

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC EN ABITIBI-TÉMISCAMINGUE

BIOMASSE ET PRODUCTIVITÉ DES CÉPÉES DE DIFFÉRENTS PEUPLIERS
HYBRIDES EN TAILLIS À COURTE ROTATION EN RÉGION BORÉALE

MÉMOIRE
PRÉSENTÉ
COMME EXIGENCE PARTIELLE
DE LA MAÎTRISE EN ÉCOLOGIE

PAR
NADA ALOUI

FÉVRIER 2022

DÉDICACES

“Ce n'est pas la force, mais la persévérance, qui fait les grandes œuvres.” Samuel Johnson

À mon cher papa Aloui Mohsen, pour m'avoir enseigné le droit chemin et avoir cultivé en moi le sens des responsabilités, rien ne vaut la quintessence de ses conseils.

À ma très chère maman Messaoudi Hasnia, douceur inédite, l'être qui m'a appris la patience, la persévérance et la confiance en soi. Ma source d'inspiration et mon rayon de soleil.

C'est à vous donc, chers parents, que revient tout l'honneur. Mes mots sont bien trop petits et trop faibles pour exprimer toute ma reconnaissance aux efforts inlassables que vous avez consentis pour mon éducation et ma formation.

À ma sœur Aloui Nawres et mon petit frère Aloui Mohamed-Amine, deux anges sans lesquels je ne pourrais parler famille. Avec eux tout n'est qu'amour, joie et félicité.

REMERCIEMENTS

Au terme de ce travail, tout le plaisir est pour moi, en cet instant précieux, d'adresser toute ma reconnaissance à tous les intervenants à différents grades et niveaux dans la réalisation de ce travail. Je nomme à cet effet :

La professeure Annie DesRochers, enseignante chercheure et directrice de ma maîtrise, qui a encadré ce travail depuis sa conception jusqu'à sa réalisation. Qu'elle trouve ici toute ma reconnaissance. Elle a répondu à toutes mes questions, révisé et corrigé sans relâche et aussi souvent que nécessaire mes différents travaux pour me permettre d'aboutir au présent travail. Grâce à son précieux soutien scientifique malgré ses multiples occupations, ses conseils, ses encouragements, sa grande disponibilité, me permettant de passer une expérience très enrichissante sur tous les plans. Veuillez recevoir chère professeure toute ma gratitude pour votre apport.

Je remercie Monsieur Richard Charron qui nous a aidé sur le terrain à Villebois et Madame Odette Rousseau la propriétaire de la terre à La Corne. Qu'ils trouvent ici toute ma reconnaissance.

Je remercie également Hermine Nguena et Ablo Paul Igor Hounzandji qui ont répondu à toutes mes interrogations durant les consultations en statistiques.

Je tiens à remercier les organismes qui ont financé mon projet, dont le Groupement Forestier Coopératif Abitibi, le Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs (MFFP), l'Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue (UQAT) et le Conseil de Recherches en Sciences Naturelles et en Génie du Canada (CRSNG).

J'adresse mes remerciements les plus profonds à mes chers amis Ablo et Diary pour leur soutien inébranlable. Merci encore une fois pour les moments partagés.

Les amis et collègues du campus d'Amos et de Rouyn-Noranda que j'ai rencontrés durant cette belle aventure et qui m'ont grandement aidée surtout sur le terrain, merci pour votre soutien et merci pour ces moments agréables Ablo, Diary, Olivier, Daniel, Naceur, Léa, Elyasse, Jenna, Nathalie, Myriam, Maciré, Fatimata, Maïsa, Ange-Marie, Marwa, Salma, William, Abdo et tous les stagiaires ...

Le personnel et le corps enseignant de l'UQAT du campus de Rouyn et d'Amos pour leur soutien. Je remercie spécifiquement Mebarek Lamara, Dany Charron, Hélène Lavoie, Danièle Laporte, Marie-Hélène Longpré pour leur support moral et logistique et qui n'ont cessé de me soutenir de différentes manières. Veuillez recevoir toute ma sincère gratitude.

À toutes mes connaissances au Canada et dans le monde à travers leurs pensées. Un gros merci à tous !

AVANT-PROPOS

Ce mémoire s'inscrit dans le programme de Maîtrise en écologie de l'Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue (UQAT). Il se divise en trois chapitres. Le premier chapitre comprend l'introduction générale, qui décrit l'état des connaissances sur la culture du taillis à courte rotation de peuplier hybride en région boréale et les facteurs affectant la production de biomasse des clones de peuplier. Dans ce même chapitre seront annoncés l'objectif général du projet de recherche et les hypothèses. Le deuxième chapitre est rédigé sous forme d'article scientifique et présente une introduction à ce travail expérimental, la méthodologie, les résultats et la discussion des résultats obtenus. Ce dernier sera soumis à la revue « Biomass and Bioenergy » avec comme auteur, « Nada Aloui et Annie DesRochers ». Je suis la principale responsable de l'étude, de la collecte des données, de leur analyse et de la rédaction de l'article. Ma directrice a contribué à la conception de l'étude et m'a assisté dans l'interprétation des résultats. Elle aussi révisé de manière critique et constructive le contenu de l'article. Finalement le troisième chapitre contient la conclusion générale, les implications, les perspectives et les limites de l'étude.

TABLE DES MATIÈRES

LISTE DES FIGURES.....	vii
LISTE DES TABLEAUX.....	viii
LISTE DES ABRÉVIATIONS.....	ix
RÉSUMÉ	x
CHAPITRE I INTRODUCTION GÉNÉRALE.....	1
1.1 Mise en contexte	1
1.2 Problématique	2
1.3 États des connaissances.....	3
1.3.1 Les peupliers hybrides en taillis à courte rotation.....	3
1.3.2 Taxonomie et aperçu sur le genre <i>Populus</i>	4
1.3.3 Recépage	6
1.3.4 Facteurs affectant la production de biomasse des clones de peuplier hybride.....	8
1.4 Les hypothèses et les objectifs.....	10
CHAPITRE II BIOMASSE ET PRODUCTIVITÉ DES CÉPÉES DE DIFFÉRENTS PEUPLIERS HYBRIDES EN TAILLIS À COURTE ROTATION EN RÉGION BORÉALE	12
2.1 Résumé.....	13
2.2 Introduction.....	14
2.3 Matériel et méthodes.....	17
2.3.1 Site d'étude	17
2.3.2 Dispositif expérimental	17
2.3.3 Prise des mesures et échantillonnage	18
2.3.4 Analyses statistiques	19
2.4 Résultats.....	20
2.5 Discussion.....	28
2.6 Remerciements.....	34
2.7 Déclaration de la contribution de l'auteur.....	34
CHAPITRE III CONCLUSION GÉNÉRALE	35
3.1 Limites de l'étude	37
3.2 Futur Projet	38
3.3 Implications pour l'aménagement forestier durable	40
RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES	42

LISTE DES FIGURES

Figure		Page
2.1	Taux de survie des différents clones. Les barres correspondent aux erreurs types de la moyenne. Les lettres différentes entre les barres indiquent des différences significatives entre les moyennes au niveau de signification $P < 0,05$	22
2.2	Hauteur moyenne (a) et diamètre à 30 cm (b) des tiges en fonction du clone et de l'espacement. Les moyennes partageant les mêmes lettres ne sont pas significativement différentes au niveau de signification $P < 0,05$. Les barres correspondent aux erreurs types de la moyenne.....	23
2.3	Effet du clone et de l'espacement sur le nombre moyen de tiges par pied-mère. Les moyennes partageant les mêmes lettres ne sont pas significativement différentes au niveau de signification $P < 0,05$. Les barres correspondent aux erreurs types de la moyenne.....	24
2.4	Variation de la biomasse totale par souche en fonction du nombre de tige produit.....	26
2.5	Biomasse totale par hectare en fonction du clone (a) et de l'espacement (b), volume total des tiges à l'hectare en fonction du clone (c) et de l'espacement (d). Les moyennes partageant les mêmes lettres ne sont pas significativement différentes au niveau de signification $P < 0,05$. Les barres correspondent aux erreurs types de la moyenne.....	27
2.6	Densité du bois en fonction du clone et de l'espacement. Les moyennes partageant les mêmes lettres ne sont pas significativement différentes au niveau de signification $P < 0,05$. Les barres correspondent aux erreurs types de la moyenne.....	28

LISTE DES TABLEAUX

Tableau		Page
2.1	Analyse de variance (ANOVA) montrant les sources de variation, degrés de liberté (dl) et les valeurs de F du diamètre des tiges à 30 cm (D30) et à 50 cm (D50), la hauteur, la densité du bois, le nombre de tiges par souche, la biomasse, le volume et le taux de survie.....	21
2.2	Effet de la circonférence de la souche et l'espacement sur le nombre de tiges produit. Les astérisques indiquent des probabilités significatives pour les tests : *, $P \leq 0,05$	25

LISTE DES ABRÉVIATIONS

CRSNG :	Conseil de Recherches en Sciences Naturelles et en Génie
MFFP :	Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs
N :	azote
PEH :	peuplier hybride
P :	<i>Populus</i>
TCR :	taillis à courte rotation
UQAT :	Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue

RÉSUMÉ

Les taillis à courte rotation (TCR) sont des cultures intensives d'arbres plantés à forte densité, servant à la production de biomasse ligneuse. L'objectif de cette étude était d'évaluer la productivité en TCR et la réponse au recépage de différents clones de peuplier hybride (PEH) en termes de nombre et grosseur des tiges, de biomasse des tiges produites par souche et par hectare en fonction de l'espacement entre les pieds-mère. La capacité de recépage a été évaluée à partir d'une plantation en TCR établie en 2010 à Val Senneville (Abitibi-Témiscamingue), recépée une fois en 2012 et une deuxième fois en 2018. Le dispositif d'étude présentait 6 clones de peuplier hybride, plantés en simple rangée suivant trois espacements 30x30 cm, 40x40 cm et 60x60 cm correspondant à des densités de plantation de 16 000, 10 000 et 5 500 arbres par hectare. La hauteur totale des tiges, le diamètre et le nombre de tiges produites par souche ont été mesurés à la fin de la saison de croissance 2019. La biomasse à l'hectare produite deux ans après le deuxième recépage a varié de 5,47 à 17,04 T ha⁻¹. Le diamètre moyen des tiges a été influencé par l'espacement mais pas pour tous les clones. Le nombre de tiges produites a augmenté avec la circonférence des souches ainsi qu'avec l'espacement, tandis que la densité de bois a diminué avec l'augmentation de l'espacement. Il y avait une corrélation positive entre le nombre de tiges par souche et la biomasse produite par pieds-mère. Cette étude a montré que la biomasse à l'hectare augmentait avec la réduction de l'espacement entre les pieds-mère 2 ans après le recépage, toutefois cette réponse à l'espacement était variable selon les clones.

Mots clés : Biomasse, peuplier hybride, clones, productivité, taillis à courte rotation

CHAPITRE I

INTRODUCTION GÉNÉRALE

1.1 Mise en contexte

Les ressources forestières au Canada sont d'une grande ampleur, avec autour de 347 millions d'hectares de terres forestières et d'une importance économique évidente (Ressources Naturelles Canada, 2018). Au Québec, la forêt s'étendait sur une superficie de 76 110 000 hectares en 2014 (Salmon, 2016). Au cours des dernières années, le manque de prévisibilité des approvisionnements en bois associé à la compétition pour l'utilisation des terres en termes d'augmentation en aires protégées, et d'autres utilisations à savoir la chasse et la villégiature ont été identifiés comme des facteurs qui entravent la compétitivité du secteur forestier. Une diminution de l'approvisionnement en bois des forêts naturelles accentue le besoin de gérer plus intensivement les terres encore disponibles. Assurer la stabilité des approvisionnements et la production d'un grand volume de bois qui répond aux caractéristiques recherchées par l'industrie (Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs, 2020) et restaurer les terres agricoles et forestières abandonnées sont donc prioritaires dans la gestion des forêts boréales québécoises (Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs, 2015).

La foresterie à courte rotation est un concept de la sylviculture apparu dans les années soixante pour atténuer la forte demande de ressources forestières à l'échelle planétaire (FAO, 2001). Elle a profité du progrès technologique et de l'amélioration génétique, ce qui a servi à l'émergence de nouvelles espèces issues de croisements interspécifiques

de plusieurs espèces de peuplier. Les clones de peuplier hybride utilisés au Canada, sont principalement issus de croisements spécifiques entre trois espèces de la section Tacamahaca (*Populus balsamifera*, *P. maximowiczii* et *P. trichocarpa*) et de deux espèces de la section Aigeiros (*P. deltoides* et *P. nigra*). Au Québec le Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs (MFFP), a produit plusieurs clones résultants de plusieurs croisements pour répondre aux particularités de chaque région. Un réseau de plantations à croissance rapide a été mis en place à travers les deux régions de l'Abitibi-Témiscamingue et le Nord-du-Québec entre 2002 et 2007 (DesRochers et Tremblay, 2009; Guillemette et DesRochers, 2008). Des études antérieures ont montré que la quantité et la qualité de la biomasse produite en foresterie à courte rotation pouvaient être modifiées de plusieurs façons, à savoir le choix du matériel génétique (Bullard et al., 2002; Willebrand et Verwijst, 1993), l'espacement entre les arbres et la lutte contre les mauvaises herbes (Sage, 1999). La compréhension des mécanismes-clés de la croissance de l'arbre en relation avec son environnement est primordiale dans le but d'optimiser le rendement (Castaño-Díaz et al., 2018).

