile du frêne (Poland et Cullough, 2006, Siegert *et al.* 2014).

La plantation sous couvert (shelterwood system) est une méthode similaire répandue pour assurer la régénération en arbres d'un peuplement prêt à la récolte. La différence majeure est le retrait, quelques années après la plantation, de l'ensemble des arbres composant la canopée (Johnson *et al.* 2009). La majorité des techniques de régénération sous couvert (excluant les plantations en bandes) impliquent tôt ou tard la coupe totale du couvert forestier pour favoriser les plants et obtenir plus rapidement des troncs

commercialisables (Coates et Burton, 1997, Johnson *et al.* 2009). Ces techniques basées sur la conservation d'un couvert forestier partiel offrent plusieurs avantages pour la croissance et la protection des plants : une plus grande humidité du sol (Aussenac, 2000, Dey *et al.* 2012), une protection contre les extrêmes climatiques (Dey *et al.* 2012) et une protection contre le gel (Langvall et Lofvenius, 2002). De plus, cette méthode permet de limiter la croissance de certaines espèces compétitrices (Liefvers et Stadt, 1994).

Le succès de l'enrichissement des forêts dépend d'une croissance juvénile rapide des plants. Cela leur permet d'être rapidement au-dessus des compétiteurs et hors d'atteinte des animaux brouteurs (Johnson *et al.* 2009). Pour maximiser la croissance juvénile, le rehaussement de la quantité de lumière disponible en sous-bois est généralement souhaitable ainsi qu'une maîtrise adéquate de la compétition adjacente aux plants, peu importe le niveau de tolérance à l'ombre de l'espèce (Balandier *et al.* 2006).

Amélioration de la croissance selon la lumière disponible

Selon Bataneih *et al.* (2013), la manipulation de la canopée aurait un fort impact sur la régénération, en modifiant la lumière qui atteint les plants et les semis. En effet, la lumière est le facteur limitant pour la croissance et l'implantation de nombreuses espèces en sous-bois (Wayne et Bazzaz, 1993, Ricard *et al.* 2003, van Kuijk *et al.* 2014). L'ouverture du peuplement en vue d'assurer une régénération en feuillus peut procéder de différentes manières : par éclaircies, par trouées ou par bandes. Les trouées et les bandes vont créer un effet de bordure important et vont ainsi affecter la lumière différemment de l'éclaircie. Cette dernière méthode augmente la lumière uniformément sur la zone affectée, par la coupe d'arbres ou de petits groupes isolés. Les trouées et les ouvertures par bande vont augmenter la lumière de façon plus importante dans leur portion centrale (Canham, 1988). La survie des plants pourrait être plus faible au centre des trouées, comparée aux bordures, toutefois, la croissance est généralement supérieure en leur centre (Holladay *et al.* 2006). Des résultats similaires ont été obtenus, pour des arbustes (Burnham et Lee, 2010) et d'autres espèces d'arbres (Kern *et al.* 2012, Forrester *et al.* 2014). Cela semble indiquer une tendance générale vers une croissance plus rapide avec l'augmentation de lumière, mais une survie potentiellement plus faible, et ce pour plusieurs espèces ligneuses.

Les ouvertures pratiquées dans les travaux de régénération naturelle ou artificielle modifient considérablement la proportion de lumière disponible en sous-bois; de valeurs inférieures à 5%, elles peuvent atteindre des valeurs supérieures à 50% (Canham *et al.* 1994, Walter et Reich, 1996, Beaudet et Messier, 1998, Paquette *et al.* 2006a). La taille de l'ouverture pour obtenir un même niveau de lumière entre deux peuplement à enrichir sera variable selon leur composition et leur hauteur (Canham 1988,

Forrester *et al.* 2014). L'ajustement de la taille de l'ouverture doit permettre un niveau de lumière favorable à la croissance des plants tout en étant assez restreinte pour limiter la croissance d'espèces compétitrices (Lieffers et Stadt, 1994, Paquette *et al.* 2006a, Gasser *et al.* 2010, Stanturf *et al.* 2014). Par exemple, les arbres coupés afin de créer l'ouverture produisent des rejets de souches et ces derniers vont être plus nombreux et plus vigoureux lorsque la lumière est accrue (Forrester *et al.* 2014). Paquette *et al.* (2006a) ont déterminé qu'une ouverture laissant entrer un niveau de lumière intermédiaire, soit 25-50 % de la lumière moyenne totale, est ce qui assure les meilleures survies et croissances, en incluant l'effet des espèces compétitrices. Les ouvertures par bandes et par trouées vont aussi affecter le milieu forestier avoisinant, particulièrement lorsque la forêt est composée d'espèces intolérantes à l'ombre qui transmettent davantage de lumière, comparativement à un peuplement mature (Canham *et al.* 1994).

Le niveau de lumière n'est généralement pas constant dans le temps et diminue à mesure que la canopée se referme. Cogliastro et Paquette (2012) ont mesuré une augmentation de la croissance en hauteur des arbres plantés lorsqu'il y avait une deuxième intervention d'éclaircie pratiquée à l'année sept suivant la première éclaircie de l'an trois. La fermeture de la canopée serait moins prononcée dans le cas d'ouvertures par trouées ou par bandes, comparativement aux éclaircies (Staaland *et al.* 1998), probablement en raison du ratio inférieur surface/périmètre de l'ouverture. Ainsi, plus le périmètre est grand proportionnellement à la surface de l'ouverture, plus la canopée occultera le trou rapidement.

Broutage par le cerf de Virginie

Les plants introduits en enrichissement font face au risque de la déprédation, notamment par le cerf de Virginie. En Amérique du Nord et en Europe, l'impact des cervidés peut entraver la régénération et affecter la succession d'espèces des milieux naturels (Fuller et Gill, 2001, Kraft *et al.* 2004, Forrester *et al.* 2014). Une étude de Kuiters et Slim (2002), en Europe, rapporte que la succession naturelle qui conduit à des bétulaies à chênes et des chênaies à hêtres, ne se fait qu'en l'absence d'ongulés. Les auteurs suggèrent que la grande consommation de certaines espèces végétales serait due à l'absence d'alternative aussi savoureuse.

De plus, la déprédation par les cervidés est parfois augmentée par la maîtrise de la végétation autour des arbres plantés (Dubois *et al.* 2000). Davis *et al.* (2000) ont jugé que l'intervention rend les plants plus visibles et accessibles pour les cerfs, ce qui pourrait en contrebalancer les effets positifs. Cependant, des résultats opposés ont été obtenus par d'autres auteurs (Paquette *et al.* 2006b). Les effets des ouvertures sur le broutage sont donc incertains, mais semblent dépendants de la densité de cervidés (Truax *et al.*

2000) et hautement variable d'une année à l'autre (Oswalt *et al.* 2006), probablement liés aux grandes variations des populations au fil des ans (Huot et Lebel, 2012).

Protections

Une des solutions actuellement appliquée à grande échelle pour contrer ce problème consiste à placer des protections autour de chaque arbre afin d'empêcher les herbivores d'y avoir accès. Les impacts des protections sont dépendants de leurs caractéristiques physiques, comme la hauteur et la taille des mailles. Pour de jeunes plants, les protections doivent être fixées avec des piquets pour éviter que les cervidés ne les arrachent. La hauteur doit être ajustée en fonction des animaux brouteurs; la protection contre un cerf requiert un manchon plus haut que pour un lièvre (Van Lerberghe, 2014). Cette protection représente un obstacle entre la source lumineuse et l'arbre, réduisant la quantité de lumière disponible pour la photosynthèse. Cette réduction du niveau de lumière peut affecter la croissance. Des résultats de boisement en champs ont montré que les protections peuvent induire une hausse de la surface foliaire spécifique, réduisant l'allocation en carbone foliaire (Laliberté *et al.* 2008). Elles peuvent aussi stimuler la croissance verticale des arbres, car les types de protections disponibles limitent la lumière latérale alors que la lumière parvenant de l'ouverture au sommet est plus importante. En plantation sous couvert forestier, il faut tenir compte de l'interception de la lumière par le protecteur lors de la création des ouvertures.

Oswalt *et al.* (2006) ont observé, en forêt, que des plants de chênes de plus forte dimension permettaient une meilleure croissance et moins de broutage par les cervidés. Ils ont par la suite suggéré de ne pas mettre de protection en raison des coûts, mais plutôt de choisir des plants de plus grande taille et en plus grande quantité. Ainsi, un effectif important de plants atteindrait rapidement la limite verticale des cerfs. Par contre, cela n'exclut pas le broutage des branches latérales et implique d'avoir accès à des plants plus coûteux et plus rarement disponibles sur le marché. De plus, la protection n'est pas le seul facteur à influencer la lumière disponible pour les plants.

Avec l'ajout d'une protection, un élément vient potentiellement altérer la croissance en imposant des limites physiques, en plus des contraintes lumineuses (Laliberté *et al.* 2008). La morphologie des plants varie selon l'abondance de la lumière reçue et l'espèce concernée (Messier et Nikinmaa, 2000, Paquette *et al.* 2007b, Forester *et al.* 2014). Ainsi, il est essentiel de mesurer l'impact que l'interaction ouverture et protection pourrait avoir sur le développement morphométriques des plants.

Compétition interspécifique

La croissance de la végétation de compétition présente à la périphérie immédiate du semis ou du plant doit être sous surveillance pour en diminuer l'impact (Gasser *et al.* 2010). Plusieurs études s'accordent pour dire que de dégager la cime des arbres dans un rayon de 0,5 à 1 mètre favorise la croissance et la survie (Gasser *et al.* 2010, Schwartz *et al.* 2013). Il est possible, parfois même avantageux, de seulement dégager la compétition ligneuse qui surpasse en hauteur les plants, afin de promouvoir leur croissance verticale (Balandier *et al.* 2006). Par contre, la végétation repousse rapidement et une intervention unique est rarement suffisante (Gasser *et al.* 2010, Cogliastro et Paquette, 2012, van Kuijk *et al.* 2014). La compétition souterraine est aussi présente, alors que les plants introduits en enrichissement possèdent, en phase initiale, un réseau de racines encore peu développé et moins efficace pour absorber les nutriments (Schuler et Robison, 2010). Cependant, le facteur limitant est plus souvent la disponibilité de la lumière (Ricard *et al.* 2003), car la compétition racinaire n'est notable qu'en terrains infertiles (Coomes et Grobb, 2000).

Objectifs et hypothèses

Ainsi, le but de l'étude est de déterminer l'effet de l'interaction de différentes largeurs d'ouvertures par bandes avec des manchons protecteurs contre les cervidés sur la croissance de plants en forêt post-agricole. Trois largeurs d'ouverture (3, 6 et 9 mètres) et deux types de manchons protecteurs (petites et grandes mailles) ainsi qu'un témoin, aideront à déterminer la meilleure combinaison pour obtenir une croissance juvénile rapide des plants de bouleaux jaunes, chênes à gros fruits et noyers noirs. Toutes ces espèces utilisées présentent une valeur commerciale élevée. L'utilisation d'espèces présentant différentes caractéristiques écologiques permet de voir si l'effet des traitements est spécifique à une espèce ou s'il peut être davantage généralisé.

