



**CROISSANCE ET RENDEMENT DE PLANTATIONS
SUR PARCS A RÉSIDUS MINIERS RESTAURÉS AU QUÉBEC**

par Léna Levoy

**Mémoire présenté à l'Université du Québec à Chicoutimi en vue de l'obtention du
grade de Maître ès sciences (M. Sc.) en ressources renouvelables**

Québec, Canada

© Léna Levoy, 2023

RÉSUMÉ

L'industrie minière génère de grandes quantités de résidus fins qui sont disposés dans des parcs à résidus miniers. Ces derniers représentent d'importants enjeux environnementaux et, au Québec (Canada), la Loi sur les mines oblige les compagnies d'exploitation minière à procéder à une mise en végétation de leurs parcs à résidus. Afin de répondre aux exigences du Gouvernement québécois, une majorité des industriels miniers ensemencent des espèces herbacées sur leurs parcs à résidus. Toutefois, dans un contexte de restauration et un processus d'atténuation des changements climatiques, Niobec Inc. et ArcelorMittal Exploitation minière Canada s.e.n.c., deux compagnies d'exploitation minière, désirent mettre en végétation leurs parcs à résidus avec des espèces ligneuses afin de permettre une séquestration biologique du carbone à long terme et de, potentiellement, générer des crédits carbone compensatoires. L'objectif de la présente étude était d'établir les courbes de croissance et de rendement spécifiques des éventuelles mises en végétation, avec des pins gris (*Pinus banksiana* Lamb.), des parcs à résidus de la mine Niobec (Saint-Honoré, Québec, Canada) appartenant à Niobec Inc. et de l'ancienne mine du Lac Jeannine (Gagnon, Québec, Canada) appartenant à ArcelorMittal ainsi que des éventuelles mises en végétation, avec des épinettes noires (*Picea mariana* (Mill.) B.S.P.), des parcs à résidus de l'ancienne mine du Lac Jeannine et de la mine de Mont-Wright (Fermont, Québec, Canada) appartenant à ArcelorMittal. Pour les deux premiers sites, la croissance ligneuse – sous forme de volume cumulé – a été estimée à partir des analyses de tiges des arbres dominants d'essais de végétalisation réalisés, à petite échelle, sur chacun des deux parcs à résidus. Le rendement ligneux – sous forme de volume marchand brut ; pour une densité arborescente de 2 000 tiges×ha⁻¹ – a, quant à lui, été évalué à partir de modèles créés à l'aide des données de la mise à jour des tables de rendement québécois du manuel d'aménagement forestier du Ministère des Ressources naturelles du Québec. Les deux parcs à résidus appartenant à ArcelorMittal possédant des résidus similaires, générés par l'exploitation de fer, la croissance et le rendement ligneux du dernier site ont été modélisés à partir des données de croissance et de rendement des épinettes noires se trouvant sur le parc à résidus de l'ancienne mine du Lac Jeannine, sur un site naturel à proximité de ce parc et sur des sites naturels à proximité du parc à résidus de la mine de Mont-Wright. Les résultats obtenus montrent que la croissance et le rendement ligneux étaient différents pour chaque essence et propres à chacun des trois parcs à résidus miniers se distinguant les uns des autres par des conditions climatiques et édaphiques spécifiques. Les pins gris qui seront éventuellement mis en terre dans le cadre d'un boisement de la mine Niobec pourraient avoir un rendement potentiel comparable à celui de plantations de pin gris se trouvant sur des sites naturels québécois. Les pins gris et les épinettes noires qui seront éventuellement mis en terre dans le cadre d'un boisement de l'ancienne mine du Lac Jeannine et de la mine de Mont-Wright pourraient, quant à eux, présenter un rendement potentiel inférieur à celui de plantations de pin gris et d'épinette noire se trouvant sur des sites naturels québécois. Ce rendement pourrait davantage être comparable à celui de peuplements québécois naturels purs et réguliers de pin gris et d'épinette noire. Maintenant que les courbes de rendement ligneux d'éventuelles végétalisations des trois parcs à résidus miniers étudiés ont été construites, elles pourront servir, notamment, à évaluer la séquestration biologique du carbone sur ces parcs et les bénéfices que les compagnies minières pourront en tirer.