1.2 Problématique

L'approvisionnement énergétique mondial, qui repose actuellement à 80% sur des combustibles fossiles, devrait doubler d'ici 2040 (Li et al., 2014). Cette demande accrue d'énergie conduit à la libération de grandes quantités de gaz à effet de serre, ce qui met notre environnement en danger (Smil, 1994). Plusieurs solutions ont été proposées pour atténuer les effets négatifs des gaz à effet de serre provenant de la combustion de combustibles fossiles, l'utilisation de la biomasse ligneuse figurant au premier rang des solutions viables proposées.

Les taillis à courte rotation (TCR) sont des cultures intensives d'arbres plantés à forte densité, servant à la production de biomasse ligneuse (Styles et Jones, 2007).

L'établissement de ce type de plantation permet d'obtenir un volume maximum de bois sur une superficie restreinte tout près des usines de transformation. Malgré que le développement de clones performants (Ceulemans et Deraedt, 1999) et que les techniques de culture de peuplier hybride (PEH) aient connu un grand essor les dernières années (Dickmann et al., 2001), peu de recherches ont été réalisées en régions boréales, dû à la présence prédominante de forêts naturelles. La courte saison de croissance (163-177 jour/année (Environnement Canada, 2012)), nécessite que l'on développe des méthodes de culture adaptées à ce genre de production. Le peuplier hybride, possède le potentiel de croissance le plus rapide parmi les essences forestières du Québec en termes de production de biomasse (Réseau Ligniculture Québec, 2011). Au Québec, la production de peuplier hybride est étudiée et elle est connue en futaie régulière mais beaucoup moins en système de TCR qui sont destinés surtout à produire des billons pour les industries de la trituration. Ce mémoire vise à étudier l'impact du recépage des clones de peuplier hybride sur la qualité de la reprise et son effet sur la production de biomasse. Il porte également sur la productivité de différents clones de peuplier hybride et vise à déterminer les facteurs affectant la biomasse produite en TCR. Le choix de l'espacement est très important dans ce type de culture car il permet de contrôler la croissance des arbres et la qualité du bois en modifiant les conditions de croissance dont la lumière et l'utilisation des éléments nutritifs ce qui finira par affecter la qualité du bois produit et le rendement en biomasse.

1.3 États des connaissances

1.3.1 Les peupliers hybrides en taillis à courte rotation

Une culture en taillis à courte rotation (TCR) est, par définition, une culture de plantes ligneuses à croissance rapide où la biomasse aérienne est récoltée périodiquement après la plantation ou la récolte précédente. La durée de la plantation avant la remise à zéro est de 15 à 30 ans et le cycle de rotation est de 2 à 6 ans (Ceulemans et al., 1996; Fischer

et al., 2013; Walle et al., 2007). Les TCR de peuplier hybride peuvent produire rapidement sur des petites surfaces, de grandes quantités de billons destinés à l'industrie de la trituration. Le recours aux clones garantit à l'industrie une bonne connaissance et une homogénéité de la matière première récoltée, même s'il existe des différences importantes entre les clones. Le MFFP dirige un programme d'amélioration génétique, qui a pour objectif de développer des hybrides à rendement élevé, résistants aux maladies et surtout capables de bien se développer dans la gamme bioclimatique du Québec. La biomasse des peupliers hybrides en TCR peut être récoltée après une rotation relativement courte par rapport au peuplier en futaie régulière. Elle peut être utilisée pour la transformation industrielle, les pâtes et les papiers, ainsi que pour la production d'énergie (Sean, 2006). Dans plusieurs provinces du Canada, les plantations d'arbres à croissance rapide occupent plusieurs terres agricoles appartenant à des propriétaires privés (Derbowka et al., 2012). Ce système de production nécessite des investissements importants pour la préparation du site et les traitements sylvicoles. Il est donc essentiel de développer des recherches pour maximiser la production de fibre. De plus, le développement de nouveaux clones, les risques associés à l'utilisation de nouveaux systèmes de plantation et les conditions environnementales changeantes, en particulier le changement climatique, justifient bien les efforts de la recherche sur les peupliers en TCR.

1.3.2 Taxonomie et aperçu sur le genre *Populus*

Le peuplier fait partie du genre *Populus* et de la famille des Salicaceae. Sur le plan taxonomique le peuplier comprend six différentes sections, renfermant à peu près trente espèces qui sont réparties naturellement à l'échelle mondiale. Les différents clones de peuplier hybride utilisés au Canada sont principalement issus de croisements interspécifiques entre trois espèces de la section *Tacamahaca* soit *Populus balsamifera*, *P. maximowiczii*, et *P. trichocarpa* et deux autres espèces de la section *Aigeiros*, soit

P. deltoides, et *P. nigra*. Les espèces de ces deux sections se propagent facilement de manière asexuée, par bouturage, produisant ainsi des clones (Dickmann et al., 2001). L'intérêt pour le PEH provient évidemment de sa capacité de se reproduire facilement et le fait qu'ils peuvent être clonés en peu de temps et cultivables à grande échelle (DesRochers et Tremblay, 2009). Au Québec, parmi les espèces de peuplier qui ont servi à la création des différents clones, on trouve le peuplier deltoïde (*P. deltoides*; D), le peuplier baumier (*P. balsamifera*; B), le peuplier de l'Ouest (*P. trichocarpa*; T), le peuplier noir (*P. nigra*; N), et le peuplier japonais (*P. Maximowiczii*; M). Par exemple, un hybride de type DN est obtenu par le croisement entre une femelle de deltoïde et un mâle de peuplier noir. On peut également croiser un peuplier hybride, ex. une femelle de DN avec un mâle de peuplier d'une autre espèce, par ex. peuplier japonais, ce qui donne un autre hybride dans ce cas le DN x M. Les possibilités de croisement sont ainsi nombreuses (Dickmann et al., 2001).

Le peuplier hybride pour la plantation peut être produit en divers types de matériel, notamment les plançons, les plants à racines nues et les boutures; ces dernières permettent une culture facile et moins dispendieuse que l'utilisation des autres types de plants ou des graines (DesRochers et Tremblay, 2009). Les boutures sont généralement autour de 15 à 30 cm de longueur et présentant des bourgeons viables sont récoltées à la fin de l'automne. Elles sont par la suite réfrigérées et repiquées sur terrain pendant la saison printanière (Réseau Ligniculture Québec, 2011). Au Québec, le MFFP a développé une cinquantaine de clones de PEH qui sont utilisés dans plusieurs régions écologiques (Ressources Naturelles Canada, 2000).

Les peupliers se développent mieux sur les sols riches avec une profondeur optimale (supérieure à un mètre de la nappe phréatique) et bien drainée. La préparation du terrain par ameublissement du sol à savoir le labour et le hersage, favorise la survie et la croissance des boutures et améliore la structure du sol. L'entretien des plantations est crucial pour assurer une meilleure croissance des boutures : la fertilisation et l'élimination de la végétation herbacée (Castaño-Díaz et al., 2018).

1.3.3 Recépage

Le concept de taillis à courte rotation pour la production de biomasse est une méthode qui exploite la capacité de certaines espèces d'arbres, réduits à une tige basse après avoir été coupés, à produire de nouvelles pousses à partir de leur souche. Après plusieurs années, les nouvelles tiges produites seront récoltées et le cycle recommence (Laureysens et al., 2005). En règle générale, la durée d'une plantation en TCR dépend de l'espèce en question et des facteurs du site. Le recépage maintient la souche à un stade juvénile, et certaines parmi elles peuvent atteindre des âges considérables (Walle et al., 2007). De nombreuses espèces de feuillus (par exemple le bouleau à papier, le peuplier) se régénèrent à partir des souches coupées, donnant naissance à des rejets de souche. La coupe initiale vise à stimuler la formation des rejets après une à deux saisons de croissance (Dickmann et al., 2001). La première rotation présente donc des arbres avec une structure mono-tige tandis qu'après la première récolte les souches préétablies vont générer une structure à tiges multiples. Par conséquent, un système racinaire bien développé (en croissance continue) est en déséquilibre avec la partie aérienne lorsqu'elle est périodiquement coupée, ceci présente une charge pour les souches puisque ces racines auront une demande de respiration très élevée qui ne peut être compensée que par la photosynthèse des tiges nouvellement produites (Albacete et al., 2008). Zhu et al. (2012), ont montré que le pool de glucides de la partie racinaire est en liaison directe avec la capacité de repousse et à la vigueur des taillis de chênes. Salomón et al. (2016) a montré que chez les TCR de chênes, le système racinaire avait un effet sur la croissance des tiges. Effectivement, le stockage des glucides non structuraux au niveau des racines avait pour but de soutenir la régénération végétative après le recépage (Zeppel et al., 2015). Dans les cultures en TCR, la partie aérienne qui est coupée périodiquement alors que la partie racinaire demeure préservée crée un déséquilibre de la biomasse racine-tige qui pourrait persister avec le temps. En effet, l'allocation favorisée de glucides non structuraux aux racines entraîne une performance aérienne limitée, donc avec le temps la biomasse racinaire grandit et il reste moins

d'énergie pour la production des tiges (Salomón et al., 2013). Étant donné que la mort des racines fines se produit après le recépage en relation avec un besoin d'une transpiration plus faible (Corcuera et al., 2006, la persistance des grosses racines contribuerait davantage à ce déséquilibre. En supposant que la taille clonale soit un indicateur de l'âge clonal (Wesche et al., 2005), les clones plus âgés et de gros diamètres soumis à plusieurs recépages seraient limité par un déséquilibre plus prononcé, ce qui provoque des limitations de gain de carbone via la photosynthèse du feuillage et maintient la perte de carbone via la respiration par les racines (Iwasa et Kubo, 1997).

La croissance en hauteur, le taux de mortalité et la biomasse ligneuse ont été étudiées sur des cultures de peuplier hybride en TCR et en futaie régulière au cours de la première année après le recépage (Bergez et al., 1989). Un léger retard a été constaté dans la croissance en hauteur des futaies par rapport aux TCR, mais la croissance en hauteur totale n'était pas significativement différente entre les deux traitements à la fin de la saison de croissance. La biomasse totale produite était plus élevée chez le taillis que chez les futaies en raison d'un plus grand nombre de tiges par souches. Cette capacité de croissance a été maintenue même après le cinquième cycle d'un an chez le peuplier hybride. Les clones de peuplier poussent vigoureusement bien après le recépage et le grand nombre de tiges qui se développe crée une grande surface foliaire au début de la saison de croissance. La productivité du pied-mère dépend du rayonnement solaire intercepté par le feuillage, car en effet, plus la canopée se ferme rapidement, plus la quantité annuelle de lumière interceptée est élevée. La canopée peut se développer plus rapidement après le premier recépage. Ceci est expliqué par l'augmentation du nombre de tiges à l'hectare (plusieurs tiges par souche) et d'un taux de croissance plus rapide des tiges en raison d'un système racinaire déjà établi et de la quantité du carbone stocké au niveau de la souche et des racines (Ceulemans et al., 1996). Cependant, la récolte de la biomasse pour les TCR est importante lors des premières rotations mais elle diminue avec le temps (Armstrong et al., 1999). Une

récolte fréquente avec des rotations très courtes a entraîné un déséquilibre racines/tiges, ce qui a produit une biomasse sous-terrainne plus grosse et moins de tiges viables après la repousse. De plus les dimensions des feuilles et de la cime (surface foliaire totale) étaient considérablement différentes entre les clones, s'ajustant probablement au nombre de tiges produites (Salomón et al., 2013).

1.3.4 Facteurs affectant la production de biomasse des clones de peuplier hybride

1.3.4.1 Effet du clone

Au cours des dernières années, le genre *Populus* a fait l'objet de plusieurs recherches pour la foresterie à courte rotation aux États-Unis et au Canada (Hauk et al., 2014; Shooshtarian et al., 2018). La sylviculture intensive du peuplier repose sur l'usage d'arbres issus de croisements interspécifiques (parents appartenant à des espèces de peupliers différents). Les arbres du genre *Populus* possèdent un grand nombre d'espèces permettant la sélection de clones de presque toutes les conditions environnementales. L'objectif de ces croisements est d'avoir des clones de forte vigueur hybride qui incorpore les traits d'intérêts des deux parents comme par exemple, la résistance aux ravageurs (Dillen et al., 2011). Plusieurs clones ont été développés pour tester leur productivité dans la région de l'Abitibi-Témiscamingue et de permettre la sélection des clones les plus prometteurs, présentant une bonne résistance aux maladies. La productivité peut être très élevée à condition que des clones appropriés soient plantés sur des sites adéquats et que des techniques sylvicoles adaptées soient appliquées.

Le peuplier noir a été comparé au peuplier hybride dans les caractéristiques de la hauteur et du diamètre des repousses, en effet, la tige principale avait un diamètre significativement plus grand dans le clone hybride par rapport au peuplier noir (Benetka et al., 2002). La hauteur de l'arbre, le diamètre et le nombre des tiges contribuent au rendement en biomasse des clones du peuplier hybride (Fang et al.,

2007). Dans des conditions plus favorables, le nombre de tiges par souche a contribué de manière significative au rendement en biomasse des clones de peuplier noir (Benetka et al., 2002).