Le bouleau jaune est une espèce à croissance relativement rapide qui a tendance à faire de nombreuses branches secondaires et à favoriser l'accroissement de la tige principale par rapport aux racines, lorsque le plant est jeune (Beaudet et Messier, 1998). Le chêne à gros fruits a une stratégie inverse et favorise principalement les racines, parfois au détriment de la tige principale (Johnson et al. 2009). Son taux de croissance est plus lent, même en conditions optimales. Le noyer noir préfère les sols bien drainés et neutre (Williams, 1990). Cette dernière espèce est moins tolérante à l'ombre que les deux autres, ce qui permet d'avoir un certain éventail de tolérance dans les espèces évaluées. Ainsi, le bouleau et le chêne

devraient avoir une croissance satisfaisante dans l'ouverture de 6 mètres, sans qu'elle ne soit meilleure dans l'ouverture de 9 mètres.

Avec l'ouverture de 9 mètres, il serait possible que le maximum de lumière utilisable par les plants soit atteint dans la partie supérieure des deux types de protections. Cependant, la distribution verticale de la lumière sera différente selon les types de protections et il serait probable que pour une même quantité de lumière, la morphologie des plants change selon les protections. Le type petites mailles, limitant davantage la lumière latérale, devrait engendrer une étiolement du tronc. Cette même protection devrait encourager une stratégie favorisant la capture de lumière, comparativement au type grandes mailles. L'abondance de lumière dans les grandes ouvertures pourrait balancer les effets morphologiques dus à la réduction de lumière par la protection. Nous cherchons à comparer la croissance entre les niveaux de lumière; par exemple, une protection à mailles lâches utilisées dans une petite ouverture donnera-t-elle des résultats similaires à une protection à mailles serrées dans une grande ouverture?

Méthode

Zone d'étude

Le site d'étude se situe sur une ancienne terre agricole, à l'est de Montréal (45°40'34" nord et 73°19'19" ouest), dans la zone forestière de l'érablière à caryer (Grandtner, 1966). Il y a en moyenne 983 mm de précipitation par année, dont 186 en neige. La température annuelle est de 6,6°C, avec huit mois sans gel (Environnement Canada, 2010). Le sol est de la série Joseph (Grenon *et al.* 1999) dont la texture varie de sable limoneux à sable. Le pH est de 4,9, la litière est à près de 3 centimètres d'épaisseur. Le terrain est fréquenté par les cerfs de Virginie, entre 7 et 12 individus par km² en 2007 (Huot et Lebel, 2012). Le peuplement présent est composé d'érable rouge (*Acer rubrum* L.) et de bouleau gris (*Betula populifolia* Marbo.), avec quelques individus d'autres espèces (peuplier faux-tremble (*Populus tremuloides* Michx.), cerisier tardif (*Prunus serotina* Ehrh.). Le peuplement est âgé de 26 ans, la densité des tiges avec un DHP (à 130 centimètres de hauteur) supérieur à cinq centimètres est de 1981/ha, et celle des tiges avec un DHP inférieur (1θ5 centimètres) est de 1084/ha. La canopée s'élève à près de 13 mètres de hauteur. La surface terrière de l'érable rouge et du bouleau gris représente respectivement 53% et 45% de l'ensemble (15,5 m²/ha). Les gaules sont à 89% d'érable rouge et les quelques semis présents sont à 92% de l'érable rouge, ce qui valide l'intervention afin de diversifier les espèces. Les principales herbacées sont la ronce

hispide (*Rubus hispidus* L.), le mûrier (*Rubus alleghaniensis* Porter), le maïenthème du Canada (*Maienthemum canadense* Desf.) et la spirée à larges feuilles (*Spiraea latifolia* Borkh.).

Dispositif expérimental

Le site d'étude comprend cinq blocs expérimentaux de tailles égales (110m x 30m). Sur les cinq blocs, deux sont à six mètres de distance et les autres se situent à plus de 30 mètres, mais moins de 300. La canopée a été ouverte dans chaque bloc en trois ouvertures par bandes de largeurs différentes (3, 6 et 9 mètres), orientées nord/sud pour obtenir le maximum de lumière (Aussenac, 2000), séparées par 6 mètres de forêt intacte (Fig. 1). La position des bandes dans chaque bloc a été déterminée aléatoirement. Dans les bandes, toute la végétation a été fauchée au ras du sol en novembre 2013. Au centre des bandes, 36 arbres ont été plantés en ligne à un intervalle de deux mètres. Les trois espèces à l'étude sont : le chêne à gros fruits (*Quercus macrocarpa* Michx.), le bouleau jaune (*Betula alleghaniensis* Britton.) et le noyer noir (*Juglans nigra* L.). Des plants d'un an pour le noyer et le bouleau (1-0), et de deux ans pour le chêne (2-0) ont été utilisés. Les bouleaux sont issus d'une production en récipient alors que les noyers et les chênes sont à racines nues. Ils ont été produits par la pépinière forestière de Berthier du ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs du Québec. La plantation des arbres s'est faite manuellement le 12 mai 2014. Tous les arbres ont été enduits à leur sommet du répulsif à cerfs Deer-Away (IntAgra inc., Minneapolis, MN, É.-U.) immédiatement après leur plantation.

Chaque bande est séparée en trois sections égales de 12 arbres. Chaque section a reçu aléatoirement un des trois types de protections aux cervidés. Un système de protection utilise le grillage de type « broche à poule » (appelé ici témoin) et sert de témoin pour la lumière (tableau 1). En l'absence de témoin, les arbres sont broutés et meurent. Les deux autres types de protection sont le grillage Vexar^{MD} (MasterNet LTÉE Mississauga, ON, Canada) (appelé ici grandes mailles) et le grillage ClimaNet^{MD} (Nortene technologies, Lomme, France) (appelé ici petites mailles) (Fig. 2). Le type petites mailles est une protection commerciale, tandis que les autres sont des mailles qui servent à la construction de clôtures et ne sont pas disponibles en tant que protection. Le type grandes mailles et le témoin forment un cylindre de 30 centimètres de diamètre, avec l'arbre au centre, alors qu'il est de 20 centimètres pour le type petites mailles. Ce dernier, utilisé normalement en milieu ouvert (champ), nous a fait opter pour un protecteur plus court dans un environnement forestier plus limitant en lumière. Ceci permet d'augmenter la lumière transmise par le sommet vers l'intérieur du protecteur. Étant donné la plus faible hauteur de cette protection, elle nécessite d'être montée jusqu'à une hauteur de 140 centimètres (même hauteur que les

autres protections) au fur et à mesure que l'arbre grandit, afin que le sommet de l'arbre ne soit pas exposé. Les piquets plantés ont été orientés est-ouest pour les protecteurs qui en nécessitent deux, et sans ordre particulier lorsqu'il en fallait trois. L'installation des protections grandes mailles et du témoin s'est faite du 13 au 15 mai 2014 et celle des protections petites mailles s'est faite durant la première semaine de juin 2014. Dans chacune des sections de 12 arbres des ouvertures par bande, les arbres sont regroupés en quatre triplets. Chaque triplet contient un individu des trois espèces étudiées. L'ordre des espèces dans un triplet a été déterminé aléatoirement. Cette disposition permet de diminuer l'impact des variations locales de l'environnement en réduisant les probabilités qu'une espèce ne soit affectée différemment d'une autre. Quatre arbres (bouleaux ou noyers) prolongent les extrémités des rangées afin de servir de zone tampon (8 mètres de long). La végétation de compétition a été rabattue autour des arbres en août 2014 et en août 2015, dans un rayon de 50 centimètres.

Échantillonnage

Pour systématiser l'échantillonnage des mesures environnementales, un réseau de six transects par bloc, perpendiculaires aux bandes, a été établi. Le premier transect rejoint le quatrième arbre de chaque bande, les autres transects sont positionnés à la suite à un intervalle de six arbres. Sur chaque transect, sept points d'échantillonnages ont été marqués, soit à 15 mètres dans la forêt de chaque côté du bloc (2), un point au centre de chacune des interbandes (2) et un point au centre de chacune de bandes (3).

Caractéristiques du peuplement

Pour caractériser le peuplement à l'étude, la végétation a été échantillonnée dans les deux interbandes de chaque bloc, lors du premier été suivant l'ouverture des bandes. Des quadrats de 1 m² ont été positionnés aux points d'échantillonnage des transects dans les interbandes (12 par bloc), pour un total de 60 quadrats. Chacun de ces quadrats a été séparé en quatre quadrants dans lesquels les espèces d'herbacées les plus abondantes (au moins 50% de recouvrement) ont été notées. La densité d'arbres et de gaules a été mesurée avec la méthode centrée sur le point (Mitchell, 2015) ($n = 60$, répartie sur les 5 blocs, arbre ($\theta > 5$ centimètres), gaule ($1 < \theta < 5$ centimètres)). Le diamètre a aussi été mesuré pour les arbres afin de calculer la surface terrière.

Mesures du sol

À chaque point d'échantillonnage des transects, les mesures suivantes ont été prises : la température du sol à 5 et 17 centimètres (1 ¼ Dial thermometer, Fischer Scientific, Pittsburgh, USA) et la teneur en eau du

sol mesurée à 5 centimètres de profondeur avec une sonde TDR (ML2x, Delta-T Devices, Cambridge, R.-U.). Des échantillons de sols ont été pris dans chacune des bandes (deux par bande, transect #2 et #5) et dans la forêt (deux par bloc, transect #3), pour obtenir le pH et la granulométrie, afin de caractériser le sol.

Température de l'air

Des sondes (iButton DS1922L, Maxim integrated, San Jose, USA) servant à mesurer et enregistrer la température de l'air ont été positionnées à tour de rôle dans quatre des blocs au cours de la deuxième année de croissance. Deux sondes ont été positionnées dans chaque traitement d'ouverture et dans la forêt (témoin) à 80 centimètres du sol, couverte par une assiette vert forêt ronde positionnée 20 centimètres au-dessus pour les protéger du rayonnement solaire direct. Les sondes ont été en activité du début de juin à la fin d'août, enregistrant une mesure toutes les demi-heures. Les données d'une des sondes n'ont pu être récupérées.

Disponibilité de la lumière

Les mesures de pourcentage de lumière transmise ont été réalisées la première année pour tous les arbres, avec des Sunshine sensor^{MD} (modèles BF2 et BF5, Delta-T, Cambridge, R.-U.). Les appareils ont été calibrés les uns par rapport aux autres. À chaque mesure de lumière, une mesure simultanée était prise dans un champ, distant de 1500 mètres, pour servir de référence. La mesure au champ était prise à la hauteur maximale du trépied (165 centimètres). La communication radio avec une personne au champ permettait d'assurer que les conditions nuageuses étaient identiques en forêt et au champ et de synchroniser les mesures. Dans la forêt et dans les interbandes, une mesure de lumière a été prise à chaque point des transects, à 125 centimètres de hauteur. La valeur de la quantité de lumière diffuse produite par les appareils a été utilisée pour déterminer le pourcentage de rayonnement photosynthétique actif (% RAP) (Paquette *et al.* 2007a). Cette méthode est efficace même sous des conditions de lumière variables et donne une bonne estimation du %RAP moyen annuel (Paquette *et al.* 2007a). À l'an deux, seuls les arbres dans les bandes ont été mesurés pour la lumière, à 200 centimètres de hauteur et à 5 centimètres de hauteur, en utilisant la même méthode que pour l'an un. Les mesures de lumières ont été prises au-dessus de la végétation, à l'an un et à l'an deux, sauf pour celles à 5 centimètres.