TABLE DES MATIÈRES

RÉSUMÉ	ii
LISTE DES TABLEAUX.....	vi
LISTE DES FIGURES	vii
REMERCIEMENTS	ix
CHAPITRE 1 : INTRODUCTION	1
1.1 Lutte aux changements climatiques	1
1.2 Restauration de sites miniers	4
1.3 Hypothèses et objectif du projet.....	6
CHAPITRE 2 : MATÉRIEL ET MÉTHODES.....	8
2.1 Sites d'étude.....	8
2.1.1 Mine Niobec.....	9
2.1.1.1 <i>Parcs à résidus de la mine Niobec.....</i>	<i>10</i>
2.1.1.2 <i>Périphérie de la mine Niobec</i>	<i>11</i>
2.1.2 Mine de Mont-Wright.....	12
2.1.2.1 <i>Parc à résidus de la mine de Mont-Wright.....</i>	<i>13</i>
2.1.2.2 <i>Périphérie de la mine de Mont-Wright</i>	<i>13</i>
2.1.3 Ancienne mine du Lac Jeannine	14
2.1.3.1 <i>Parc à résidus de l'ancienne mine du Lac Jeannine</i>	<i>15</i>
2.1.3.2 <i>Périphérie de l'ancienne mine du Lac Jeannine.....</i>	<i>16</i>
2.2 Échantillonnage.....	17
2.2.1 Délimitation des placettes d'étude.....	17
2.2.2 Caractérisation des placettes d'étude.....	18
2.2.3 Sélection des arbres-études	22
2.2.4 Échantillonnage des arbres-études.....	23
2.3 Modélisation de la croissance et du rendement ligneux	24
2.3.1 Estimation de la croissance ligneuse	24
2.3.1.1 <i>Analyses de tige des arbres-études</i>	<i>24</i>
2.3.1.2 <i>Construction des courbes de croissance ligneuse</i>	<i>25</i>
2.3.1.3 <i>Modélisation de la croissance ligneuse sur le parc à résidus de la mine de Mont-Wright.....</i>	<i>26</i>
2.3.2 Modélisation du rendement ligneux	28
2.3.2.1 <i>Détermination de l'indice de qualité de station des sites d'étude à 50 ans.....</i>	<i>29</i>
2.3.2.2 <i>Modélisation du rendement des pins gris</i>	<i>31</i>
2.3.2.3 <i>Modélisation du rendement des épinettes noires</i>	<i>33</i>
2.4 Analyses statistiques	37
CHAPITRE 3 : RÉSULTATS	39
3.1 Mine Niobec.....	39

3.1.1	<i>Croissance des pins gris plantés sur le parc à résidus de la mine Niobec et dans sa périphérie.....</i>	39
3.1.2	<i>Rendement des éventuelles plantations de pin gris sur le parc à résidus de la mine Niobec</i>	41
3.2	Ancienne mine du Lac Jeannine.....	43
3.2.1	<i>Croissance des pins gris plantés sur le parc à résidus de l'ancienne mine du Lac Jeannine et dans sa périphérie</i>	43
3.2.2	<i>Rendement des éventuelles plantations de pin gris sur le parc à résidus de l'ancienne mine du Lac Jeannine</i>	45
3.2.3	<i>Croissance des épinettes noires plantées sur le parc à résidus de l'ancienne mine du Lac Jeannine et dans sa périphérie.....</i>	46
3.2.4	<i>Rendement des éventuelles plantations d'épinette noire sur le parc à résidus de l'ancienne mine du Lac Jeannine</i>	48
3.3	Mine de Mont-Wright	49
3.3.1	<i>Facteurs de correction édaphique affectant la croissance et le rendement des éventuelles épinettes noires plantées sur le parc à résidus de la mine de Mont-Wright</i>	49
3.3.2	<i>Croissance des éventuelles plantations d'épinettes noires sur le parc à résidus de la mine de Mont-Wright et dans sa périphérie</i>	50
3.3.3	<i>Rendement des éventuelles plantations d'épinette noire sur le parc à résidus de la mine de Mont-Wright.....</i>	52
3.4	Comparaison du rendement des éventuelles plantations de pin gris sur les parcs à résidus de la mine Niobec et de l'ancienne mine du Lac Jeannine.....	53
3.5	Comparaison du rendement des éventuelles plantations de pin gris et d'épinette noire sur le parc à résidus de l'ancienne mine du Lac Jeannine.....	54
3.6	Comparaison du rendement des éventuelles plantations d'épinette noire sur les parcs à résidus de l'ancienne mine du Lac Jeannine et de la mine de Mont-Wright...56	
	CHAPITRE 4 : DISCUSSION.....	58
4.1	Croissance et rendement de plantations sur parcs à résidus miniers restaurés au Québec.....	58
4.1.1	<i>Croissance et rendement des pins gris plantés sur le parc à résidus de la mine Niobec</i>	58
4.1.2	<i>Croissance et rendement des arbres plantés sur le parc à résidus de l'ancienne mine du Lac Jeannine.....</i>	61
4.1.2.1	<i>Croissance et rendement des pins gris plantés sur le parc à résidus de l'ancienne mine du Lac Jeannine</i>	61
4.1.2.2	<i>Croissance et rendement des épinettes noires plantées sur le parc à résidus de l'ancienne mine du Lac Jeannine</i>	64
4.1.3	<i>Croissance et rendement des éventuelles épinettes noires plantées sur le parc à résidus de la mine de Mont-Wright.....</i>	66
4.2	Nécessité de créer des courbes de rendement conservatrices et adaptées aux parcs à résidus miniers	69
	CHAPITRE 5 : CONCLUSION.....	73
	BIBLIOGRAPHIE.....	75