1.3.4.2 Effet de la densité et de l'espacement des plantations sur la biomasse

L'espacement entre les arbres est un facteur très important dans les cultures en TCR, car il est lié au rendement des plantes (Benomar et al., 2012). Il est clair qu'une diminution de l'espacement va engendrer au début, une production de biomasse totale importante. En effet, un espacement rapproché réduit la taille individuelle des arbres mais il augmente la production de la biomasse par unité de surface, sur des courtes périodes, ceci est dû à la fermeture du couvert et l'occupation totale du site (Lindegaard et al., 2001). Une étude menée par Armstrong et al. (1999) en utilisant des espacements de 1 x 1 m et 2 x 2 m avec des cycles de coupe de 2 et 4 ans a montré qu'un clone de *P. trichocarpa* × *P. deltoides* avait un rendement plus élevé (13 T ha⁻¹ an⁻¹) pour l'espacement 1 x 1 m que l'espacement 2 x 2 m. De ce fait, sur des cycles de 2 à 4 ans la compétition interlignes est relativement faible alors que sur des cycles plus longs cette compétition serait plus accrue; Proe et al. (2002a) ont signalé une augmentation de 56% de la productivité à l'hectare des peupliers lorsque l'espacement a été réduit de 1,5 à 1 m. Il a été démontré que les arbres pouvaient atteindre la biomasse ligneuse la plus élevée à forte densité à un âge précoce, mais les résultats n'ont pas été les mêmes pour des rotations plus longues. En allongeant la rotation, la productivité baisse car les tiges se compétitionnent entre elles et celles qui sont moins vigoureuses n'auront pas suffisamment de ressources pour leur croissance et vont finir par mourir graduellement (Ferm et al., 1989).

Dans les fortes densités, les arbres ont tendance à allouer plus d'énergie pour la croissance en hauteur qu'en diamètre (Elferjani et al., 2016). Une étude sur la plasticité des clones de peuplier hybride à différents espacements a montré que la hauteur des

arbres plantés à des espacements de 1 x 4 m était supérieure à ceux plantés à 2 x 4 m ou 3 x 4 m (Elferjani et al., 2016). Ceci explique l'acclimatation à la compétition par la réduction de l'espacement entre les arbres qui s'est manifestée surtout par des ajustements morphologiques essentiellement pour la surface foliaire spécifique et la hauteur des arbres. Ces réponses à des espacements réduits entre les arbres permettait une meilleure interception de la lumière par les feuilles et une allocation de l'azote foliaire aux protéines impliquées dans le processus de photosynthèse (Ceulemans et Deraedt, 1999).

1.4 Les hypothèses et les objectifs

L'objectif général de cette maîtrise est d'évaluer la productivité en TCR et la réponse au recépage de différents clones de PEH en termes de nombre et grosseur des tiges, de biomasse des tiges produites par souche et par hectare en fonction de l'espacement entre les pieds-mère.

Les objectifs spécifiques sont de:

- 1) Évaluer l'effet de l'espacement (densité) sur la productivité. Est-ce que le recépage résulte en un plus grand nombre de tiges par souche dans les espacements réduits, produisant plus de biomasse à l'hectare par raL'hypothèse est que les arbres plantés à des espacements réduits produiront plus de biomasse à l'hectare comparé à des espacements plus grands et soumis à une forte compétition avec la végétation herbacée (Benomar et al., 2013). On s'attend à ce que les espacements réduits produisent plus de biomasse parce que l'utilisation de l'espace est maximisée.
- 2) Étudier la réponse de différents clones de PEH au recépage en lien avec l'espacement. Les arbres plantés à des espacements larges devraient produire de plus grosses tiges, alors que les arbres à des espacements réduits devraient croître plus en hauteur. De plus, on s'attend à ce que les grosses souches produisent un

nombre de tiges après recépage plus élevé que les petites souches, et conséquemment plus de biomasse par pied-mère.

CHAPITRE II

BIOMASSE ET PRODUCTIVITÉ DES CÉPÉES DE DIFFÉRENTS PEUPLIERS HYBRIDES EN TAILLIS À COURTE ROTATION EN RÉGION BORÉALE ¹

Nada Aloui et Annie DesRochers

¹ Article à soumettre dans le journal « Biomass and Bioenergy »

2.1 Résumé

Les taillis à courte rotation (TCR) sont des cultures intensives d'arbres plantés à forte densité, servant à la production de biomasse ligneuse. L'objectif de cette étude était d'évaluer la productivité en TCR et la réponse au recépage de différents clones de PEH en termes de nombre et diamètre des tiges, de biomasse produite par souche et par hectare en fonction de l'espacement entre les pieds-mère. La capacité de recépage a été évaluée à partir d'une plantation en TCR établie en 2010 à Val Senneville (Abitibi-Témiscamingue), recépée une fois en 2012 et une deuxième fois en 2018. Le dispositif d'étude présentait 6 clones de peuplier hybride, plantés en simple rangée suivant trois espacements (30x30 cm, 40x40 cm et 60x60 cm) correspondant respectivement à des densités de plantation de 16 000, 10 000 et 5 500 arbres par hectare. La hauteur totale des tiges, le diamètre et le nombre de tiges produites par souche ont été mesurés à la fin de la saison de croissance 2019. La biomasse à l'hectare produite deux ans après le deuxième recépage a varié de 5,47 à 17,04 T ha⁻¹. Le diamètre moyen des tiges a été influencé par l'espacement pour certains clones. Le nombre de tiges produites a augmenté avec la circonférence des souches ainsi qu'avec l'espacement, tandis que la densité de bois a diminué avec l'augmentation de l'espacement. Il y avait une corrélation positive entre le nombre de tiges par souche et la biomasse par pied-mère. Cette étude a montré que la biomasse à l'hectare augmentait avec la réduction de l'espacement entre les pieds-mère 2 ans après le recépage, toutefois cette réponse à l'espacement était variable selon les clones.

Mots clés : Biomasse, peuplier hybride, clone, productivité, taillis à courte rotation

2.2 Introduction

Au Canada, la culture de taillis à courte rotation (TCR) n'est pas très développée dû à l'abondance des forêts naturelles (Labrecque et Teodorescu, 2005). Toutefois, le recours aux TCR semble opportun dans un effort de protection accru des forêts naturelles et de réduction de l'utilisation de combustibles fossiles (Bonin et Lal, 2012). L'établissement de TCR pour la production de la biomasse est une des principales filières de production d'énergie dans le monde (Edenhofer et al., 2011). Le groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) a également prédit que la biomasse devrait être utilisée pour produire entre 25 % et 45 % de l'énergie mondiale d'ici 2100 (Bentsen et Felby, 2012).

L'un des meilleurs moyens d'assurer la disponibilité à long terme de la biomasse pour la production d'énergie renouvelable est la culture du saule (*Salix spp.*) et du peuplier (*Populus x spp.*) en TCR. Les saules sont généralement les plus utilisés comme cultures énergétiques à croissance rapide et à haut rendement avec une productivité pouvant atteindre jusqu'à 20 T ha⁻¹ an⁻¹ (Lafleur et al., 2017). Le peuplier hybride peut également être utilisé en TCR ayant une croissance rapide et une productivité pouvant atteindre 18 T ha⁻¹ an⁻¹ (Labrecque et Teodorescu, 2005).

Le choix du meilleur espacement entre les tiges plantées en TCR est important pour la production maximale de volume de bois ou de biomasse (Eisenbies et al., 2017). Une croissance annuelle maximale de biomasse par hectare est atteinte plus tôt dans les plantations denses, car les arbres occupent le site plus rapidement que dans les plantations moins denses (Castaño-Díaz et al., 2018). Une étude portant sur trois clones de PEH (*Populus trichocarpa* × *P. deltoides* « Beaupré », *Populus trichocarpa* × *P. deltoides* « Boelare » et *Populus trichocarpa* « Trichobel »), utilisant des espacements de 1 x 1 m et 2 x 2 m avec des cycles de coupe de 2 et 4 ans a montré que le rendement le plus élevé (13 T ha⁻¹ an⁻¹) était obtenu avec l'espacement le plus petit (Armstrong et

al., 1999). Proe et al. (2002b) ont également obtenu une augmentation de 56% de la productivité à l'hectare des peupliers lorsque l'espacement était réduit de 1,5 à 1 m entre les tiges. Cependant, les plantations moins denses rattrapent rapidement et maintiennent une croissance annuelle maximale élevée plus longtemps que leurs homologues denses, car la compétition entre les souches est moins sévère (Hansen et al., 2015). Dans un essai portant sur l'effet de l'espacement et la longueur de rotation sur le rendement, la production maximale avait été obtenue à l'espacement le plus serré après 5 ans, mais il avait fortement diminué si la rotation était prolongée au-delà de ce point (Armstrong et al., 1999). Le cycle de coupe doit donc être ajusté en fonction de l'espacement et de l'établissement de la compétition entre les tiges (fermeture de la canopée). L'espacement entre les souches a également un effet sur la densité du bois, un paramètre important dans l'évaluation de la qualité de matière première pour la production de bioénergie chez le peuplier hybride et le saule (Tharakan et al., 2003). Une étude récemment effectuée chez l'épinette noire (*Picea mariana*) a montré que l'espacement était le paramètre le plus important affectant la densité du bois et que des espacements plus larges diminuaient la densité du bois (Zhang et al., 2021). Par contre, chez les peupliers hybrides le patron de variation radiale était caractérisé par une augmentation rapide de la longueur, de la largeur et de la proportion de fibres les premières années, ce qui entraîne un rendement élevé pour les produits à base de fibres (Huda et al., 2014).

La récolte de la biomasse dans les TCR se fait par recépage, c'est-à-dire la coupe des tiges à un jeune âge au niveau du sol de façon à utiliser leur capacité de se régénérer à partir de rejets de souche et ainsi produire les tiges pour la prochaine récolte (Laureysens et al., 2005). Une étude utilisant différents clones de saule a montré que les clones les plus productifs produisaient un nombre de tiges moins élevé mais plus grosses que les clones moins productifs (Castaño-Díaz et al., 2018). La production de tiges de plus grand diamètre produit également une biomasse ligneuse de meilleure qualité, parce que les pousses de petit diamètre ont une proportion d'écorce plus élevée,

et cette proportion diminue avec l'âge et le diamètre de la tige. L'écorce possède également une concentration plus élevée d'éléments inorganiques et produit plus de cendres que le bois (Tharakan et al., 2003), rendant les tiges plus minces moins désirables lorsque la biomasse est transformée pour la production d'énergie (Benetka et al., 2007). Laureysens et al. (2003) ont aussi montré que le nombre de tiges produites après le recépage au sein d'un clone était positivement corrélé au diamètre de la souche avant le recépage. En d'autres termes, une souche plus grosse fournirait une plus grande surface pour produire des nouvelles tiges et disposerait d'un système racinaire plus puissant permettant de stocker les réserves et de produire de grosses tiges après le recépage.

Les peupliers produisent généralement de 5 à 25 tiges par souche après recépage (Laureysens et al., 2003). En raison de l'auto-éclaircissage, le nombre de pousses produit diminue jusqu'à 75% au cours de la première année de croissance (Benetka et al., 2014). La mortalité des tiges se produit essentiellement parmi les plus petites repousses en faveur des plus grandes dont la dominance apicale augmente (Afas et al., 2008). Il a également été démontré que la biomasse produite par chaque souche-mère était principalement déterminée par le diamètre de la ou des pousses dominantes (Laureysens et al., 2005). Il est connu que l'espacement a un effet sur la grosseur des souches (Bergkvist et Ledin, 1998), par contre l'effet de la grosseur de la souche sur le nombre et la taille des tiges produites a peu été étudié. L'objectif de cette étude était d'étudier la réponse de six clones de peuplier hybride au recépage vis-à-vis de l'espacement et son effet sur la production de biomasse. Nous posons l'hypothèse que les souches plantées à des espacements plus grands produiront de plus grosses tiges. On s'attend également à ce que les grosses souches produisent plus de tiges que les petites et donc plus de biomasse par pied-mère et par hectare.

2.3 Matériel et méthodes

2.3.1 Site d'étude

Une plantation de peuplier hybride en TCR a été établie en 2010 à Val-Senneville (48°12'N, 77°41'E), située dans la région de l'Abitibi-Témiscamingue où le climat est continental humide avec des précipitations annuelles moyennes de 911 mm (Environnement Canada, 2012). La zone d'étude se caractérise par une température moyenne annuelle de 0,7 °C (Environnement Canada, 2012). La période moyenne sans gel est de 64 jours, mais le gel peut survenir à tout moment de l'année (Environnement Canada, 2012). La saison de croissance moyenne varie entre 153 et 177 jours avec une température qui varie entre 13,2 et 15,9 °C. Le site était une terre agricole abandonnée avec un sol argileux lourd qui était dominé par des herbacées. La surface a été labourée à une profondeur de 30 cm et hersée avant la plantation. Les plants à racines nues ont été plantés à la main au début de l'été 2010. Un désherbage manuel a été effectué en juillet 2010 pour libérer les plants de la compétition pendant les premiers mois de croissance. Cette plantation a fait l'objet de deux recépages, le premier à l'automne 2012 et le deuxième à l'automne 2018.