Afin de déterminer le pourcentage de lumière intercepté par les protecteurs, des mesures ont été prises à l'intérieur des protections, avec des sondes Quantum Sensor^{MD} (LI-190, LI-COR, Lincoln, Nebraska, É.-U.). Une sonde de référence était placée sur un trépied à proximité (5 mètres) des essais. Les mesures ont été prises dans chacun des trois types de protecteurs à des intervalles de 20 centimètres de hauteur. Les

mesures des trois sondes et de la référence étaient prises simultanément. Le tout était installé dans un espace ouvert, sans obstacle, et les mesures ont été effectuées sous couvert nuageux uniforme, afin d'obtenir la quantité de lumière diffuse, une estimation juste de la proportion moyenne annuelle de lumière transmise (Parent et Messier, 1996) et des conditions de croissances de semis en sous-étage (Paquette *et al.* 2007a). Une équation de la lumière transmise dans le protecteur en fonction de la hauteur a été créée pour chaque type de protection.

En sachant la lumière au sommet de la protection, il est possible de calculer la lumière à n'importe quel point de la protection, en appliquant la formule d'atténuation obtenue pour chaque type de protection. À partir de la valeur à deux mètres dans l'ouverture, cela permet d'estimer le %RAP reçu au sommet de chaque arbre, qui a servi à faire les régressions de croissance en fonction de la lumière.

Mesures de croissances et morphométriques

La hauteur et le diamètre à cinq centimètres du sol de tous les arbres ont été mesurés en début et en fin de saison (début juin et mi-septembre, an un et an deux). Des mesures morphométriques spécifiques ont été notées dans trois des cinq blocs. Les arbres du premier et du troisième triplet de chaque section, pour chaque largeur d'ouverture, ont été mesurés. De ces arbres, 123 ont survécu aux deux ans (et ont été utilisés dans les analyses). Les mesures sur ces individus ont été : hauteur de l'arbre perpendiculaire au sol, longueur de l'arbre, longueur de la pousse annuelle, diamètre à cinq centimètres du sol, longueur de chaque feuille d'une branche en position supérieure et inférieure (environ dix feuilles par branche), nombre total de feuilles, longueur des branches secondaires, hauteur de la première branche secondaire ayant une feuille vivante, teneur en chlorophylle (quatre mesures sur des feuilles réparties sur l'ensemble du houppier) prise avec un atLEAF+ (FT Green LLC, Wilmington, É.-U.).

À partir de ces mesures plusieurs ratios ont été créés : hauteur/longueur, hauteur/diamètre, hauteur/longueur totale des branches secondaires, surface foliaire/somme des branches secondaires, surface foliaire/longueur de l'axe principal et des axes secondaires, pousse annuelle/longueur moyenne des branches secondaires, longueur du houppier/longueur de l'arbre, longueur du houppier/diamètre de l'arbre. La mesure de la longueur des feuilles a servi à estimer la surface foliaire des arbres. Un modèle a été créé pour chaque espèce, à partir de 31 à 41 feuilles par espèce, prélevées sur des arbres qui ont été plantés dans les interbandes, au même moment que ceux des bandes. Les feuilles ont été choisies de manière à couvrir l'étendue des longueurs observées. Pour chacune de ces feuilles, la longueur a été mesurée à la règle de la base du limbe jusqu'à la pointe. Ensuite, la surface de ces feuilles a été mesurée (Delta-T area meter mk2, Delta T Devices LTÉE, Cambridge, R.-U.). Le modèle permet de prédire la surface

d'une feuille à partir de sa longueur. La surface foliaire totale d'un arbre a été estimée par la surface moyenne des feuilles mesurées multipliée par le nombre de feuilles.

Analyses statistiques

L'effet des traitements sur le pourcentage de survie des plants a été comparé par un test de chi-carré sur le nombre de survivants après les deux saisons de croissances. Le même test a servi pour analyser le nombre d'arbres dépassant de leur protection. Des ANOVAs à trois facteurs (deux fixes, protection et ouverture, un aléatoire, bloc) ont été utilisées pour analyser l'effet des traitements sur la lumière disponible, la croissance en hauteur, la croissance en diamètre et les mesures morphométriques. Le test de Tukey a servi à la comparaison multiple des moyennes. Des transformations en base logarithmique, racine carrée ou exposant ont été utilisées pour atteindre la normalité lorsque nécessaire. La réponse des différentes mesures morphométriques et de croissance à la lumière a été analysée avec des régressions linéaires ou logarithmiques lorsque le R^2 était plus élevé. Les analyses ont été réalisées avec le logiciel JMP v10.0.0 (SAS Institute, Cary, É.-U.), à l'exception des régressions logarithmiques décrivant la lumière à un point donnée d'une protection, qui ont été déterminées en utilisant R v3.0.2 (R Development Core Team, Vienna, AUS).

Résultats

Survie

En raison de son faible taux de survie après la première année (25,7%), le noyer noir a été retiré des analyses. Un des blocs a aussi été retiré des analyses, parce que la zone a été inondée à cause d'un barrage de castor. Après deux ans, le bouleau et le chêne sont à 83% et 97% de survie. La mortalité pour le bouleau jaune a été moins élevée avec la protection de type petites mailles (6%, par rapport à 25% pour le témoin et 21% pour le type grandes mailles). La mortalité du chêne a été augmentée par le type grandes mailles (8% par rapport à 0% pour le témoin)(figure 3).

Lumière

Selon les largeurs d'ouvertures par bande, le %RAP mesuré à deux mètres du sol est de 5 à 10 fois plus élevé que dans la forêt à l'an un et de 2,5 à 8 fois plus à l'an deux (tableau 2). Une diminution importante de la lumière mesurée à deux mètres de hauteur est constatée dans les bandes entre la première et la deuxième année, pour la largeur de 9 mètres (-22%), de 6 mètres (-39%) et de 3 mètres (-50%) (tableau 2). L'écart de %RAP s'accroît avec le temps, la bande de 9 mètres étant deux fois plus lumineuse que celle de 3 mètres à l'an un et trois fois plus à l'an deux (tableau 2). La proportion de lumière interceptée par la végétation de la strate arbustive située entre 5 et 200 centimètres de hauteur par rapport au sol s'accroît avec la largeur d'ouverture de bande et varie de 42 à 75% (tableau 2).

La variation verticale de %RAP d'un point donné, à l'intérieur des protections, est plus grande avec le type petites mailles qu'avec les deux autres, atteignant 45% de différence entre le sommet et le bas de la protection, par rapport à 25% et 9% pour le type grandes mailles et le témoin, respectivement (figure 4). L'influence de la protection sur la lumière devient presque nulle dans la portion supérieure, là où seuls les piquets, qui excèdent la hauteur des protections, bloquent la lumière (figure 4). Dans toutes les ouvertures, la lumière transmise dans la protection à petites mailles varie peu : la différence entre la plus faible et la plus grande valeur moyenne est de 8% à l'an un et de 10% à l'an 2 (figure 5). La lumière transmise dans le type grandes mailles et dans le témoin varie davantage selon la largeur de bande, soit 22% à l'an un et 23% à l'an deux pour le type grandes mailles, et 23% à l'an un et 22% à l'an deux pour le témoin.

Croissance

Aucune interaction statistique entre la largeur des ouvertures par bandes et le type de protection n'a été détectée pour les deux espèces, et ce pour toutes les variables de croissances analysées. L'accroissement annuel à l'an deux en hauteur et en diamètre du bouleau est plus élevé lorsque la largeur d'ouverture par bande est plus grande, sans modifier le ratio H/D, pour tous les types de protection (tableau 3). Les mêmes variables sont inférieures avec le type petites mailles, comparativement aux deux autres types, pour toutes les tailles d'ouvertures. De plus, il élève le ratio H/D des bouleaux, sans favoriser l'accroissement annuel en hauteur (tableau 3). La largeur d'ouverture par bande n'a pas eu d'effet sur l'accroissement annuel en hauteur du chêne à l'an deux, mais le diamètre a été plus grand dans les ouvertures plus grandes (tableau 3). L'accroissement en diamètre du chêne, à l'an deux, est le plus faible avec la protection à petites mailles et ne montre pas de différence au témoin avec les grandes mailles (tableau 3).

Aussi, le ratio H/D du chêne est plus élevé dans le type petites mailles, à l'an deux, sans favoriser l'accroissement annuel en hauteur en comparaison aux autres protecteurs (tableau 3).

Après deux ans, les individus les plus hauts parmi les bouleaux jaunes sont ceux ayant poussés dans l'ouverture par bande de neuf mètres avec les protections type grandes mailles ou témoin. La hauteur atteinte par le chêne après deux ans ne s'est pas différenciée entre les traitements (tableau 3). Parmi les bouleaux, 77% ont dépassé leur protection dans l'ouverture de 9 mètres, contre seulement 18% dans l'ouverture de 3 mètres (figure 6). Les protections de type petites mailles ayant été remontées au fil du temps, elles ont été retirées de cette analyse.

Mesures morphométriques

La teneur en chlorophylle du bouleau jaune augmente avec la largeur de l'ouverture par bande et est la plus élevée avec la protection à grandes mailles. La longueur totale des branches secondaires et le ratio houppier/diamètre du bouleau jaune sont plus grands avec le type petites mailles, peu importe l'ouverture. Les autres variables ne semblent pas affectées par les ouvertures ni les protections. Toutefois, plusieurs ratios montrent une tendance à être modifiés par le type de protection. Toujours pour le bouleau jaune, la surface foliaire, le déploiement foliaire et le nombre de branches secondaires ont tendance à être diminués par la protection de type petites mailles, tandis que le ratio hauteur de l'arbre/somme des branches secondaires suit une tendance inverse, pour cette même protection (tableau 4). Les résultats d'ANOVA sur les mesures morphométriques concernant le chêne à gros fruits ne sont pas présentés car aucune différence significative entre les traitements n'a été détectée. Le bouleau jaune a réagi à la lumière en augmentant la taille de ses branches secondaires ($R^2=0,22$) sa surface foliaire totale ($R^2=0,156$) et son déploiement foliaire ($R^2=0,129$) (tableau 5). Le chêne a aussi réagi à l'augmentation de lumière, en produisant une pousse annuelle plus grande par rapport à la longueur moyenne des branches secondaires, en augmentant sa surface foliaire et son diamètre.

Température du sol et de l'air

La couche supérieure du sol dans les ouvertures est plus chaude de 2,4 à 3,4 degrés Celsius et présente une teneur en eau supérieure de 3 à 5%, comparativement à la forêt (tableau 6). La température de l'air est plus élevée en début d'après-midi par rapport à la forêt, avec une différence plus importante lorsque la largeur de l'ouverture augmente (figure 7).

Discussion

Une ouverture de 9 mètres combinée à un manchon de type grandes mailles ont permis d'obtenir la plus forte croissance juvénile du bouleau jaune, en produisant un %RAP allant de 36 à 46 %. Les protections ont eu un effet important sur l'accroissement vertical des arbres, dû à la distribution différentielle de la lumière selon leur hauteur. Le type grande mailles dans l'ouverture de 3 mètres donne des résultats de croissance similaire au type petites mailles dans l'ouverture de 9 mètres, sauf que le ratio H/D est plus élevé dans le deuxième cas. La croissance en hauteur du chêne n'a pas été affectée par les traitements alors que l'accroissement en diamètre a été favorisé par la protection grandes mailles.

Survie

La survie accrue du bouleau jaune dans la protection de type petites mailles est contre-intuitive, étant donné que ce type limite considérablement l'apport lumineux. Nous avons cependant observé que la végétation de compétition dans le rayon d'action de la protection était moins importante avec le type petites mailles qui transmet une faible proportion de lumière dans cette zone. L'absence d'effet des ouvertures sur la survie, autant pour le bouleau jaune que pour le chêne à gros fruits, s'expliquerait par le fait qu'aucune ouverture n'a exposé les plants à des valeurs extrêmes de %RAP, souvent associées à un taux de mortalité plus élevé (Paquette *et al.* 2006a, Kern *et al.* 2012). Dans le cas du chêne, la survie est moins élevée dans les protections de type grandes mailles. Cependant, la différence est causée par quatre individus sur un total de 150, ce qui rend le test peu fiable.

Le drainage imparfait tout au long des saisons de croissances est probablement le principal facteur qui explique le fort taux de mortalité observé du noyer noir, étant donné sa faible tolérance à cette condition (Williams, 1990, Kabrick *et al.* 2012). Le bouleau jaune ainsi que le chêne à gros fruits supportent mieux l'engorgement périodique en eau du sol.

Lumière

Au niveau des ouvertures

La moyenne de %RAP obtenue dans les ouvertures de 9 mètres, à 61%, a été plus grande que celles généralement observées pour des travaux de régénération naturelle ou de plantation d'enrichissement qui est rarement supérieure à 50% (Beaudet et Messier, 1998, Cheng *et al.* 2005, Gasser *et al.* 2010, Cogliastro et Paquette, 2012, Forrester *et al.* 2014). Plusieurs facteurs peuvent expliquer cette différence. Les ouvertures pratiquées dans ces études sont souvent sous forme de trouées circulaires ou ovales, qui procurent un %RAP très variable; la position centrale procure une lumière plus abondante que celle en bordure, dû à un éloignement plus grand de la bordure forestière. En comparaison, une ouverture par bande offre une quantité de lumière disponible plus uniforme pour des plants, tous plantés en position centrale (Canham 1988, Coates et Burton, 1997).

En interactions avec les protections

En combinant l'effet des manchons protecteurs à celui des ouvertures, les %RAP reçus par les plants correspondent approximativement à ceux observés en milieu naturel aménagé pour favoriser la régénération artificielle et naturelle (Beaudet et Messier, 1998, Ricard *et al.* 2003, Cheng *et al.* 2005, Cogliastro et Paquette, 2012, Forrester *et al.* 2014). Ces études présentent des valeurs de %RAP variant de 5% à 50%, sans protection contre le broutage. Toutefois, la majorité des croissances verticales moyennes observée à ces %RAP est inférieure à celle de la présente étude, ce qui démontre un possible effet accélérateur des protections. Une méta-analyse de Paquette *et al.* (2006a) a comparé des croissances sous des niveaux de lumière allant d'une canopée intacte à une canopée ouverte pour conclure qu'un niveau intermédiaire de lumière de 25 à 50% de RAP est optimal pour la croissance verticale et la survie d'arbres plantés sous couvert. L'analyse inclut peu de résultats provenant de forêts post-agricoles en milieu tempéré et aucun sur l'usage de protection. Cependant, nos résultats démontrent que les %RAP produisant les meilleures croissances se trouvent dans ce même intervalle proposé (46% à l'an un et 36% à l'an deux, incluant l'effet des protecteurs).

Cependant, il peut être difficile de maintenir un tel niveau de %RAP, à cause des variations temporelles qui peuvent survenir, particulièrement dans le cas de petites ouvertures. Il y aurait moins de temps écoulé avant qu'un couvert complet ne se forme au sein d'une ouverture par bande en comparaison à des trouées, car il faut une largeur de bande moins grande qu'un diamètre de trouée pour obtenir une même quantité de lumière, présumant que la longueur de la bande est plus grande que sa largeur (Aussenac, 2000). Dans le cas d'un jeune peuplement d'espèces pionnières, la croissance rapide des arbres laissés en place après une éclaircie donnant des %RAP similaires à des ouvertures va combler en peu de temps

l'espace, réduisant la lumière transmise au sous-bois (Cogliastro et Paquette, 2012). Dans un peuplement mature où le développement des houppiers est plus lent, le retour d'une canopée fermée sera également lent, même pour de faibles valeurs initiales de %RAP (Valverde *et al.* 1997). La fermeture rapide de la canopée dans notre expérience témoigne de l'importance du facteur temporel sur la lumière qui est rarement considéré dans les études en forêts matures.

Croissance

Seul un faible effet des ouvertures a été détecté à l'an un sur l'accroissement en diamètre du bouleau jaune. Le peu d'effet des traitements sur la croissance de la première année (données non présentées) peut être expliquée, outre le choc de plantation, par l'acclimatation du plant aux nouvelles conditions lumineuses. Les feuilles de début de saison de la première année, préformées l'automne précédent en pépinière, seraient moins fonction des conditions locales (Logan, 1970). L'arbre doit également s'acclimater au nouveau milieu en allouant différemment ses ressources, par exemple en favorisant les racines afin de compenser un sol moins riche (Givnish, 1988).

Bouleau jaune

Une seule étude (Bouman *et al.* 2012) rapportant la croissance de bouleaux jaunes en plantation sous couvert a pu être trouvée. Leurs résultats de croissances sont faibles, mais leur zone d'étude se trouve dans des conditions climatiques difficiles (au bord de l'océan). Sous couvert forestier, les travaux portent sur la croissance de semis issus de régénération naturelle plutôt que de plants. Les résultats de croissance obtenus du bouleau jaune concordent avec les études portant sur la régénération naturelle assistée, selon lesquelles une ouverture plus grande augmente la croissance par rapport à une ouverture plus petite, pour des %RAP allant jusqu'à 50% (Logan, 1965, 1970, Ricard *et al.* 2003, Parker, 2008, Song et Cheng, 2010, Yang *et al.* 2012). La croissance verticale du bouleau jaune de la présente étude a été jusqu'à trois fois plus grande que ce qui a été observé en régénération naturelle (Lorenzetti *et al.* 2008, Gasser *et al.* 2010, Kern *et al.* 2012). Toutefois, lorsque la végétation de compétition est bien maîtrisée, une plus grande luminosité peut favoriser la croissance (Ricard *et al.* 2003, Kern *et al.* 2012). Cependant, une croissance rapide en hauteur risque de se faire au détriment de l'accroissement en diamètre. Le rapport H/D obtenu ici est plus élevé que celui de certaines études conduites en forêt mature, que ce soit avec de grandes trouées (900 m²) (Lorenzetti *et al.* 2008) ou de plus petites (300 m² à 10 m²) (Ricard *et al.* 2003). Le ratio H/D est déterminé par la distribution de la lumière le long de l'arbre, qui elle est déterminée par l'usage de

protection et la végétation de compétition, outre l'effet des ouvertures (Pinna *et al.* 2012). L'usage de protection n'a jamais été étudié en forêts post-agricoles, où les conditions lumineuses sont différentes d'un peuplement mature. Le %RAP augmente de façon exponentielle de bas en haut d'une protection (figure 5), en limitant grandement la lumière latérale, mais peu celle provenant du sommet, ce qui favoriserait l'accroissement vertical. De plus, la protection limite l'expansion des feuilles et augmente l'auto-ombrage, ce qui pourrait stimuler la croissance verticale (Lusk *et al.* 2006). Les protections affectent aussi l'allocation des ressources ; l'augmentation du rapport houppier/diamètre dans le type petites mailles implique un plus grand investissement dans le houppier plutôt que dans les racines. Quant à la végétation de compétition, elle sera plus intense dans une jeune forêt (Cogliastro et Paquette 2012), comparativement à une forêt mature (Canham 1988, Baudet et Messier 1998), où les strates inférieures reçoivent un moins grand %RAP. L'impact de la compétition basse sur la lumière latérale est donc important en forêt post agricole si aucune intervention de maîtrise n'est effectuée.

L'augmentation du %RAP était associée à une plus forte croissance en hauteur du bouleau jaune, un allongement des branches secondaires, de la surface foliaire et du déploiement foliaire. L'augmentation de cette dernière variable témoigne indirectement d'une biomasse aérienne plus importante proportionnellement à la taille de l'arbre lorsque le %RAP est accru. Des résultats similaires, pour la même espèce, ont été obtenus en ombrières (Wayne et Bazzaz, 1993) et en régénération naturelle (Beaudet et Messier, 1998). Song et Cheng (2010) ont associé une meilleure croissance des racines du bouleau jaune à une augmentation de la lumière qui stimule l'activité bactérienne du sol et favorise les mycorhizes (Cheng *et al.* 2005). Cela se traduirait par une augmentation du diamètre. Les données de la présente étude soutiennent l'hypothèse d'une augmentation plus marquée du diamètre et possiblement des racines lorsque l'ouverture est plus grande, car il y a une tendance à la diminution du ratio hauteur/diamètre avec la taille de l'ouverture. Cependant, certains auteurs (Beaudet et Messier 1998 et Kern *et al.* 2003) n'ont pas remarqué une telle influence sur le diamètre, en milieu naturel, avec des niveaux de %RAP plus élevés et similaires à ceux de la présente étude. L'augmentation de diamètre, visible dès la première année pour le bouleau jaune (données non présentées), pourrait être associée à divers facteurs, comme l'usage de protection qui pourraient un créer microclimat favorables aux plants (Puertolas et al, 2010) ou la température du sol qui est plus élevée.

Après deux ans, la majorité des bouleaux jaunes dépassent leur protection dans l'ouverture de 9 mètres, ce qui augmente la lumière disponible et viendrait balancer la perte de lumière causée par la fermeture de la canopée. Le niveau de lumière pourrait même augmenter et ainsi assurer une forte croissance dans le temps, sachant que l'apport en lumière nécessaire afin de maintenir une bonne croissance serait plus

élevé pour des plants plus âgés (Messier et Nikinmaa, 2000, Forrester *et al.* 2014). Une croissance juvénile rapide permettrait d’assurer la régénération en dépassant le seuil de broutage par le chevreuil et en diminuant l’impact de la fermeture de la canopée, au point de différer une seconde intervention d’ouverture ou même de l’omettre.