2.3.2 Dispositif expérimental

Le dispositif expérimental d'étude était un dispositif en blocs aléatoires complets avec 6 clones x 3 espacements x 3 répétitions. Les dimensions des unités expérimentales étaient de 1,2 m en largeur et 20 m en longueur (24 m²), avec un espacement de 1 m entre chaque unité. Les espacements entre les souches de peuplier hybride étaient de 30x30 cm, 40x40 cm ou 60x60 cm avec un nombre total de 330, 200 et 99 tiges respectivement pour les trois espacements, correspondant à des densités de 16 000, 10 000 et 5 500 tiges ha⁻¹. Les clones de peuplier hybride utilisés étaient: BM915005, BM915004 et BM3374 (*Populus balsamifera* × *P. maximowiczii*), MB915318,

MB915308 et MB915319 (*Populus maximowiczii* × *P. balsamifera*). Les plants à racines nues ont été plantés en simple rangée. Le matériel végétal a été fourni par la pépinière de Trécesson du Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs (MFFP). Ces clones ont été choisis car ils avaient été sélectionnés pour leur productivité et leur résistance aux maladies (Périnet et al., 2001).

2.3.3 Prise des mesures et échantillonnage

La plantation a été recépée au printemps 2018 avant le débourrement des bourgeons, sur une période de deux semaines. Le recépage a été réalisé à l'aide d'une débroussailleuse et les tiges ont été coupées le plus bas possible au niveau du sol. Les mesures des repousses et des pieds-mère ont été effectuées à la fin de la saison de croissance à l'automne 2019. Afin d'éviter l'effet de bordure, les mesures ont été prises en laissant deux rangées au début de chaque unité expérimentale, le nombre de souches mesurées était de 12 pieds-mères, prises de façon systématique en suivant une ligne sinusoïdale pour toutes les unités expérimentales. Le diamètre des tiges a été mesuré à 30 cm et 50 cm de hauteur à partir du niveau du sol, ainsi que la hauteur totale de toutes les tiges de chaque pied-mère. Le diamètre de la souche a été mesuré et la circonférence a été calculée ensuite selon l'équation :

$$\text{Diamètre de la souche} \times \pi \quad (1)$$

Le nombre de tiges pour chaque pied-mère a été compté. Le taux de survie des souches a été déterminé en comptant le nombre de souches vivantes au sein des 12 individus à mesurer :

$$\text{Taux de survie} = (\text{nombre de souches vivantes} \times 100) / 12 \quad (2)$$

Un pied-mère par unité expérimentale a été choisi aléatoirement pour calculer la masse volumique des tiges; Toutes les tiges du pied-mère ont été coupées et récoltées pour en

déterminer la masse fraîche et sèche après séchage pendant 72 heures à 70 °C. Le volume de chaque tige a été calculé à l'aide de l'équation suivante (Fortier et al., 2010):

$$V = \frac{\pi}{4} D^2 L \quad (3)$$

Où V est le volume d'une tige, D est le diamètre à 30 cm du niveau du sol, et L est la longueur totale de la tige.

La densité spécifique du bois a été calculée comme étant égale au rapport de la masse sèche moyenne des tiges de chaque pied mère divisé par le volume moyen de ses tiges. La densité du bois spécifique obtenue a ensuite été multipliée par le volume total des tiges de chaque pied-mère pour chaque unité expérimentale afin de déterminer la biomasse par clone et par espacement. La biomasse totale à l'hectare a été calculée en additionnant la biomasse obtenue pour chacun des 12 individus mesurés et ramenée à l'hectare, en multipliant le nombre de tiges à l'hectare selon l'espacement. Ensuite, en tenant compte du taux de survie, la biomasse à l'hectare a été estimée en multipliant la biomasse de chaque clone par le taux de survie de ce dernier.

Comme les unités expérimentales pour les clones MB915308, MB915318 et MB915319 montraient beaucoup de mortalité dans certains réplicats, ils ont dû être retirés des analyses de densité du bois, de biomasse et volume à l'hectare.

2.3.4 Analyses statistiques

L'effet de l'espacement et du clone sur la grosseur de la tige (diamètre à 30 et 50 cm), la hauteur, la masse volumique, le nombre de tiges par souche, le volume et la biomasse a été testé à l'aide d'une analyse de variance (ANOVA) à deux facteurs de classification (espacement et clone) avec le logiciel R, version 4.0.2 (R Core Team 2020) suivie d'une comparaison multiple des moyennes selon la méthode de Tukey. Du moment qu'un facteur était déclaré statistiquement significatif, l'erreur standard de la moyenne (SE) était utilisée pour déterminer les différences entre les moyennes pour le niveau de

signification $P < 0,05$ (Petersen, 1985). Dans les cas où les résidus n'étaient pas normalement distribués, une transformation logarithmique a été appliquée aux données brutes du diamètre à 50 et 30 cm, de biomasse et de volume des clones. Pour modéliser la distribution du nombre de tiges en fonction de la circonférence de la souche et de l'espacement, les modèles linéaires généralisés (GLM) sur données de comptage et la régression de poisson ont été utilisés. Finalement pour étudier la relation entre la biomasse totale produite par pied-mère et le nombre de tiges on a eu recours à une régression linéaire simple. Le niveau de signification pour tous les tests a été fixé à $P \leq 0,05$.

2.4 Résultats

L'espacement entre les pieds-mère a eu un effet significatif sur toutes les variables mesurées (D30, D50, hauteur, densité du bois et nombre de tige par pied-mère), mais cet effet était variable selon le clone, tel que démontré par des interactions significatives entre les 2 facteurs (Tableau 2.1). L'espacement n'a pas eu d'effet sur la biomasse à l'hectare et le volume par hectare sans tenir compte du taux de survie (Tableau 2.1).

Tableau 2.1 Analyse de variance (ANOVA) montrant les sources de variation, degrés de liberté (dl) et les valeurs de F du diamètre des tiges à 30 cm (D30) et à 50 cm (D50), la hauteur, la densité du bois, le nombre de tiges par souche, la biomasse, le volume et le taux de survie

Source de variation	dl	D30 (cm)	D50 (cm)	Hauteur (m)	Densité du bois (kg m ⁻³)	Nombre de tige par souche	Biomasse (kg ha ⁻¹)	Volume (m ³ ha ⁻¹)	Taux de survie (%)
Espacement	2	16,8*	11,7*	5,5*	55,0 *	6,5*	0,2	0,1	0,3
Clone	5	36,6 *	32,7 *	59,7*	105,9 *	5,9*	0,02 *	0,03 *	0,02 *
Clone X Espacement	10	3,5*	3,9*	5,4*	54,5*	6,3*	0,2	0,2	0,2

Note : les astérisques indiquent des probabilités significatives pour les tests : *, $P \leq 0,05$.

Le taux de survie a varié significativement selon le clone, avec des valeurs de 34 % à 78 % (Fig. 2.1), alors que l'espacement n'a pas influencé le taux de survie (Tableau 2.1).

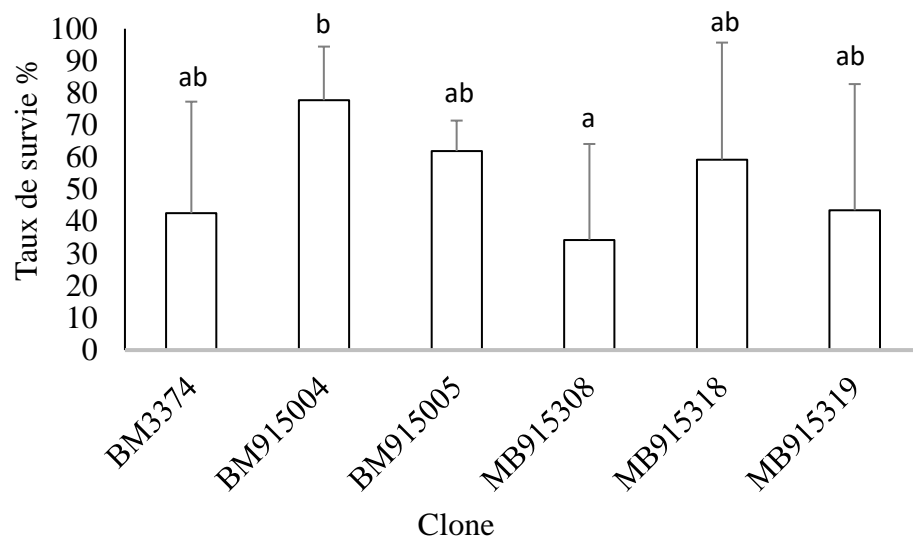


Figure 2.1 Taux de survie des différents clones. Les barres correspondent aux erreurs types de la moyenne. Les lettres différentes entre les barres indiquent des différences significatives entre les moyennes au niveau de signification $P < 0,05$

La hauteur moyenne des tiges était plus élevée dans l'espace 40x40 cm chez les clones BM3374, MB915318 alors que les tiges les plus hautes chez le clone MB915319 étaient dans l'espace 60x60 cm. L'espace n'a pas affecté la hauteur moyenne des tiges des autres clones (Fig. 2.2a), résultant en une interaction significative entre les facteurs clone et espace (Tableau 2.1).

L'espace n'a pas eu le même effet pour tous les clones au niveau du diamètre moyen des tiges à 30 cm du niveau du sol (D30); Il a augmenté avec l'espace pour le clone MB915319 alors que l'espace n'a pas affecté le diamètre moyen des tiges des autres clones (Fig. 2.2b).

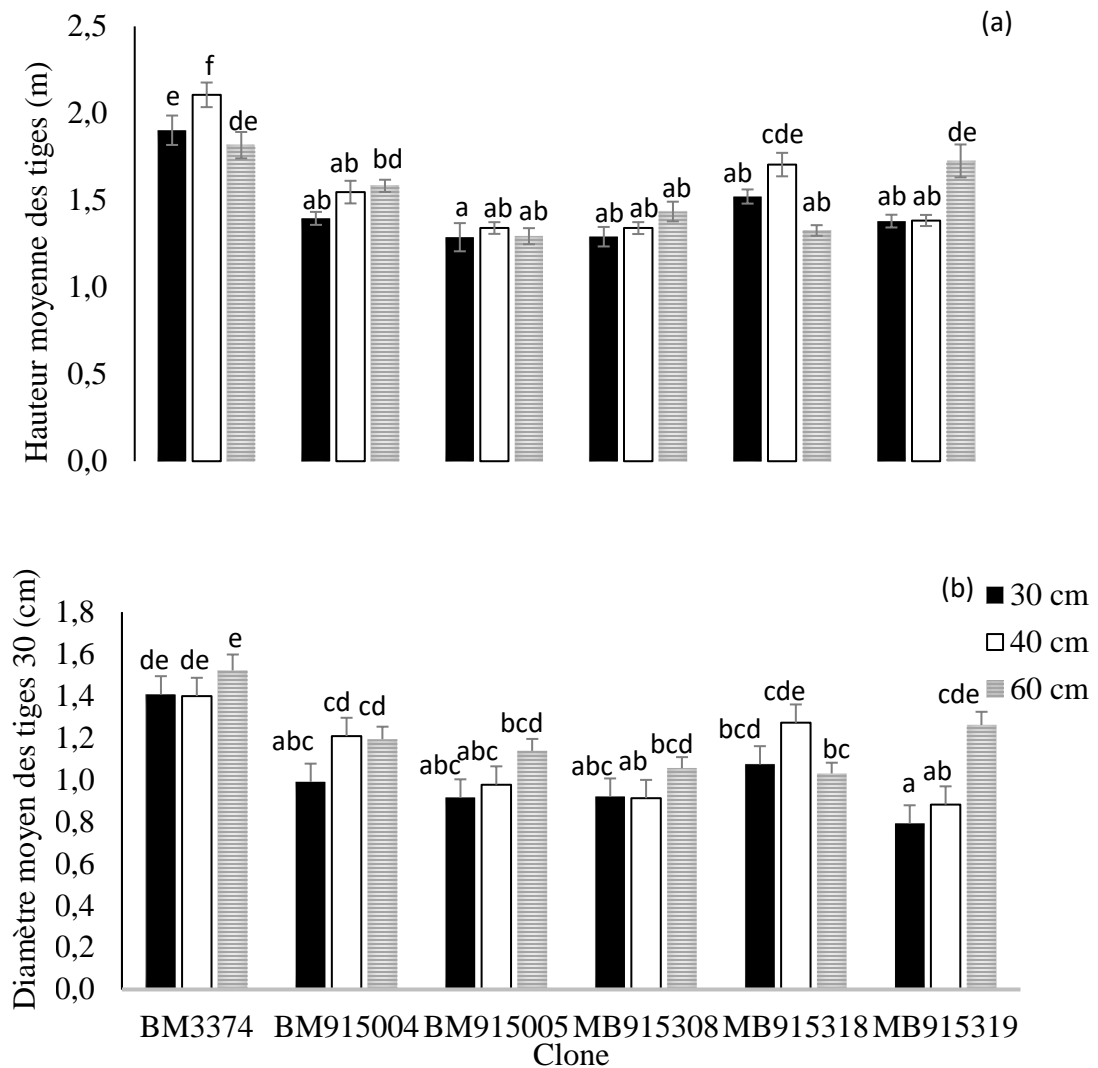


Figure 2.2 Hauteur (a) et diamètre à 30 cm moyens (b) des tiges en fonction du clone et de l'espacement. Les moyennes partageant les mêmes lettres ne sont pas significativement différentes au niveau de signification $P < 0,05$. Les barres correspondent aux erreurs types de la moyenne

Le clone BM3374 a produit les tiges avec les plus gros diamètres (Fig. 2.2b). L'interaction entre clone et espacement était également significative pour le diamètre à 50 cm, avec des résultats similaires au diamètre à 30 cm (non montré).