Chêne à gros fruits

Il est possible, étant donné que le chêne prend du temps à se créer un réseau de racines, qu’il faille plus de temps afin de détecter une influence des traitements sur la hauteur produite (Bragg *et al.* 1993, Rebbeck *et al.* 2011). En comparaison à d’autres espèces, de faibles croissances en hauteur du chênes à gros fruits ont souvent été observées en début de plantation (Cogliastro, 1997, Truax *et al.* 2000, Couture, 2005). Suivant la même idée, les chênes laissent parfois mourir la portion supérieure de leur tige quand ils sont jeunes afin d’augmenter la proportion de racines par rapport aux parties aériennes (Johnson *et al.* 2009, Dey *et al.* 2012). Aussi, les quantités de lumière obtenues dans les grandes ouvertures dépassent parfois la quantité maximale que le chêne à gros fruit est capable d’utiliser pour la photosynthèse (Hamerlynck et Knapp 1994) ce qui réduit l’effet que peuvent avoir de plus grandes ouvertures. Le bouleau jaune répond davantage aux degrés d’ouverture, car son maximum photosynthétique est atteint à des quantités de lumière supérieures (Logan 1970, Wayne 1992). Une croissance plus importante de la végétation dans les grandes ouvertures a pu limiter davantage le chêne à gros fruits qui a obtenu une croissance en hauteur plus lente que le bouleau jaune. Toutefois, l’augmentation de la surface foliaire et du rapport de la pousse annuelle sur la moyenne des branches secondaires du chêne à gros fruits témoigne d’un certain effet favorable des conditions maximales de lumière disponibles pour cette espèce. La protection petites mailles a considérablement limité la progression de la disponibilité de la lumière aux plants qui suit l’augmentation de la largeur d’ouverture de bande (figure 5). Combinée à une plus forte végétation de compétition en bande de 9 mètres, l’utilisation du protecteur petites mailles offre alors peu d’avantages, notamment avec le chêne à gros fruits qui croît lentement. Les variations de %RAP entre les ouvertures vont augmenter avec le temps, étant donné leur différente vitesse de fermeture, ce qui devrait accentuer les différences de croissance. Cela pourrait dévoiler un effet à plus long terme sur la croissance du chêne à gros fruits, mais un maintien des bonnes conditions de lumière pourrait être requis. Concernant le bouleau jaune, sa bonne vitesse de croissance laisse supposer qu’il ne serait pas nécessaire d’intervenir à relativement court terme pour maintenir les bonnes conditions de lumière.

Conclusion

L'ouverture de la canopée en forêt post-agricole favorise la croissance des plants installés sous couvert. Dépendamment du but de l'intervention, deux recommandations peuvent être faites : si l'intervention vise à optimiser la production forestière, l'ouverture de 9 mètres est préférable, car elle permet une croissance plus rapide. Si l'intervention vise la restauration par l'insertion d'espèce dans le milieu, alors une ouverture intermédiaire, soit celle de 6 mètres est adéquate. Elle permet une croissance satisfaisante, tout en réduisant les perturbations du milieu, comparativement à une bande ouverte de 9 mètres. Dans tous les cas, la protection de type grandes mailles est plus avantageuse pour la croissance que le type petites mailles, bien qu'avec cette dernière la croissance soit acceptable dans l'ouverture de 9 mètres, pour le bouleau jaune.

Une maîtrise plus précoce de la végétation de compétition à proximité des plants pourrait favoriser encore plus la croissance, particulièrement pour le chêne à gros fruits qui est rapidement dépassé par la végétation adjacente durant les premières années. La largeur des ouvertures va aussi changer la limite temporelle de leur influence; une plus grande ouverture affectera les conditions de lumière plus longtemps, mais autant pour les plants que pour la végétation de compétition. Cependant, les espèces réagiront différemment à la fermeture : la croissance des grands plants de bouleaux jaunes ne serait pas autant défavorisée par la réduction de la lumière que dans le cas des petits plants, De plus, la hauteur d'une majorité de plants de cette espèce dépassera celle des protecteurs après deux ans. Ce n'est pas le cas du chêne à gros fruits, ce qui pourrait engendrer des complications pour sa régénération dans une vision à plus long terme. Malgré la maîtrise de la végétation entourant les plants lors des deux premières années, il est probable d'obtenir des plants complètement surpassés par la végétation sans intervention subséquente. La fréquence d'entretien de la végétation de compétition et la durée des bonnes conditions de lumière dans les ouvertures qui produirait une quantité finale suffisante d'arbres bien établis est incertaine, particulièrement pour le chêne.

Bibliographie

- Adjers, G., S. Hadennggan, J. Kuusipalo, K. Nurnyanto et L. Vesa (1995). Enrichment planting of dipterocarps in logged-over secondary forests: effet of width, direction and maintenance method of planting line on selected *Shorea* species. *Forest Ecology and Management* 73: 259-270.
- Aussenac, G. (2000). Interactions between forest stands and microclimate: ecophysiological aspects and consequences for silviculture. *Annals of Forest Science* 57 (3): 287–301.
- Balandier, P., C. Collet, J.H. Miller, P.E. Reynolds et S.M. Zedaker (2006). Designing Forest Vegetation Management Strategies Based on the Mechanisms and Dynamics of Crop Tree Competition by Neighbouring Vegetation. *Forestry* 79 (1): 3-27.
- Balvanera, P., A. B. Pfisterer, N. Buchmann, J.-S. He, T. Nakashizuka, D. Raffaelli et B. Schmid (2006). Quantifying the Evidence for Biodiversity Effects on Ecosystem Functioning and Services: Biodiversity and Ecosystem Functioning/services. *Ecology Letters* 9 (10): 1146-1156.
- Bartha, S., S. J. Meiners, S.T.A Pickett et M. L. Cadenasso (2003). Plant colonization windows in a mesic old field succession. *Applied Vegetation Science* 6 (2): 205–212.
- Bataineh, M., L. Kenefic, A. Weiskittel, R. Wagner et J. Brisette (2013). Influence of Partial Harvesting and Site Factors on the Abundance and Composition of Natural Regeneration in the Acadian Forest of Maine, USA. *Forest Ecology and Management* 306 : 96-106.
- Bazzaz, F. A. (1968). Succession on Abandoned Fields in the Shawnee Hills, Southern Illinois. *Ecology* 49 (5): 924.
- Beaudet, M. et C. Messier (1998). Growth and morphological responses of yellow birch, sugar maple, and beech seedlings growing under a natural light gradient. *Canadian Journal of forest research* 28 (7): 1007–1015.
- Bennett, E. M. et P. Balvanera (2007). The future of production systems in a globalized world. *Frontiers in Ecology and Environment* 5(4): 191-198.
- Benjamin, K., G. Domon et A. Bouchard (2005). Vegetation Composition and Succession of Abandoned Farmland: Effects of Ecological, Historical and Spatial Factors. *Landscape Ecology* 20 (6): 627-647.
- Blackham, G. V., E. L. Webb et R. T. Corlett (2014). Natural Regeneration in a Degraded Tropical Peatland, Central Kalimantan, Indonesia: Implications for Forest Restoration. *Forest Ecology and Management* 324 : 8-15.
- Bolton, N. W. et A. W. D’Amato (2011). Regeneration Responses to Gap Size and Coarse Woody Debris within Natural Disturbance-Based Silvicultural Systems in Northeastern Minnesota, USA. *Forest Ecology and Management* 262 (7): 1215-1222.

- Bouman, O. T., E. S. Roach et M. A. Mazzocca (2012). Survival of Three Cool-Temperate Tree Species in Shade with Lime and NPK Applications. *Flora - Morphology, Distribution, Functional Ecology of Plants* 207 (3): 179-185.
- Bowen, M. E., C. A. McAlpine, A. P.N. House et G. C. Smith (2007). Regrowth Forests on Abandoned Agricultural Land: A Review of Their Habitat Values for Recovering Forest Fauna. *Biological Conservation* 140 (3-4): 273-296.
- Bragg, W. K., A. K. Knapp, J. M. Briggs (1993). Comparative water relations of seedlings and adult Quercus species during gallery forest expansion in tallgrass prairie. *Forest Ecology and Management* 56 (1-4): 29-41
- Butaye, J., H. Jacquemyn et M. Hermy (2001). Differential colonization causing non-random forest plant community structure in a fragmented agricultural landscape. *Ecography* 24 (4): 369–380.
- Canham, C. D. 1988. An Index For Understory Light Levels in and Around Canopy Gaps. *Ecology* 69 (5): 1634-1638.
- Canham, C.D., A.C. Finzi, S.W. Pacala et D.H. Burban. (1994). Causes and consequences of resource heterogeneity in forests: interspecific variation in light transmission by canopy trees. *Canadian Journal of Forestry Research* 24: 337-349
- Cheng, S., P. Widden et C. Messier (2005). Light and Tree Size Influence Belowground Development in Yellow Birch and Sugar Maple. *Plant and Soil* 270 (1): 321-330.
- Coates, K. D. et P. J. Burton (1997). A gap-based approach for development of silvicultural systems to address ecosystem management objectives. *Forest Ecology and Management* 99: 337-354.
- Cogliastro, A., D. Gagnon et Bouchard, A. (1997). Is site preparation necessary for bur oak receiving post-planting weed control?. *Annals of Forest Science* 54(1):107-116
- Cogliastro, A. et A. Paquette (2012). Thinning Effect on Light Regime and Growth of Underplanted Red Oak and Black Cherry in Post-Agricultural Forests of South-Eastern Canada. *New Forests* 43 (5-6): 941-954.
- Collins, B. et L. L. Battaglia (2008). Oak Regeneration in Southeastern Bottomland Hardwood Forest. *Forest Ecology and Management* 255 (7): 3026-3034.
- Coomes, D. A. et P. J. Grubb (2000). Impacts of root competition in forests and woodlands: a theoretical framework and review of experiments. *Ecological monographs* 70 (2): 171–207.
- Couture, G. (2005). Effets de l'accompagnement sur l'établissement d'espèces d'arbres feuillus en plantation sur friches arbustives. Mémoire de maîtrise, Université de Montréal.
- Cramer, V., R. Hobbs et R. Standish (2008). What's New about Old Fields? Land Abandonment and Ecosystem Assembly. *Trends in Ecology and Evolution* 23 (2): 104-112.

- Crouzeilles, R., M. Curran, M. S. Ferreira, D. B. Lindenmayer, C. E. V. Grelle et J. M. R. Benayas (2016). A global meta-analysis on the ecological drivers of forest restoration success. *Nature Communications* 7: 11666.
- Davis, M. A., J. P. Grime et K. Thompson (2000). Fluctuating resources in plant communities: a general theory of invasibility. *Journal of Ecology* 88 (3): 528–534.
- Dey, D. C., E. S. Gardiner, C. J. Schweitzer, J. M. Kabrick et D. F. Jacobs (2012). Underplanting to Sustain Future Stocking of Oak (*Quercus*) in Temperate Deciduous Forests. *New Forests* 43 (5-6): 955-978.
- D'Orangeville, L., A. Bouchard et A. Cogliastro (2008). Post-Agricultural Forests: Landscape Patterns Add to Stand-Scale Factors in Causing Insufficient Hardwood Regeneration. *Forest Ecology and Management* 255 (5-6): 1637-1646.
- D'Orangeville, L., A. Bouchard et A. Cogliastro (2011). Unexpected Seedling Growth in the Understory of Post-Agricultural Forests from Eastern Canada. *Annals of Forest Science* 68 (4): 759-769.
- Drummond, M. A. et T. R. Loveland (2010). Land-use Pressure and a Transition to Forest-cover Loss in the Eastern United States. *BioScience*, 60(4), 286-298.
- Dubois, M. R., A. H. Chappelka, E. Robbins, G. Somers et K. Baker (2000). Tree shelters and weed control: effects on protection, survival and growth of cherrybark oak seedlings planted on a cutover site. *New Forests* 20 (2): 105–118.
- Environnement Canada (2010). Données des stations pour le calcul des normales climatiques au Canada de 1981-2010. Repéré sur le site d'Environnement Canada. http://climat.meteo.gc.ca/climate_normals/results_1981_2010_f.html
- Flinn, K. M. et M. Vellend (2005). Recovery of forest plant communities in post-agricultural landscapes. *Frontiers in Ecology and the Environment* 3 (5): 243–250.
- Forrester, J. A., C. G. L., J. H. Dyer, S. T. Gowe, et D. J. Mladenoff (2014). Response of Tree Regeneration to Experimental Gap Creation and Deer Herbivory in North Temperate Forests. *Forest Ecology and Management* 329: 137-147.
- Fuller, R.J. et R.M.A. Gill (2001). Ecological impacts of increasing numbers of deer in British woodland. *Forestry* 74 (3): 193-199.
- Gasser, D., C. Messier, M. Beaudet et M. J. Lechowicz (2010). Sugar Maple and Yellow Birch Regeneration in Response to Canopy Opening, Liming and Vegetation Control in a Temperate Deciduous Forest of Quebec. *Forest Ecology and Management* 259 (10): 2006-2014.
- Grandtner, M. M. (1966). La végétation forestière du Québec méridional. Québec, Presses de l'Université Laval, 216 p.

- Grenon, L., J.-M. Cossette, M. Deschênes et L. Lamontagne (1999). Étude pédologique du comté de Rouville, Québec. Direction générale de la recherche, Agriculture et Agroalimentaire Canada. Bulletin d'extension no 10, Centre de recherche et de développement sur les sols et les grandes cultures. 263 p.
- Haack, R. A., E. Jendek, H. Lui, K. R. Marchant, T. R. Petrice, T. M. Poland et H. Ye (2002). The emerald ash borer: a new exotic pest in North America. *Newsletter of the Michigan Entomological Society* 47: 1-5.
- Hanberry, B. B., D. C. Dey et H. S. He (2014). The History of Widespread Decrease in Oak Dominance Exemplified in a Grassland–forest Landscape. *Science of The Total Environment* 476-477 : 591-600.
- Hobbs, R. J., S. Arico, J. Aronson, J. S. Baron, P. Bridgewater, V. A. Cramer... M. Zobel. (2006). Novel Ecosystems: Theoretical and Management Aspects of the New Ecological World Order. *Global Ecology and Biogeography* 15 (1): 1-7.
- Holladay, C.-A., C. Kwit et B. Collins. (2006). Woody Regeneration in and around Aging Southern Bottomland Hardwood Forest Gaps: Effects of Herbivory and Gap Size. *Forest Ecology and Management* 223 (1-3): 218-225.
- Hooper, E., R. Condit et P. Legendre (2002). Responses of 20 native tree species to reforestation strategies for abandoned farmland in Panama. *Ecological Applications* 12 (6): 1626–1641.
- Huot, M. et F. Lebel (2012). Plan de gestion du cerf de Virginie au Québec 2010-2017. Québec, Ministère des Ressources naturelles et de la Faune.
- Johnson, P. S., S. R. Shifley and R. Rogers (2009). Ecology and Silviculture of Oaks - 2nd ed. Cambridge, MA, CABI North American Office, 580 p.
- Keever, C. (1983). A Retrospective View of Old-field Succession after 35 Years. *American Midland Naturalist* 110 (2): 397-404.
- Kern, C. C., P. B. Reich, R. A. Montgomery et T. F. Strong (2012). Do Deer and Shrubs Override Canopy Gap Size Effects on Growth and Survival of Yellow Birch, Northern Red Oak, Eastern White Pine, and Eastern Hemlock Seedlings?. *Forest Ecology and Management* 267 : 134-143.
- Kraft, L. S., T. R. Crow, D. S. Buckley, E. A. Nauertz et J. C. Zasada (2004). Effects of Harvesting and Deer Browsing on Attributes of Understory Plants in Northern Hardwood Forests, Upper Michigan, USA. *Forest Ecology and Management* 199 (2-3): 219-230.
- Kuiters, A. T. et P. A. Slim (2002). Regeneration of mixed deciduous forest in a Dutch forest-heathland, following a reduction of ungulate densities. *Biological Conservation* 105 (1): 65–74.
- Laliberté, E., A. Bouchard et A. Cogliastro (2008). Optimizing Hardwood Reforestation in Old Fields: The Effects of Treeshelters and Environmental Factors on Tree Seedling Growth and Physiology. *Restoration Ecology* 16 (2): 270-280.

- Langvall, O. et M. O. Löfvenius (2002). Effect of shelterwood density on nocturnal near-ground temperature, frost injury risk and budburst date of Norway spruce. *Forest Ecology and Management* 168: 149-161.
- Lieffers, V.J. et K.J. Stadt (1993). Growth of understory *Picea glauca*, *Calamagrostis canadensis*, and *Epilobium angustifolium* in relation to overstory light transmission. *Canadian Journal of Forestry Research* 24:1193-1198
- Logan, K.T. (1965). Growth of tree seedlings as affected by light intensity I. White birch, yellow birch, sugar maple and silver maple. Gouvernement du Canada, Service Canadien des forêts, Catalog ID 24679.
- Logan, K. T. (1970). Adaptations of the photosynthetic apparatus of sun- and shade-grown yellow birch (*Betula alleghaniensis* Britt.). *Canadian Journal of Botany* 48: 1681-1688.
- Lorenzetti, F., S. Delagrange, D. Bouffard et P. Nolet (2008). Establishment, Survivorship, and Growth of Yellow Birch Seedlings after Site Preparation Treatments in Large Gaps. *Forest Ecology and Management* 254 (2): 350-361.
- Lusk, C. H., D. S. Falster, M. Pérez-Millaqueo et A. Saldana (2006). Ontogenetic variation in light interception, self-shading and biomass distribution of seedlings of the conifer *Araucaria araucana* (Molina) K. Koch. *Revista Chilena de Historia Natural* 79 (3): 321–328.
- Masek, J. G., W. B. Cohen, D. Leckie, M. A. Wulder, R. Vargas, B. de Jong... W. B. Smith (2011). Recent Rates of Forest Harvest and Conversion in North America. *Journal of Geophysical Research* 116, G00K03.
- McLachlan, S.M et D.R Bazely (2003). Outcomes of Longterm Deciduous Forest Restoration in Southwestern Ontario, Canada. *Biological Conservation* 113 (2): 159-169.
- Meilleur, A., A. Bouchard et Y. Bergeron (1994). The relation between geomorphology and forest community types of the Haut-Saint-Laurent, Quebec. *Vegetatio* 111 (2): 173–192.
- Meng, J., Y. Lu et J. Zeng (2014). Transformation of a Degraded *Pinus Massoniana* Plantation into a Mixed-Species Irregular Forest: Impacts on Stand Structure and Growth in Southern China. *Forests* 5 (12): 3199-3221.
- Messier, C. et E. Nikinmaa (2000). Effects of light availability and sapling size on the growth, biomass allocation, and crown morphology of understory sugar maple, yellow birch, and beech. *Écoscience* 7 (3): 345-356.
- Mitchell, K. (2015). Quantitative analysis by the point-centered quarter method . New York: Hobart and William Smith Colleges. arXiv:1010.3303v2 [q-bio.QM].
- Oosting, H. J. (1942). An Ecological Analysis of the Plant Communities of Piedmont, North Carolina. *American Midland Naturalist* 28 (1): 1-126.

- Oswalt, C. M., W. K. Clatterbuck et A. E. Houston (2006). Impacts of Deer Herbivory and Visual Grading on the Early Performance of High-Quality Oak Planting Stock in Tennessee, USA. *Forest Ecology and Management* 229 (1-3): 128-135.
- Paquette, A., A. Bouchard et A. Cogliastro (2006a). Survival and growth of under-planted trees: a meta-analysis across four biomes. *Ecological Applications* 16 (4): 1575–1589.
- Paquette, A., A. Bouchard et A. Cogliastro (2006b). Successful under-planting of red oak and black cherry in early-successional deciduous shelterwoods of North America. *Annals of Forest Science* 63 (8): 823-31.
- Paquette, A., A. Bouchard et A. Cogliastro (2007a). A Less Restrictive Technique for the Estimation of Understory Light under Variable Weather Conditions. *Forest Ecology and Management* 242 (2-3): 800-804.
- Paquette, A., A. Bouchard et A. Cogliastro (2007b). Morphological plasticity in seedlings of three deciduous species under shelterwood under-planting management does not correspond to shade tolerance ranks. *Forest Ecology and Management*, 241(1-3), 278-287.
- Paquette, A., J. Hawryshyn, A. V. Senikas et C. Potvin (2009). Enrichment planting in secondary forests: a promising clean development mechanism to increase terrestrial carbon sinks. *Ecology and Society* 14 (1): 31.
- Parent, S. et C. Messier 1996. A simple and efficient method to estimate microsite light availability under a forest canopy. *Canadian Journal of Forestry Research* 26: 151-154
- Parker, W. C., K. A. Elliott, D. C. Dey et E. Boysen (2008). Restoring southern Ontario forests by managing succession in conifer plantations. *The Forestry Chronicle* 84 (1): 83–94.
- Perring, M. P., R. J. Standish, K. B. Hulvey, L. Lach, T. K. Morald, R. Parsons, R. K. Didham et R. J. Hobbs (2012). The Ridgefield Multiple Ecosystem Services Experiment: Can Restoration of Former Agricultural Land Achieve Multiple Outcomes?. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 163: 14-27.
- Pinna, S., A. Malenfant et M. Côté (2012). Vigor and Growth Responses of Sugar Maple and Yellow Birch Seedlings According to Different Competing Vegetation Types and Fabric Shelter Use. *Northern Journal of Applied Forestry* 29 (3): 133-40.
- Poland, T. M. et D. G. McCullough (2006). Emerald ash borer: invasion of the urban forest and the threat to North America's ash resource. *Journal of Forestry* 104 (3): 118–124.
- Puértolas, J., J. A. Oliet, D. F. Jacobs, L. F. Benito, et J. L. Peñuelas (2010). Is light the key factor for success of tube shelters in forest restoration plantings under Mediterranean climates? *Forest Ecology and Management*, 260(5), 610-617.