L'interaction entre le clone et l'espacement pour le nombre de tiges produites par souche (Tableau 2.1) montre que certains clones ont produit plus de tiges lorsque l'espacement était plus grand, alors que l'espacement n'a pas eu d'effet sur le nombre de tiges produit pour les autres clones (Fig. 2.3).

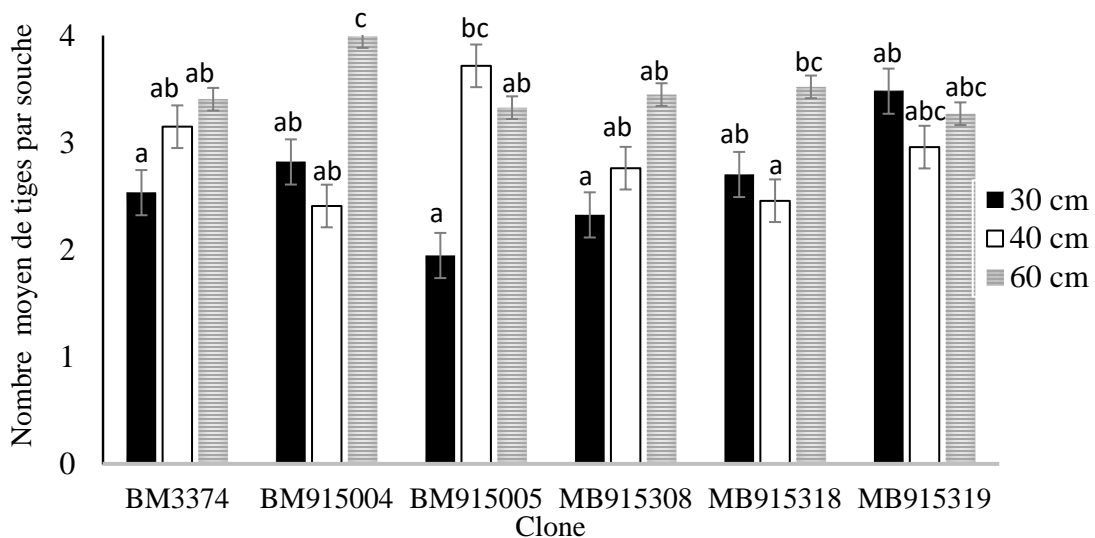


Figure 2.3 Effet du clone et de l'espacement sur le nombre moyen de tiges par pied-mère. Les moyennes partageant les mêmes lettres ne sont pas significativement différentes au niveau de signification $P < 0,05$. Les barres correspondent aux erreurs types de la moyenne

Le nombre de tiges produites a augmenté avec la circonférence de la souche, mais la relation était significative seulement pour la différence entre l'espacement 30x30 cm et 60x60 cm (Tableau 2.2).

Tableau 2.2 Effet de la circonférence de la souche et l'espacement sur le nombre de tiges produites. Les astérisques indiquent des probabilités significatives pour les tests : *, $P \leq 0,05$

	Estimation	Erreur standard	Valeur z	Pr (> z)
(Intercept)	0,79	0,06	12,09	<0,001 *
Circonf_souche	0,04	0,00	12,12	<0,001 *
Espacement40	0,04	0,07	0,40	0,69
Espacement60	0,16	0,07	2,25	0,025 *

Note : Circonf_souche indique la circonférence des souches, Espacement40 et Espacement60 indiquent l'espacement (40cmX40cm) et (60cmX60cm) respectivement entre les arbres.

La biomasse totale produite a augmenté avec le nombre de tiges par souche (Fig. 2.4). La biomasse produite à l'hectare dépendait du clone, avec les clones BM3374 et BM915004 ayant produit une biomasse totale à l'hectare deux fois plus grande que le clone BM915005 lorsque la mortalité n'est pas considérée. En effet, en multipliant la biomasse par souche par le nombre de tiges à l'hectare pour les clones BM3374, BM915004 et BM915005, nous avons obtenu respectivement 17,04, 16,50 et 5,47 T ha⁻¹ (Fig. 2.5a). Toutefois, en tenant compte du taux de survie obtenu pour chacun des clones, la productivité a considérablement diminué à 6,81, 11,55 et 3,28 T ha⁻¹ pour BM3374, BM915004 et BM915005, respectivement. Le clone avait aussi un effet significatif sur le volume total à l'hectare (sans tenir compte du taux de survie) avec le clone BM3374 qui a produit un volume total à l'hectare deux fois plus élevé que le clone BM915005 (Fig. 2.5c). En tenant compte du taux de survie obtenu pour chacun des clones, le volume à l'hectare a baissé de 57%, 38% et 22% respectivement pour les clones BM3374, BM915005 et BM915004. Les Figures 2.5b et 2.5d montrent une

différence entre les trois espacements sur la biomasse et le volume totaux, toutefois cette différence n'était pas significative.

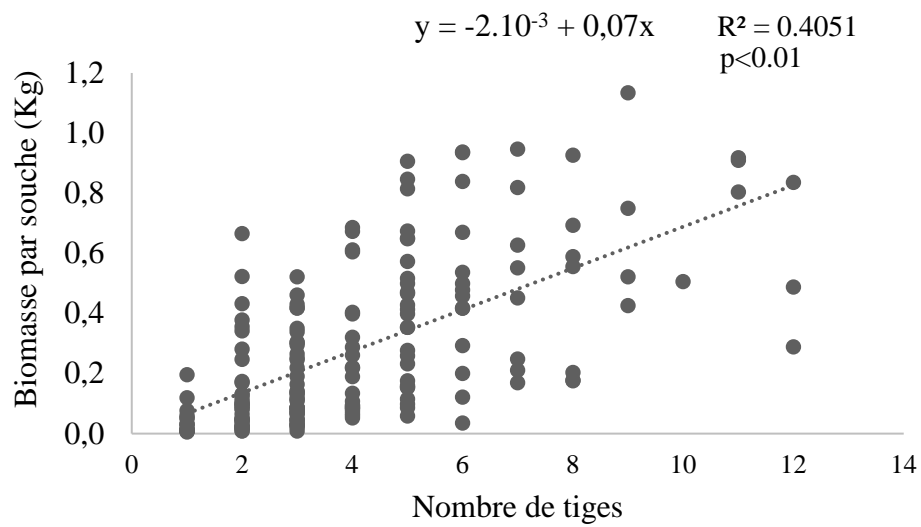


Figure 2.4 Variation de la biomasse totale par souche en fonction du nombre de tige produit

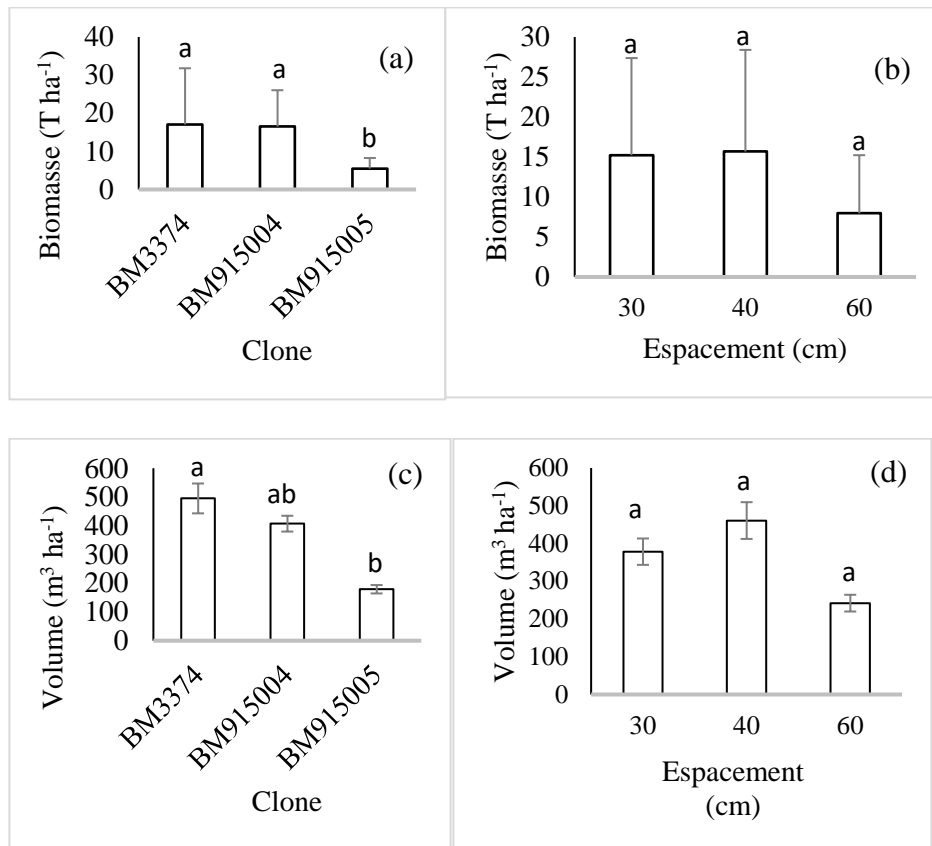


Figure 2. 5 Biomasse totale par hectare en fonction du clone (a) et de l'espacement (b), volume total des tiges à l'hectare en fonction du clone (c) et de l'espacement (d), sans tenir compte du taux de survie. Les moyennes partageant les mêmes lettres ne sont pas significativement différentes au niveau de signification $P < 0,05$. Les barres correspondent aux erreurs types de la moyenne.

L'interaction entre le clone et l'espacement montre que l'augmentation de l'espacement a réduit la densité du bois du clone BM3374 de façon plus prononcée que pour les deux autres clones (Fig. 2.6). L'augmentation de l'espacement de 30 à 60 cm a réduit la densité du bois du clone BM3374 de 30,67 % alors qu'elle a été réduite de seulement 12,82 % et 26,00 % pour les clones BM915004 et BM915005, respectivement.

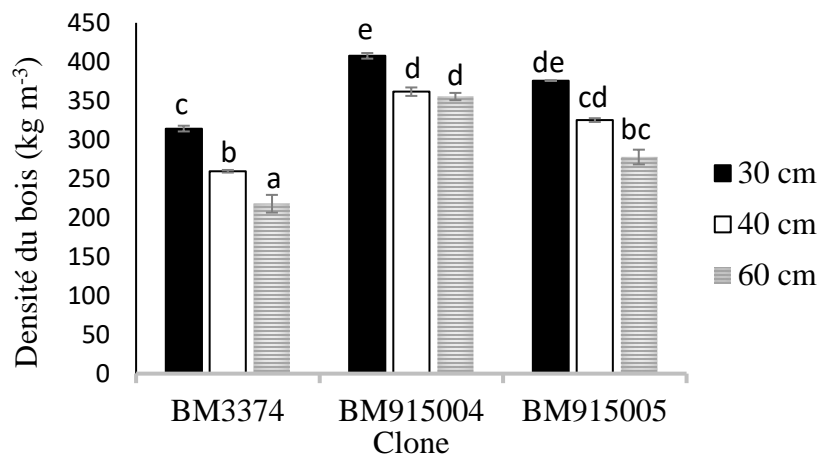


Figure 2. 6 Densité moyenne du bois en fonction du clone et de l'espacement. Les moyennes partageant les mêmes lettres ne sont pas significativement différentes au niveau de signification $P < 0,05$. Les barres correspondent aux erreurs types de la moyenne

2.5 Discussion

Cette étude a démontré que l'effet de l'espacement sur le diamètre moyen des tiges à 30 cm, la hauteur moyenne et le nombre moyen des tiges variait selon les clones de PEH, et que la biomasse totale à l'hectare n'a pas varié selon l'espacement dû à un effet significatif de l'espacement sur la qualité du bois. En effet, la densité du bois des clones a diminué avec l'augmentation de l'espacement. Ainsi on a trouvé que la biomasse à l'hectare produite à l'espacement 30x30 cm était plus élevée qu'au plus grand espacement, toutefois, cette différence n'était pas significative. Le taux de production de biomasse à l'hectare était en moyenne de $16,8 \text{ T ha}^{-1}$ selon les espacements pour les deux meilleurs clones BM915004 et BM3374, sans tenir compte du taux de survie. Ces résultats sont comparables aux rendements annuels de biomasse ligneuse rapportés par Labrecque et Teodorescu (2005) dans des plantations de peuplier hybride et de saules

en TCR à une densité de 18 000 arbres par hectare au sud du Québec à la fin de leur premier cycle de croissance de quatre ans. Notre étude à des densités de plantation plus faibles comparées à celles du sud du Québec, montre donc un potentiel intéressant pour la production de biomasse. Toutefois, lorsque les taux de rendement en biomasse à l'hectare ont été évalués en tenant compte du taux de survie, les rendements ont considérablement diminué. En effet, le clone BM3374 a eu une baisse de production d'environ 60% en tenant compte du taux de mortalité, et une diminution de 40 et 30% a été observée pour les clones BM915005 et BM915004, respectivement. L'espacement n'a pas influencé le taux de survie (Tableau 2.1), cependant, le taux de survie différait significativement selon les clones, de 34,25 à 77,77 %. Il doit être considéré comme étant un paramètre-clé dans la sélection des clones. La mortalité des clones est probablement liée à l'abondance des mauvaises herbes sur le site. Dans le cadre de cette étude, la lutte contre la végétation herbacée a été effectuée manuellement une seule fois après la plantation. Certaines études ont montré que la lutte efficace contre les mauvaises herbes a toujours conduit à une amélioration de la production de la biomasse (Sage, 1999). En revanche un désherbage inefficace a conduit à une diminution de la production de la biomasse et même à la destruction totale de la plantation (Tahvanainen et Rytönen, 1999). L'abondance de la compétition herbacée en l'absence de contrôle chimique contribue à une baisse considérable de la productivité des peupliers hybrides. L'étude de Castaño-Díaz et al. (2018), a démontré que le manque de contrôle des mauvaises herbes a conduit à une diminution de la production de biomasse. Au Québec la majorité des plantations en TCR sont établies sur des terres agricoles ou forestières abandonnées. Les taux de croissance ne sont pas généralement élevés à cause d'une faible fertilité de sols et un faible pH qui caractérisent ces terres agricoles (Lteif et al., 2007), tandis que les coûts d'entretien sont les plus élevés au Canada (Yemshanov et McKenney, 2008), ceci est dû principalement à l'interdiction de l'utilisation des pesticides sur les terres publiques (Fortier et Messier, 2006). La végétation herbacée a été très compétitive dans certaines unités expérimentales, particulièrement les premières années de cet essai, ce qui a causé

une augmentation de la mortalité chez certains clones qui ont été éliminés de certaines analyses. Dans notre cas, si on avait eu recours à l'utilisation des herbicides ou à l'entretien mécanique efficace, les résultats auraient probablement été différents, surtout que la mortalité a été constatée dans tous les espacements. La survie du clone BM3374, par exemple, n'était que de 40% laissant dans les faits plus d'espace entre chaque pied-mère, la souche a gagné plus d'espace, permettant au clone de développer de grosses tiges, d'où le rendement de biomasse élevé de chaque pied-mère. Le diamètre moyen des tiges du clone BM3374 était effectivement le plus élevé (Fig. 2.2b). Il est donc important de prendre en considération que la biomasse des clones peut être élevée à l'échelle de l'arbre mais considérablement réduite à l'hectare en fonction de la mortalité.