- Ramankutty, N. et J. A. Foley (1999). Estimating historical changes in land cover: North American croplands from 1850 to 1992. *Global Ecology and Biogeography* 8 (5): 381–396.
- Rebbeck, J., K. Gottschalk et A. Scherzer (2011). Do Chestnut, Northern Red, and White Oak Germinant Seedlings Respond Similarly to Light Treatments? Growth and Biomass. *Canadian Journal of Forest Research* 41 (11): 2219-2230.
- Ricard, J.-P., C. Messier, S. Delagrange et M. Beaudet (2003). Do understory sapling respond to both light and below-ground competition?: a field experiment in a north-eastern American hardwood forest and a literature review. *Annals of Forest Science* 60 (8): 749-756.
- Robison, D. J., J. L. Schuler, L. Jervis, J. L. Cox et P. J. Birks (2004). Individual tree release and enrichment planting in young natural upland hardwoods. Proceedings of the 12th biennial southern silvicultural research conference. Gen. Tech. Rep. SRS–71. Asheville, NC: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Southern Research Station. pp. 283-286
- Schuler, J. L. et D. J. Robison (2010). Performance of Northern Red Oak Enrichment Plantings in Naturally Regenerating Southern Appalachian Hardwood Stands . *New Forests* 40 (1): 119-130.
- Schwartz, G., J. C.A. Lopes, G. M.J. Mohren et M. Peña-Claros (2013). Post-Harvesting Silvicultural Treatments in Logging Gaps: A Comparison between Enrichment Planting and Tending of Natural Regeneration. *Forest Ecology and Management* 293: 57-64.
- Siegert, N. W., D. G. McCullough, A. M. Liebhold et F. W. Telewski (2014). Dendrochronological Reconstruction of the Epicentre and Early Spread of Emerald Ash Borer in North America. Édité par Hugh MacIsaac. *Diversity and Distributions* 20 (7): 847-858.
- Siitonen, J., P. Martikainen, P. Punttila et J. Rauh (2000). Coarse woody debris and stand characteristics in mature managed and old-growth boreal mesic forests in southern Finland. *Forest Ecology and Management* 128 : 211-225.
- Song, H.T. et S. Cheng (2010). Various growth strategies of yellow birch seedlings in multiple-abiotic factors changing environments. *Plant Soil Environment* 56 (5): 235-243
- Staaland, H., Ø. Holand, C. Nellemann et M. Smith (1998). Time Scale for Forest Regrowth: Abandoned Grazing and Agricultural Areas in Southern Norway. *Ambio* 27 (6): 456-460
- Stanturf, J. A., B. J. Palik et R. K. Dumroese (2014). Contemporary Forest Restoration: A Review Emphasizing Function. *Forest Ecology and Management* 331: 292-323.
- Truax, B., F. Lambert et D. Gagnon (2000). Herbicide-free plantation of oaks and ashes along a gradient of open to forested mesic environments. *Forest Ecology and Management* 137: 155-169
- Valverde, T. et J. Silvertown (1997). Canopy closure rate and forest structure. *Ecology* 78 (5): 1555–1562.

- van Kuijk, M., N. P. R. Anten, R. J. Oomen et F. Schieving (2014). Stimulating seedling growth in early stages of secondary forest succession: a modeling approach to guide tree liberation. *Frontiers in Plant Science* 5:345
- Walters, M. B. et P. B. Reich. (1996). Are Shade Tolerance, Survival, and Growth Linked? Low Light and Nitrogen Effects on Hardwood Seedlings. *Ecology* 77 (3): 841-853.
- Wayne, P. M. et F. A. Bazzaz (1993). Birch Seedling Responses to Daily Time Courses of Light in Experimental Forest Gaps and Shadehouses. *Ecology* 74 (5): 1500-1515.
- Williams, R. D. (1990). Black walnut (*Juglans nigra* L.). Dans *Silvics of North America*, eds. R. M. Burns and B. H. Honkala, pp. 1–14. Washington, DC: USDA
- Yang, G., H. Chen, S. Cheng et H. Yu (2012). Interactive Effects of Canopy Gap, Liming and Understory Control on Aboveground Growth of Yellow Birch and Sugar Maple Seedlings. *Ekoloji* 21 (84): 1-8.

Tableaux

Tableau I: Paramètres de trois types de protections contre les cervidés

	Nombre de piquet de soutien	Diamètre (cm)	Hauteur (cm)	Taille des mailles (cm)	Surface opaque (%)
Témoin	3	30	140	2,5	2
Grandes mailles	2	30	140	2,5	19
Petites mailles	2	20	80	0,2	72

Tableau II: Pourcentage moyen (écart-type) de lumière mesuré dans la forêt, au centre des ouvertures par bandes et au centre des interbandes, à différentes hauteurs. « - » = non mesuré
*Cette valeur correspond à la proportion de lumière qui est interceptée par la végétation se situant dans la strate 5-200 centimètres de hauteur.

Hauteur (cm)	Forêt	3 mètres		6 mètres		9 mètres		interbandes
	An 1	An 1	An 2	An 1	An 2	An 1	An 2	An 1
200	-	32 (16)	16 (7)	54 (20)	33 (17)	61 (11)	48 (8)	-
125	6 (5)	29 (13)	-	48 (20)	-	57 (13)	-	15 (8)
75	-	26 (13)	-	49 (22)	-	61 (15)	-	-
5	-	-	9 (7)	-	11 (10)	-	12 (12)	-
1-(5/200)*	-	-	42 (38)	-	64 (23)	-	75 (22)	-
n=	48	180	180	180	180	180	180	66

Tableau III: Effets d'ouverture par bande et de protections individuelles contre les cervidés sur la croissance du bouleau jaune (BOJ) et du chêne à gros fruits (CHG), lors de la 2ème année après la plantation. P= petites mailles, G=grandes mailles, T=témoin, H/D=hauteur/diamètre. Pour chaque espèce, les moyennes de chaque colonne suivie d'une même lettre ne diffèrent pas significativement (alpha=0,05) selon la largeur d'ouverture ou le type de protection.

Espèce	Ouverture	Protection	Accroissement hauteur (cm)			Accroissement diamètre (mm)			H/D			Hauteur finale (cm)			
BOJ	3m	P	20,71	y	b	0,78	y	c	18,65	x	a	96,79	y	b	
		G	50,38	x		2,80	x		15,80	y		124,95	x		
		T	37,45	x		1,99	x		15,30	y		107,99	x		
	6m	P	27,78	y	b	1,23	y	b	17,36	x	a	96,74	y	b	
		G	57,32	x		3,18	x		15,32	y		128,50	x		
		T	48,39	x		3,36	x		13,49	y		128,14	x		
	9m	P	43,64	y	a	2,32	y	a	17,26	x	a	124,60	y	a	
		G	71,58	x		4,67	x		13,60	y		142,01	x		
		T	75,92	x		5,32	x		13,66	y		152,54	x		
	Valeur p				0,0071	0,0154		0,0001	0,0001		0,0006	0,1774		0,0147	0,032
	CHG	3m	P	-3,35	x	a	-0,04	y	b	7,15	y	a	53,42	x	a
			G	0,19	x		1,08	x		7,04	xy		66,41	x	
T			-1,72	x	0,48		x	6,97		x	66,31		x		
6m		P	4,34	x	a	0,32	y	ab	7,27	y	a	60,63	x	a	
		G	0,23	x		0,99	x		5,96	xy		54,89	x		
		T	6,69	x		2,04	x		5,95	x		66,69	x		
9m		P	14,16	x	a	0,73	y	a	8,45	y	a	74,75	x	a	
		G	13,28	x		2,05	x		7,17	xy		76,92	x		
		T	4,31	x		2,29	x		6,15	x		66,31	x		
Valeur p				0,8323	0,1972		0,0053	0,0109		0,0178	0,3035		0,7837	0,1516	

Tableau IV: Effets de la largeur d'ouverture par bande et du type de protection contre les cervidés sur la surface foliaire, la concentration en chlorophylle et différentes caractéristiques morphologiques du bouleau jaune. O=ouverture, p=protection, les valeurs en gras ont un $p \leq 0,05$. En souligné, les valeurs entre 0,05 et 0,1.

variable	Ouverture (O)	Protection (P)	O x P
Surface foliaire (mm ²)	0,4893	<u>0,0657</u>	0,8317
Chlorophylle	0,0183	0,0334	0,9039
Extension growth index (cm/cm)	0,8204	0,1068	0,7108
proportion de houppier vivant (cm/cm)	0,6309	0,9939	0,3477
Déploiement foliaire (cm ² /cm)	0,8894	<u>0,0510</u>	0,5916
hauteur/longueur totale des branches secondaires (cm/cm)	0,5273	<u>0,0670</u>	0,321
nombre de branches secondaires	0,8855	<u>0,0913</u>	0,251
somme des branches secondaires (cm)	0,2892	0,0149	0,3836
Houppier/diamètre (cm/mm)	0,8395	0,0280	0,5161

Tableau V: Régression logarithmique (pour la variable générale) et linéaire (pour les variables morphométriques) entre la lumière et différentes variables de croissance, sur des plants de bouleau jaune et de chêne à gros fruit, après deux saisons de croissance.

		Bouleau jaune		Chêne à gros fruit	
		R ²	valeur de p	R ²	valeur de p
Générale	Accroissement en diamètre	0,318	0,0001	0,188	0,0001
	Moyenne des branches secondaires	0,22	0,0004	-	-
Morphométriques	Surface foliaire	0,156	0,0033	0,147	0,0043
	Indice d'extension latérale	-	-	0,105	0,0202
	Déploiement foliaire	0,129	0,0084	-	-

Tableau VI: Effet des ouvertures par bandes sur les conditions du sol (écart-type), durant la 2ème année suivant leur création. Les valeurs suivies de la même lettre ne diffèrent pas significativement (alpha=0,05).

Ouverture	Température 5cm juillet (°C)		Température 17cm juillet (°C)		Humidité (%)		n
9 mètres	24,3 (2,7)	a	20,4 (0,6)	a	41,3 (6,8)	a	30
6 mètres	23,9 (1,8)	a	20,4 (0,5)	a	42,2 (5,8)	a	30
3 mètres	23,3 (1,8)	a	20,1 (0,5)	a	41,8 (4,8)	a	30
Interbande	21,7 (1,0)	ab	19,5 (0,6)	b	39,9 (6,7)	ab	66
Forêt	20,9 (0,7)	b	19,0 (0,4)	b	36,8 (7,1)	b	48
p=		0,0003		0,0001		0,0062	

Figures

	Largeurs bandes	--9--			--6--			-3-	
		x	x		x	x		x	x
	Zone	x	x		x	x		x	x
	Tampon	x	x		x	x		x	x
		x	x		x	x		x	x
1									
2									
3									
4									
5									
6									
7									
8									
9									
10									
11									
12									
13									
14									
15									
16									
17									
18									
19									
20									
21									
22									
23									
24									
25									
26									
27									
28									
29									
30									
31									
32									
33									
34									
35									
36									
	Zone	x	x		x	x		x	x
	Tampon	x	x		x	x		x	x
		x	x		x	x		x	x

Figure 1 : Exemple d'un bloc: a=bouleau jaune, b=noyer noir, c=chêne à gros fruits, C=petites mailles, G=grandes mailles, T=cage à poule. Les points bleus sont les transects. Les zones grises représentent les bandes de 6 mètres de forêt intacte.



Figure 2 : Protections utilisées. De gauche à droite : Cage à poule, Vexar^{MD}, ClimaNet^{MD}.