La culture de peuplier en TCR semble prometteuse pour atteindre une productivité élevée à condition de choisir les clones appropriés. Il s'agit également d'une bonne option pour valoriser les terres agricoles abandonnées. L'utilisation de clones de peuplier hybride bien adaptés aux conditions climatiques de la zone de plantation est primordiale pour la production de la biomasse dans la culture de PEH en TCR (Sulima et al., 2006), c'est la raison pour laquelle différents clones de PEH ont été testés. L'interaction entre clone et l'espacement (Tableau 2.1) montre bien que les clones doivent être choisis de façon très précise de ce que l'on compte faire. Par exemple le clone BM915319, se développe bien dans les espacements plus larges, en effet, on a montré que la hauteur moyenne de ses tiges était plus élevée à l'espacement 60x60 cm alors que l'espacement n'a pas affecté la hauteur moyenne des tiges des autres clones (Fig 2.2 a). Cette augmentation de la hauteur en réponse à l'espacement pourrait permettre une meilleure interception de la lumière par les feuilles et une allocation de l'azote foliaire aux protéines impliquées dans le processus de photosynthèse (Ceulemans et Deraedt., 1999). L'interaction significative entre l'espacement et le clone indique que l'espacement a eu un effet différent sur les clones qui n'ont pas répondu de façon similaire en termes de croissance et de productivité. Le clone

MB915319 a augmenté son diamètre au plus grand espacement alors que l'espacement n'a pas affecté le diamètre des autres clones (Fig 2.2 b). Les petits espacements ne sont donc pas recommandés pour ce clone, alors que l'espacement n'a pas la même importance pour les autres clones. Dans un essai en futaie régulière sur le PEH, Benomar et al. (2012) ont montré qu'après six saisons de croissance, le diamètre à hauteur de poitrine avait augmenté d'environ 120% de l'espacement 1x1 m à 5x5 m pour le clone MB915319 alors que pour le deuxième clone testé l'espacement avait eu un effet beaucoup moins important sur la croissance. En réponse à l'espacement le clone BM915004 a produit plus de tiges par pied-mère lorsque l'espacement était plus grand (Fig 2.3), alors que pour les autres clones l'espacement n'avait pas le même effet. Cette donnée est intéressante car on a montré que la biomasse produite par pied-mère dépendait du nombre de tiges produites (Fig. 2.4). Donc il serait important de prendre en compte l'effet espacement pour ce clone dans le but de maximiser le rendement en biomasse par souche et par hectare. Le rendement de biomasse à l'hectare et la densité de bois enregistrés pour ce clone étaient les plus élevés. Le clone MB3374 quant à lui produit un plus petit nombre de tiges mais de plus gros diamètre contrairement au clone BM915004 qui a produit des tiges moins grosses mais plus nombreuses, ce qui a permis d'avoir une biomasse à l'hectare similaires entre les deux clones. Cependant la densité du bois du clone MB3374 était la moins élevée ayant pour résultat une qualité de bois moins intéressante et par conséquent une diminution de la valeur énergétique de la biomasse récoltée.

Benetka et al., (2002) a indiqué que certains clones de PEH éliminaient rapidement les petites tiges pour ne laisser que les plus dominantes, alors que d'autres clones éliminent lentement les tiges moins vigoureuses maintenant ainsi de nombreuses petites tiges par pied-mère. Il a également été démontré que le nombre de tiges par pied-mère augmentait avec l'augmentation de la période entre deux moments de récolte (Afas et al., 2008). Notre étude a montré que le nombre de tiges était corrélé positivement avec la biomasse produite par pied-mère. Plus on avait des tiges par souche et plus la

biomasse par pied-mère augmentait. La proportion de tiges dans le rendement total de matière sèche est un caractère important chez le peuplier. Dans des conditions moins favorables, lorsqu'un nombre de tiges formé est jugé faible, le rendement de peuplier a diminué de manière significative (Benetka et al., 2007). Il convient de noter que chez certains clones de peuplier, des tiges relativement minces mais nombreuses sont importantes pour le volume total de la biomasse. Ces tiges ont une proportion d'écorce relativement plus élevée que le bois tandis que l'écorce a une concentration plus faible d'éléments inorganiques et de cendre par rapport au bois (Tharakan et al., 2003). Par conséquent, les tiges les plus minces peuvent être moins désirables, en particulier lorsque la biomasse est transformée en granules.

Compte tenu de la biomasse à l'hectare, le clone BM3374 et le clone BM915004 avaient les rendements de biomasse à l'hectare les plus élevés. Ce rendement était similaire entre les deux clones sans tenir compte du taux de mortalité. Cependant, la productivité à l'hectare a considérablement baissé en tenant compte du taux de survie obtenu pour chacun des clones. Par conséquent, le clone BM3374 qui avait montré une plus grande biomasse à l'échelle du pied-mère, le résultat à l'hectare était nettement inférieur au clone BM915004 lorsque la mortalité est considérée. En effet, on a enregistré une baisse de rendement de 60% chez le clone BM3374 et uniquement de 28% pour le clone BM915004. Ce résultat a également été constaté pour le volume à l'hectare, en tenant compte de la mortalité, en effet, le volume à l'hectare a diminué de 57% pour le clone BM3374 et de seulement 22% pour le clone BM915004. L'espacement n'avait pas d'effet sur le nombre de tiges produites par le clone BM3374, cependant, il avait les plus gros diamètres des tiges produites. Il a été prouvé dans les peuplements de taillis de chênes que les tiges plus grosses avaient un potentiel de croissance plus élevé que les petites (Adame et al., 2008; Cañellas et al., 2004). Par contre, plus le bois pousse vite plus il reste juvénile et par conséquent sa densité de bois demeure faible. Il a été reconnu que la croissance des arbres a un impact significatif sur la densité du bois, le rendement du peuplement et la qualité du bois

produit (Zobel et Van Buijtenen, 2012). La présente étude a clairement montré que la densité de plantation a eu un impact sur la densité du bois. Plus précisément, plus les espacements étaient larges plus la densité du bois a diminué. Les arbres cultivés à grands espacements développent des grosses tiges qui sont moins denses. On conclue que la vitesse de croissance diminue la densité du bois.

Chez les clones de peuplier hybride, le patron de variation radiale est caractérisé par une augmentation rapide au cours des premières années de la longueur, la largeur et la proportion des fibres. Ces qualités entraînent un rendement élevé pour les produits à base de fibres (Huda et al., 2011). Dans l'évaluation de la qualité des matières dans la production de bioénergie, la densité du bois est un paramètre important, puisque plus la densité du bois est élevée plus la production d'énergie est élevée (Tharakan et al., 2003). Par exemple le clone BM915004 qui montre une densité de bois élevée serait plus intéressant en production de biomasse que le clone BM3374. Le clone a eu un effet significatif sur le volume par pied-mère, par exemple le clone BM3374 avait un volume deux fois plus élevé que le clone BM915005 (Fig 2.5 c), cependant, en tenant compte de la mortalité le volume à l'hectare a baissé de 57% pour le clone BM3374 sachant également que sa densité de bois était la plus faible. Les clones à faible densité de bois ont moins de masse par unité de volume. Nam et al. (2018) ont trouvé une corrélation négative entre le taux de croissance en diamètre et la densité du bois. Nos résultats appuient les résultats de Chave et al. (2008) qui ont démontré que les espèces à haute densité de bois avaient plus de biomasse que les espèces à faibles densités dans plusieurs sites et sur trois continents (Afrique, Amérique et Asie).

2.6 Remerciements

Nos remerciements les plus sincères aux organismes qui ont financé ce projet : Le Groupement Forestier Coopératif Abitibi, le Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs (MFFP), l'Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue (UQAT) et le Conseil de Recherches en Sciences Naturelles et en Génie du Canada (CRSNG).

2.7 Déclaration de la contribution de l'auteur

AD et NA ont conçu l'expérience. NA a collecté les données et effectué le travail de laboratoire, analysé et interprété les données et rédigé le manuscrit. AD a supervisé, révisé et édité le manuscrit. AD a approuvé la version finale du document à soumettre.

CHAPITRE III

CONCLUSION GÉNÉRALE

Ce mémoire a permis d'étudier la réponse au recépage d'une plantation en TCR présentant trois densités de plantation. Afin de maximiser le rendement de peuplier hybride en taillis à courte rotation, il est impératif de comprendre comment les facteurs tels que le clone et l'espacement influencent la croissance de PEH en région nordique. Cette étude nous a montré que le rendement de biomasse produit par les clones testés était très intéressant. En utilisant le volume moyen par tige, nous avons obtenu des rendements moyens de 16,8 T ha⁻¹. Ces résultats sont comparables aux données obtenues au sud de la province. Cependant, en tenant compte de la mortalité qui est un paramètre très important dans l'estimation de la productivité, le rendement à l'hectare a considérablement baissé de 60 %, 40% et 30% respectivement pour les trois clones évalués : BM3374 BM915005 et BM915004. La mortalité des tiges constatée dans plusieurs unités expérimentales est probablement due à l'abondance de la végétation compétitive, constatée dans toutes les densités. Le taux de mortalité est donc important dans la sélection des clones, puisqu'il a diminué considérablement la biomasse à l'hectare des clones. Une stratégie d'entretien mécanique régulier et efficace est fortement recommandée dans les cultures de peuplier hybride en taillis.

L'augmentation de l'espacement a fait diminuer la densité du bois des tiges produites, ayant pour conséquence une qualité de bois moins intéressante, ceci génère une diminution de la valeur énergétique de la biomasse récoltée. Une densité de bois élevée génère une production d'énergie plus élevée en volume et contribue à réduire les coûts de transports (Tharakan et al., 2003). Du point de vue de la production de biomasse, la

sélection des clones qui combinent une densité de bois et une croissance en volume élevées, maximise la production d'énergie sur une base de surface. Cette étude a démontré que de nombreux clones de peuplier hybride pouvaient être cultivés en taillis à courte rotation avec succès dans les conditions climatiques de l'Abitibi-Témiscamingue. Deux ans après le recépage, les meilleurs rendements ont été obtenus par les clones BM3374 et BM915004 à l'échelle du pied-mère. Toutefois le deuxième clone est plus performant en termes de productivité à l'hectare en tenant compte de la mortalité. Sa densité de bois était la plus élevée, ce qui permet de conclure que le choix du clone dépendait en grande partie du taux de mortalité et de la densité du bois. Le clone BM915319 a montré une augmentation de la grosseur de ses tiges et la hauteur de celles-ci dans des espacements larges, et il serait très intéressant d'évaluer sa productivité en biomasse lors des prochaines rotations.

On a remarqué que le diamètre moyen des tiges a été influencé par l'espacement ce qui n'était pas le cas pour tous les clones. Plus l'espacement entre les pied-mères augmentait plus le diamètre des tiges augmentait. Toutefois, la biomasse à l'hectare augmentait avec la réduction de l'espacement entre les pied-mères deux ans après le recépage, tandis que cette réponse à l'espacement n'était pas significative pour la biomasse à l'hectare. On a également montré que le nombre de tiges produites a augmenté avec la circonférence des souches ainsi qu'avec l'espacement. Ceci avait une influence cruciale sur le rendement en matière sèche chez le peuplier, en effet, on a observé qu'il existait une corrélation positive entre le nombre de tiges produites par souche et la biomasse produite par pied-mère. Ce résultat avait aussi été observé par Benetka et al. (2007).

La sylviculture des peupliers en taillis à courte rotation doit être adaptée aux clones disponibles choisis. Le sylviculteur doit bien choisir l'espacement entre les pied-mères pour maximiser la superficie disponible (maximiser la biomasse).

L'identification de nouveaux clones de peuplier hybride bien adaptés aux conditions climatiques de la région de l'Abitibi-Témiscamingue est importante pour augmenter le

nombre de taxons qui pourraient être utilisées par les agriculteurs intéressés par la culture de biomasse ligneuse. Une autre rotation de 3 à 4 ans serait probablement nécessaire notamment pour évaluer la productivité et la résistance à la compétition herbacée.

3.1 Limites de l'étude

L'ensemble des résultats a permis de mettre en exergue l'importance des espacements de différents clones dans la culture en taillis à courte rotation. Certains blocs ont montré beaucoup de mortalité, ce qui ne nous a pas permis d'avoir une estimation de leurs densité de bois et de la biomasse à l'hectare. Toutefois, les différentes mesures ont été effectuées pour ces clones. Ces mesures ont servi pour étudier l'évolution de la croissance des clones du peuplier hybride à l'échelle de l'arbre, cependant, le manque des données sur la densité de bois, la biomasse et le volume de certains clones nous a empêché d'avoir une idée plus générale sur le rendement à l'hectare.

Il est probable que les valeurs prises sont peut-être surestimées, car, suite à la forte mortalité les espacements ont été affectés et on a eu recours à trois clones uniquement pour l'estimation de la densité de bois et la biomasse à l'hectare. La culture de peuplier hybride est pratiquée ailleurs avec des désherbages soit mécaniques ou chimiques pour éviter le taux élevé de mortalité. On recommande fortement d'effectuer un désherbage mécanique après le dégel au printemps pour soutenir les plantations dans leur croissance et éviter la compétition avec la végétation herbacée.

3.2 Futur Projet

Dans la même perspective et le même objectif qui est l'étude des facteurs qui influencent la productivité des PEH en TCR en conditions boréales sous différents modes de culture, on a installé de nouvelles plantations de PEH, avec des nouveaux clones testés pour la première fois en Abitibi-Témiscamingue. Cet essai vise à étudier la productivité de dix clones de peuplier hybride et de déterminer les facteurs liés aux méthodes culturales affectant la biomasse produite en TCR, dans deux modes de culture différents (simple et double rangée). En effet, il existe plusieurs scénarios de plantation, on s'est intéressé à étudier seulement deux lors de ce projet. La culture en TCR peut se faire selon un scénario à simple rangée : Il s'agit d'une conception italienne où la distance entre les rangées des arbres est large, ce qui facilite la gestion de la compétition herbacée. Le deuxième scénario à double rangées est un arrangement de plantation où les arbres de PEH sont plantés en deux rangées par rang de plantation. Les distances entre les arbres sont plus rapprochées par rapport à la culture en simple rangée. Pour ce type de conception il y a une fermeture rapide de la canopée et la capture maximale de la lumière est atteinte rapidement après la plantation. Bergkvist et Ledin (1998) ont essayé les deux types de conceptions, et ils ont montré qu'une densité de plantation élevée a entraîné une fermeture rapide du couvert par rapport à des espacements plus larges. En effet, le scénario à simple rangée qui avait un espacement de 1 m entre les rangées a obtenu le taux de production le plus élevé à l'hectare en le comparant au scénario à double rangée avec un espacement de 1,5 m entre les rangées. Cela est expliqué par le caractère d'ajustement phénotypique rapide de la surface foliaire et sa forte capacité de production des arbres. Dans le cas où les espacements entre les rangées sont larges, il peut y avoir un retard de la fermeture du couvert végétal et par conséquent un besoin prolongé de lutte contre la compétition herbacée au cours de la période de croissance. En faisant référence à nos résultats obtenus dans le deuxième chapitre sur la productivité du peuplier hybride en TCR, les arbres cultivés à des espacements larges développent des grosses tiges qui sont moins

denses, et par conséquent une biomasse à l'hectare réduite. Dans la région de l'Abitibi-Témiscamingue les herbacées et les graminées sont abondantes sur les sols riches argileux. En plantations celles-ci concurrencent les arbres mis en terre pour l'eau du sol et les éléments nutritifs (Berthelot, 2001). Le peuplement est donc en compétition intense avec la végétation herbacée jusqu'à la fermeture du couvert, celle-ci crée une couche isolante en surface du dépôt minéral qui garde la température du sol frais et entraîne par conséquent une baisse de croissance des arbres (Ledin et Willebrand, 1996). Un espacement étroit accélérerait la fermeture du couvert mais la production différerait une fois que la fermeture du couvert est atteinte : au fur et à mesure que la longueur de la rotation augmente, l'avantage précoce d'un espacement faible sera réduit. Plusieurs ont montré que l'avantage précoce en termes de rendement est dû à la fermeture accélérée du couvert associé à une plantation rapprochée pourrait ne pas être maintenue à long terme, car les arbres seront en compétition plus tard et que les gros vont réussir à survivre (Liesebach et al., 1999; Mitchell, 1995).

Les objectifs spécifiques sont de : 1) Comparer la productivité en biomasse entre les deux systèmes de cultures à savoir simple et double rangée. On s'attend à avoir plus de productivité à court terme avec le système à double rangée en raison de la fermeture rapide du couvert pour cette conception de plantation (Bergkvist et Ledin, 1998). 2) Évaluer l'effet de l'espacement (densité) sur la productivité. L'hypothèse est que les arbres plantés à des espacements réduits auront plus de biomasse à l'hectare comparés à leurs homologues plantés à des espacements plus grands et soumis à une forte compétition avec la végétation herbacée (Benomar et al., 2013). En se basant sur les connaissances acquises au niveau du deuxième chapitre, on s'attend à ce que la compétition herbacée dans les espacements plus grands diminuera la croissance des PEH. La saison de croissance courte qui est autour de 153-177 jour/année (Environnement Canada, 2012), nécessite que l'on développe des méthodes de culture adaptées. L'apport externe d'engrais devrait améliorer la productivité, mais est-il possible de supporter la croissance des PEH à très forte densité par la fertilisation? 3) Évaluer l'effet de la fertilisation sur la productivité. On s'attend à ce que la fertilisation

compense l'effet de la compétition entre les arbres plantés à haute densité. 4) Évaluer les performances des différents clones sur la base de leurs caractéristiques morphologiques. Une étude comparative sera effectuée entre les différents clones. Plus précisément la morphologie et la surface foliaire seront examinées pour les différents clones et un lien entre ces deux éléments et la production de la biomasse sera établi. Une bonne corrélation entre l'indice de surface foliaire individuelle et entre la biomasse ligneuse est prévue (Taylor et al., 2001).

3.3 Implications pour l'aménagement forestier durable

Dans le contexte de la forêt québécoise avec une croissance lente de la forêt boréale ainsi que la pression élevée sur les forêts naturelles, les plantations de peuplier hybride à croissance rapide constituent un grand intérêt pour l'aménagement écosystémique durable. Plusieurs sociétés de produits forestiers qui exploitent les forêts naturelles exclusivement pour la production de pâtes à papiers investissent considérablement dans la plantation de PEH (Larocque, 1999). Les forestiers doivent fonder leurs décisions sur des informations biologiques solides et adaptées, pour s'assurer que la production de biomasse soit maximisée au coût le plus bas possible, tout en s'adaptant à la réalité économique de ces sociétés. Cet objectif peut être réalisé en sélectionnant les espacements et les clones appropriés. En utilisant les clones adaptés à la région, le peuplier hybride permet d'obtenir sur une surface restreinte, un rendement supérieur par rapport aux espèces couramment utilisées en forêt boréale (Benomar et al., 2013). Cette étude a montré que la biomasse à l'hectare augmentait avec la réduction de l'espacement entre les pieds-mère deux ans après le recépage et que le rendement de biomasse était très intéressant pour les deux meilleurs clones, toutefois, la biomasse produite en tenant compte du taux de mortalité, a considérablement baissé. Il est à noter que si on ne tient pas en compte la mortalité, on peut avoir des rendements élevés car les clones profitent de l'espace créé et donne en conséquence des gros diamètres, cependant il y'a moins d'arbres à l'hectare. Il faut noter que le peuplement était en

compétition intense avec la végétation herbacée, ce qui s'est repercuté sur le rendement en biomasse final. Ceci met en évidence, le recours à l'entretien mécanique régulier qui est fortement conseillé pour remédier à cette problématique en région. Tous ces facteurs seront à prendre en compte lors de la conception des plantations de taillis à courte rotation en ayant en tête aussi les caractéristiques recherchées pour la transformation, entre un maximum de biomasse et la densité de la matière ligneuse produite.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Adame, P., Hynynen, J., Cañellas, I. et del Río, M. (2008). Individual-tree diameter growth model for rebollo oak (*Quercus pyrenaica* Willd.) coppices. *Forest Ecology and Management*, 255(3), 1011-1022.
- Afas, N. A., Marron, N., Van Dongen, S., Laureysens, I. et Ceulemans, R. (2008). Dynamics of biomass production in a poplar coppice culture over three rotations (11 years). *Forest Ecology and Management*, 255(5), 1883-1891.
- Albacete, A., Ghanem, M. E., Martínez-Andújar, C., Acosta, M., Sánchez-Bravo, J., Martínez, V., Pérez-Alfocea, F. (2008). Hormonal changes in relation to biomass partitioning and shoot growth impairment in salinized tomato (*Solanum lycopersicum* L.) plants. *Journal of Experimental Botany*, 59(15), 4119-4131.
- Armstrong, A., Johns, C. et Tubby, I. (1999). Effects of spacing and cutting cycle on the yield of poplar grown as an energy crop. *Biomass and Bioenergy*, 17(4), 305-314.
- Benetka, V., Bartáková, I. et Mottl, J. (2002). Productivity of *Populus nigra* L. ssp. *nigra* under short-rotation culture in marginal areas. *Biomass and Bioenergy*, 23(5), 327-336.
- Benetka, V., Novotná, K. et Štochlová, P. (2014). Biomass production of *Populus nigra* L. clones grown in short rotation coppice systems in three different environments over four rotations. *iForest-Biogeosciences and Forestry*, 7(4), 233.
- Benetka, V., Vrátný, F. et Šálková, I. (2007). Comparison of the productivity of *Populus nigra* L. with an interspecific hybrid in a short rotation coppice in marginal areas. *Biomass and Bioenergy*, 31(6), 367-374.
- Benomar, L., DesRochers, A. et Larocque, G. R. (2012). The effects of spacing on growth, morphology and biomass production and allocation in two hybrid poplar clones growing in the boreal region of Canada. *Trees*, 26(3), 939-949.
- Benomar, L., DesRochers, A. et Larocque, G. R. (2013). Comparing growth and fine root distribution in monocultures and mixed plantations of hybrid poplar and spruce. *Journal of Forestry Research*, 24(2), 247-254.
- Bentsen, N. S. et Felby, C. (2012). Biomass for energy in the European Union-a review of bioenergy resource assessments. *Biotechnology for biofuels*, 5(1), 1-10.

- Bergez, J.-E., Auclair, D. et Bouvarel, L. (1989). First-Year Growth of Hybrid Poplar Shoots from Cutting or Coppice Origin. *Forest science*, 35(4), 1105-1113.
- Bergkvist, P. et Ledin, S. (1998). Stem biomass yields at different planting designs and spacings in willow coppice systems. *Biomass and Bioenergy*, 14(2), 149-156.
- Bonin, C. et Lal, R. (2012). Bioethanol potentials and life-cycle assessments of biofuel feedstocks. *Critical reviews in plant sciences*, 31(4), 271-289.
- Bullard, M. J., Mustill, S. J., Carver, P. et Nixon, P. M. I. (2002). Yield improvements through modification of planting density and harvest frequency in short rotation coppice *Salix* spp.—2. Resource capture and use in two morphologically diverse varieties. *Biomass and Bioenergy*, 22(1), 27-39.
- Cañellas, I., Del Río, M., Roig, S. et Montero, G. (2004). Growth response to thinning in *Quercus pyrenaica* Willd. coppice stands in Spanish central mountain. *Annals of Forest Science*, 61(3), 243-250.
- Castaño-Díaz, M., Barrio-Anta, M., Afif-Khoury, E. et Cámara-Obregón, A. (2018). Willow Short Rotation Coppice Trial in a Former Mining Area in Northern Spain: Effects of Clone, Fertilization and Planting Density on Yield after Five Years. *Forests*, 9(3), 154.
- Ceulemans, R. et Deraedt, W. (1999). Production physiology and growth potential of poplars under short-rotation forestry culture. *Forest Ecology and Management*, 121(1-2), 9-23.
- Ceulemans, R., McDonald, A. et Pereira, J. (1996). A comparison among eucalypt, poplar and willow characteristics with particular reference to a coppice, growth-modelling approach. *Biomass and Bioenergy*, 11(2-3), 215-231.
- Chave, J., Condit, R., Muller-Landau, H. C., Thomas, S. C., Ashton, P. S., Bunyavejchewin, S., Esufali, S. (2008). Assessing evidence for a pervasive alteration in tropical tree communities. *PLoS biology*, 6(3), e45.
- Corcuera, L., Camarero, J. J., Sisó, S. et Gil-Pelegrín, E. (2006). Radial-growth and wood-anatomical changes in overaged *Quercus pyrenaica* coppice stands: functional responses in a new Mediterranean landscape. *Trees*, 20(1), 91-98.
- Derbowka, D., Andersen, S., Lee-Andersen, S. et Stenberg, C. (2012). Poplar and willow cultivation and utilization in Canada. 2008–2011 Canadian Country Progress Report. *Canadian Report to the 24th IPC Session, Dehradun, India—International Poplar Commis*, 93.