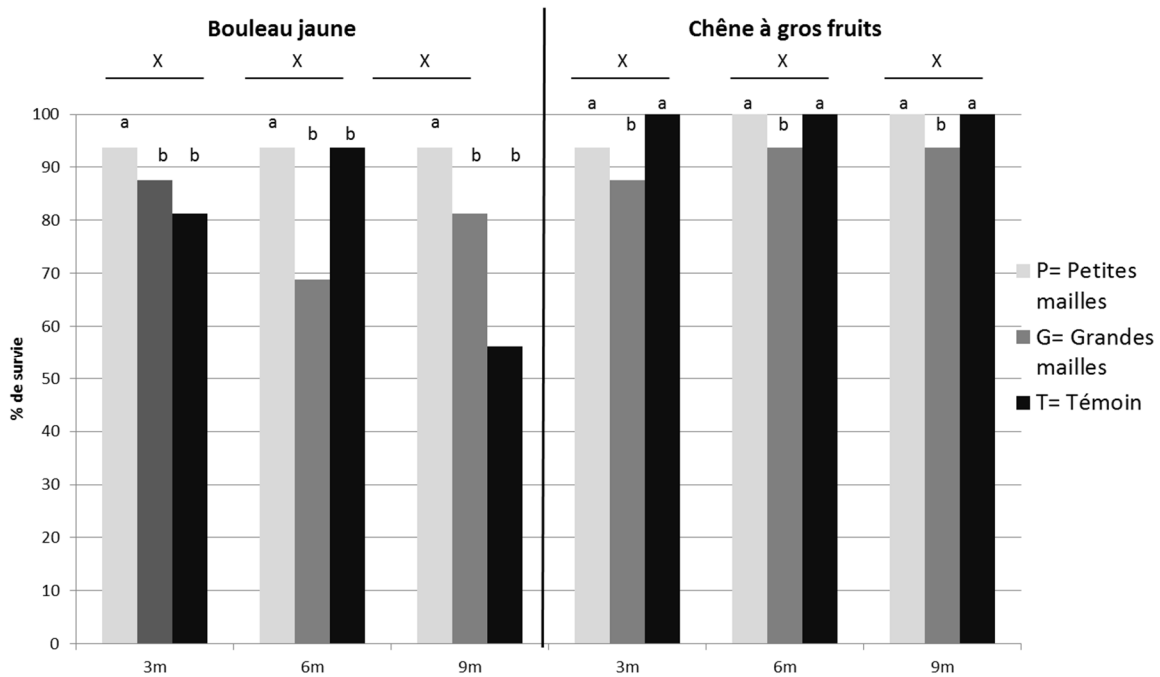


Figure 3: Taux de survie de plants de bouleau jaune et de chêne à gros fruits après deux saisons de croissance selon la largeur d'ouverture par bande et le type de protection. Bouleau jaune : effet ouverture $p=0,57$, effet protection $p=0,0138$, interaction $p=0,01682$. Chêne à gros fruits : effet des ouvertures $p=0,4627$, effet des protections $p=0,0457$, interaction $p=0,8862$. Les valeurs suivies de la même lettre ne diffèrent pas significativement ($\alpha=0,05$).

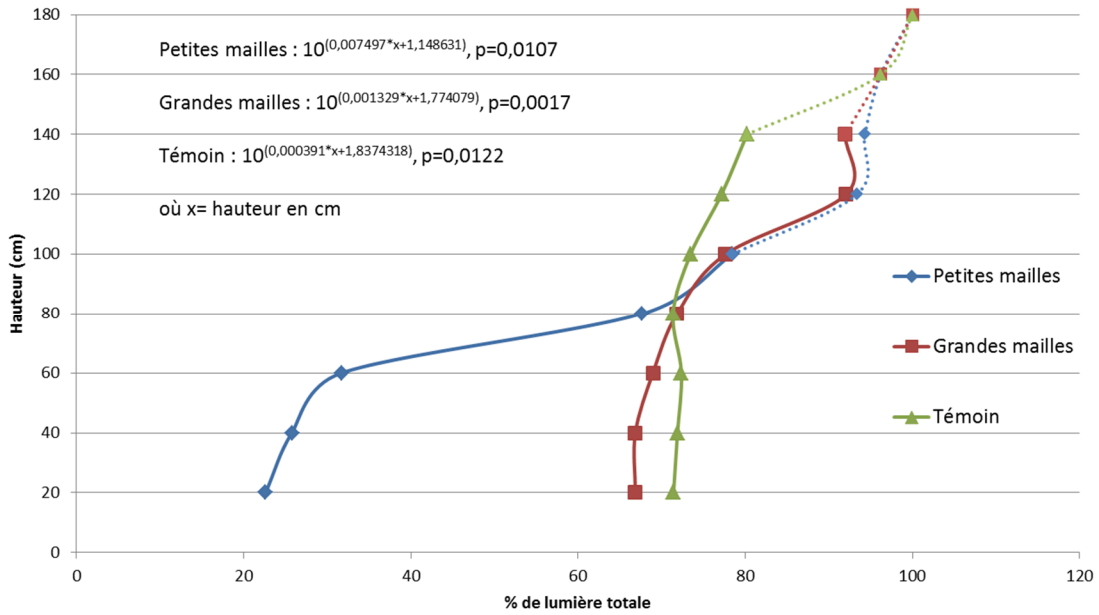


Figure 4: Lumière transmise à l'intérieur de trois types de protection contre les cervidés en fonction de la hauteur. En pointillé, la lumière à ces hauteurs n'est interceptée que par les piquets servant à fixer les protections.

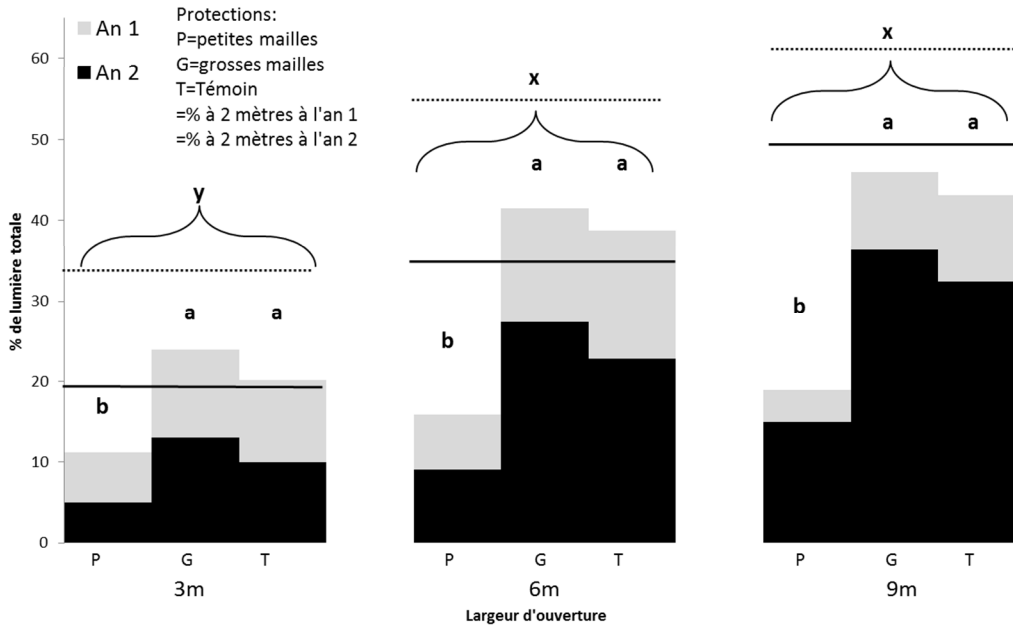


Figure 5: Moyenne annuelle de % de lumière pénétrant à l'intérieur des protections (intégrée sur toute la hauteur), selon chacune des largeurs d'ouverture par bande. An 1 : Effet ouverture $p=0,0015$; Effet protection $p<0,0001$ An 2 : Effet ouverture $p<0,0001$; Effet protection $p=0,0001$. Les effets sont les mêmes à l'an 2 qu'à l'an 1. Les valeurs suivies de la même lettre ne diffèrent pas significativement ($\alpha=0,05$).

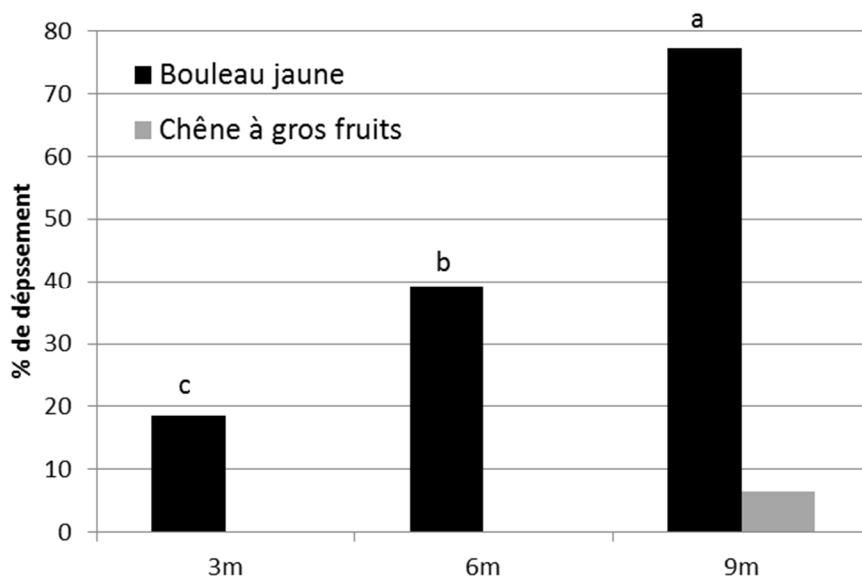


Figure 7: Pourcentage d'arbres qui dépassent leur protection après deux ans de croissance, selon l'ouverture dans laquelle ils ont poussés. Effet sur le bouleau : $p=0,0001$. Effet sur le chêne : $p=0,1086$. Les valeurs suivies de la même lettre ne diffèrent pas significativement ($\alpha=0,05$).

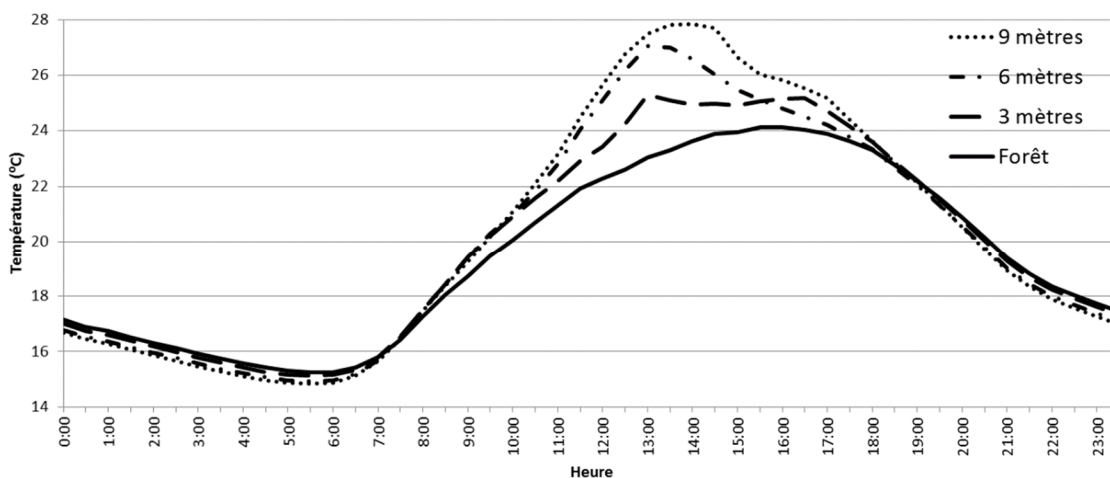


Figure 6 : Profil de température moyenne de l'air durant 24h, selon l'ouverture, données récoltées de juin à août 2015.