- DesRochers, A. et Lieffers, V. J. (2001). Root biomass of regenerating aspen (*Populus tremuloides*) stands of different densities in Alberta. *Canadian journal of forest research*, 31(6), 1012-1018.
- DesRochers, A. et Tremblay, F. (2009). The effect of root and shoot pruning on early growth of hybrid poplars. *Forest Ecology and Management*, 258(9), 2062-2067.
- Dickmann, D. I., Isebrands, J., Blake, T. J., Kosola, K. et Kort, J. (2001). Physiological ecology of poplars. *Poplar culture in north America*(Part A), 77-118.
- Dillen, S., Vanbeverem, S., Al Afas, N., Laureysens, I., Croes, S. et Ceulemans, R. (2011). Biomass production in a 15-year-old poplar short-rotation coppice culture in Belgium. *Aspects of Applied Biology*, 112, 99-106.
- Edenhofer, O., Pichs-Madruga, R., Sokona, Y., Seyboth, K., Kadner, S., Zwickel, T., von Stechow, C. (2011). *Renewable energy sources and climate change mitigation: Special report of the intergovernmental panel on climate change*. Cambridge University Press.
- Eisenbies, M. H., Volk, T. A., Espinoza, J., Gantz, C., Himes, A., Posselius, J., Summers, B. (2017). Biomass, spacing and planting design influence cut-and-chip harvesting in hybrid poplar. *Biomass and Bioenergy*, 106, 182-190.
- Elferjani, R., DesRochers, A. et Tremblay, F. (2016). Plasticity of bud phenology and photosynthetic capacity in hybrid poplar plantations along a latitudinal gradient in northeastern Canada. *Environmental and experimental botany*, 125, 67-76.
- Environnement Canada (2012). *Données climatologiques du Canada. 1971-2000*. Repéré à <http://www.climat.meteo.gc.ca/climatenonnals/resultsf.htm?Province=QUE%20&StationNa>.
- Fang, S., Xue, J. et Tang, L. (2007). Biomass production and carbon sequestration potential in poplar plantations with different management patterns. *Journal of Environmental Management*, 85(3), 672-679.
- FAO, (2001). Ressources forestières mondiales. Évaluation 2000. FAO Forestry Paper 140. FAO Forestry Paper, p. 511.
- Ferm, A., Hytönen, J. et Vuori, J. (1989). Effect of spacing and nitrogen fertilization on the establishment and biomass production of short rotation poplar in Finland. *Biomass*, 18(2), 95-108.
- Fischer, M., Trnka, M., Kučera, J., Deckmyn, G., Orság, M., Sedlák, P., Ceulemans, R. (2013). Evapotranspiration of a high-density poplar stand in comparison with a reference grass cover in the Czech–Moravian Highlands. *Agricultural and Forest Meteorology*, 181, 43-60.

- Fortier, J. et Messier, C. (2006). Are chemical or mechanical treatments more sustainable for forest vegetation management in the context of the TRIAD? *The Forestry Chronicle*, 82(6), 806-818.
- Guillemette, T. et DesRochers, A. (2008). Early growth and nutrition of hybrid poplars fertilized at planting in the boreal forest of western Quebec. *Forest Ecology and Management*, 255(7), 2981-2989.
- Hansen, E. H., Gobakken, T., Solberg, S., Kangas, A., Ene, L., Mauya, E. et Næsset, E. (2015). Relative efficiency of ALS and InSAR for biomass estimation in a Tanzanian rainforest. *Remote Sensing*, 7(8), 9865-9885.
- Hauk, S., Knoke, T. et Wittkopf, S. (2014). Economic evaluation of short rotation coppice systems for energy from biomass—A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 29, 435-448.
- Huda, A., Koubaa, A., Cloutier, A., Hernández, R. et Fortin, Y. (2011). *Wood Quality of hybrid poplar clones: Clonal variation and property interrelationships*. Communication présentée Proceedings of the 3rd International Scientific Conference on Hardwood Processing.
- Huda, A. A., Koubaa, A., Cloutier, A., Hernández, R. E. et Fortin, Y. (2014). Variation of the physical and mechanical properties of hybrid poplar clones. *BioResources*, 9(1), 1456-1471.
- Iida, Y., Poorter, L., Sterck, F. J., Kassim, A. R., Kubo, T., Potts, M. D. et Kohyama, T. S. (2012). Wood density explains architectural differentiation across 145 co-occurring tropical tree species. *Functional Ecology*, 26(1), 274-282.
- Iwasa, Y. et Kubo, T. (1997). Optimal size of storage for recovery after unpredictable disturbances. *Evolutionary ecology*, 11(1), 41-65.
- Labrecque, M. et Teodorescu, T. I. (2005). Field performance and biomass production of 12 willow and poplar clones in short-rotation coppice in southern Quebec (Canada). *Biomass and Bioenergy*, 29(1), 1-9.
- Lafleur, B., Lalonde, O. et Labrecque, M. (2017). First-Rotation Performance of Five Short-Rotation Willow Cultivars on Different Soil Types and Along a Large Climate Gradient. *BioEnergy Research*, 10(1), 158-166.
- Larocque, G. R. (1999). Performance and morphological response of the hybrid poplar DN-74 (*Populus deltoides* x *nigra*) under different spacings on a 4-year rotation. *Annals of Forest Science*, 56(4), 275-287.
- Laureysens, I., Deraedt, W., Indeherberge, T. et Ceulemans, R. (2003). Population dynamics in a 6-year old coppice culture of poplar. I. Clonal differences in stool

- mortality, shoot dynamics and shoot diameter distribution in relation to biomass production. *Biomass and Bioenergy*, 24(2), 81-95.
- Laureysens, I., Pellis, A., Willems, J. et Ceulemans, R. (2005). Growth and production of a short rotation coppice culture of poplar. III. Second rotation results. *Biomass and Bioenergy*, 29(1), 10-21.
- Li, K., Lloyd, B., Liang, X.-J. et Wei, Y.-M. (2014). Energy poor or fuel poor: What are the differences? *Energy Policy*, 68, 476-481.
- Lindegaard, K., Parfitt, R., Donaldson, G., Hunter, T., Dawson, W., Forbes, E., Larsson, S. (2001). Comparative trials of elite Swedish and UK biomass willow varieties. *Aspects of Applied Biology*, 65, 183-192.
- Lteif, A., Whalen, J., Bradley, R. et Camiré, C. (2007). Mixtures of papermill biosolids and pig slurry improve soil quality and growth of hybrid poplar. *Soil use and management*, 23(4), 393-403.
- Nam, V. T., Anten, N. P. R. et van Kuijk, M. (2018). Biomass dynamics in a logged forest: the role of wood density. *Journal of Plant Research*, 131(4), 611-621.
- Ministère des Forêts de la Faune et des Parcs. (2015). *Stratégie d'aménagement durable des forêts*. Québec: Repéré à <http://www.mffp.gouv.qc.ca>.
- Ministère des Forêts de la Faune et des Parcs. (2020). *Transformation du bois*. Québec: Repéré à <https://mffp.gouv.qc.ca/les-forets/transformation-du-bois/>
- Périnet, P., Gagnon, H. et Morin, S. (2001). Liste des clones recommandés de peuplier hybride par sous-région écologique au Québec. *MRNFQ. Direction de la Recherche Forestière, Québec, QC, Canada*.
- Persson, B., Persson, A., Ståhl, E. G. et Karlsmats, U. (1995). Wood quality of *Pinus sylvestris* progenies at various spacings. *Forest Ecology and Management*, 76(1-3), 127-138.
- Peterson, R. A., Albaum, G. et Beltramini, R. F. (1985). A meta-analysis of effect sizes in consumer behavior experiments. *Journal of Consumer Research*, 12(1), 97-103.
- Poorter, L., McDonald, I., Alarcón, A., Fichtler, E., Licona, J. C., Peña-Claros, M., Sass-Klaassen, U. (2010). The importance of wood traits and hydraulic conductance for the performance and life history strategies of 42 rainforest tree species. *New phytologist*, 185(2), 481-492.
- Proe, M., Griffiths, J. et Craig, J. (2002). Effects of spacing, species and coppicing on leaf area, light interception and photosynthesis in short rotation forestry. *Biomass and Bioenergy*, 23(5), 315-326.

- Sage, R. (1999). Weed competition in willow coppice crops: the cause and extent of yield losses. *Weed Research (Oxford)*, 39(5), 399-411.
- R Core Team. (2019). R: A Language and Environment for Statistical Computing. Vienna, Australia: R Foundation for Statistical Computing. Repéré à <https://www.R-project.org>
- Réseau Ligniculture Québec. (2011). *Le Guide de Populiculture au Québec - Un guide pratique sur la culture du peuplier hybride*.54
- Ressources Naturelles Canada. (2000). *L'Amélioration génétique des arbres au Québec*. Direction de la Recherche Forestière Forêt Québec.
- Ressources Naturelles Canada. (2018). *L'état des forêts au Canada: rapport annuel 2018*. (ISSN 1488-2744).
- Salmon, D. (2016). Ressources et industries forestières du Québec - Portrait statistique: Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs - Direction du développement de l'industrie des produits du bois.
- Salomón, R., Rodríguez-Calcerrada, J., Zafra, E., Morales-Molino, C., Rodríguez-García, A., González-Doncel, I., Valbuena-Carabaña, M. (2016). Unearthing the roots of degradation of *Quercus pyrenaica* coppices: A root-to-shoot imbalance caused by historical management? *Forest Ecology and Management*, 363, 200-211.
- Salomón, R., Valbuena-Carabaña, M., Gil, L. et González-Doncel, I. (2013). Clonal structure influences stem growth in *Quercus pyrenaica* Willd. coppices: Bigger is less vigorous. *Forest Ecology and Management*, 296, 108-118.
- Sean, S. T. (2006). Use of short-rotation coppice willow clones of *Salix viminalis* as furnish in panel production. *Forest products journal*, 56(9), 47-53.
- Shooshtarian, A., Anderson, J. A., Armstrong, G. W. et Luckert, M. K. (2018). Growing hybrid poplar in western Canada for use as a biofuel feedstock: A financial analysis of coppice and single-stem management. *Biomass and Bioenergy*, 113, 45-54.
- Smil, V. (1994). Energy in world history.
- Styles, D. et Jones, M. B. (2007). Energy crops in Ireland: quantifying the potential life-cycle greenhouse gas reductions of energy-crop electricity. *Biomass and Bioenergy*, 31(11-12), 759-772.
- Sulima, P., Przyborowski, J. et Stolarski, M. (2006). Ocena przydatności wybranych gatunków wierzby do celów energetycznych. *Fragmenta Agronomica*, 23(3), 290-299.

- Tahvanainen, L. et Rytönen, V. (1999). Biomass production of *Salix viminalis* in southern Finland and the effect of soil properties and climate conditions on its production and survival. *Biomass and Bioenergy*, 16(2), 103-117.
- Taylor, G., Beckett, K., Robinson, K., Stiles, K. et Rae, A. (2001). Identifying QTL for yield in UK biomass poplar. *Aspects of Applied Biology*(65), 173-182.
- Tharakan, P., Volk, T., Abrahamson, L. et White, E. (2003). Energy feedstock characteristics of willow and hybrid poplar clones at harvest age. *Biomass and Bioenergy*, 25(6), 571-580.
- Walle, I. V., Van Camp, N., Van de Castele, L., Verheyen, K. et Lemeur, R. (2007). Short-rotation forestry of birch, maple, poplar and willow in Flanders (Belgium) I—Biomass production after 4 years of tree growth. *Biomass and Bioenergy*, 31(5), 267-275.
- Wesche, K., Ronnenberg, K. et Hensen, I. (2005). Lack of sexual reproduction within mountain steppe populations of the clonal shrub *Juniperus sabina* L. in semi-arid southern Mongolia. *Journal of Arid Environments*, 63(2), 390-405.
- Willebrand, E. et Verwijst, T. (1993). Population dynamics of willow coppice systems and their implications for management of short-rotation forests. *The Forestry Chronicle*, 69(6), 699-704.
- Yemshanov, D. et McKenney, D. (2008). Fast-growing poplar plantations as a bioenergy supply source for Canada. *Biomass and Bioenergy*, 32(3), 185-197.
- Zeppel, M. J., Harrison, S. P., Adams, H. D., Kelley, D. I., Li, G., Tissue, D. T., Palmer, A. (2015). Drought and resprouting plants. *New phytologist*, 206(2), 583-589.
- Zhang, S. Y., Ren, H. et Jiang, Z. (2021). Wood density and wood shrinkage in relation to initial spacing and tree growth in black spruce (*Picea mariana*). *Journal of Wood Science*, 67(1), 30.
- Zhu, W.-Z., Xiang, J.-S., Wang, S.-G. et Li, M.-H. (2012). Resprouting ability and mobile carbohydrate reserves in an oak shrubland decline with increasing elevation on the eastern edge of the Qinghai–Tibet Plateau. *Forest Ecology and Management*, 278, 118-126.
- Zobel, B. J. et Van Buijtenen, J. P. (2012). *Wood variation: its causes and control*. Springer Science & Business Media.