ANNEXE 1 : COMPARAISON DU POTENTIEL DE CROISSANCE DES PINS GRIS (<i>PINUS BANKSIANA</i> LAMB.) PLANTÉS SUR LE PARC À RÉSIDUS DE LA MINE NIOBEC EN 1989 – 1994 ET EN 2004	82
ANNEXE 2 : COMPARAISON DU POTENTIEL DE CROISSANCE DES PINS GRIS (<i>PINUS BANKSIANA</i> LAMB.) PLANTÉS SUR LES SITES NATURELS PLP03 ET PLP04 ÉTUDIÉS À PROXIMITÉ DE LA MINE NIOBEC	84
ANNEXE 3 : TABLES DE RENDEMENT POTENTIEL PROJETÉ DE PLANTATIONS SUR PARCS À RÉSIDUS MINIERES RESTAURÉS AU QUÉBEC.....	86
ANNEXE 4 : COMPARAISON ENTRE LES RENDEMENTS DE PLANTATIONS QUÉBÉCOISES PUBLIÉS PAR LE MINISTÈRE DES RESSOURCES NATURELLES EN 2000, CEUX MODÉLISÉS PAR AUGER ET WARD EN 2021 ET CEUX PROJETÉS À PARTIR DES MODÈLES CONSTRUITS DANS LA PRÉSENTE ÉTUDE.....	89

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Principales caractéristiques des placettes de 400 m ² délimitées et échantillonnées dans les plantations étudiées sur les parcs à résidus miniers des mines Niobec et du Lac Jeannine	20
Tableau 2 : Principales caractéristiques des placettes de 400 m ² délimitées et échantillonnées dans les peuplements situés en périphérie des mines Niobec, de Mont-Wright et du Lac Jeannine	21
Tableau 3 : Valeurs des coefficients b ₁ , b ₂ , b ₃ , b ₄ et b ₅ de l'équation 4 permettant de déterminer l'indice de qualité de station des sites d'étude à 50 ans	30
Tableau 4 : Valeurs estimées des coefficients et statistiques d'ajustement des régressions linéaires permettant de prédire, à partir de l'indice de qualité de station à 50 ans (IQS 50), le rendement – sous forme de volume marchand brut (VMB ; en m ³ ×ha ⁻¹) – de pins gris (PIG ; <i>Pinus banksiana</i> Lamb.) plantés à raison de 2 000 tiges×ha ⁻¹	33
Tableau 5 : Valeurs estimées des coefficients et statistiques d'ajustement des régressions quadratiques permettant de prédire, à partir de l'indice de qualité de station à 50 ans (IQS 50), le rendement – sous forme de volume marchand brut (VMB ; en m ³ ×ha ⁻¹) – d'épinettes noires (EPN ; <i>Picea mariana</i> (Mill.) B.S.P.) plantées à raison de 2 000 tiges×ha ⁻¹	35
Tableau 6 : Résultats de l'analyse de variance à deux facteurs dont un à mesures répétées (ANOVAR) pour le volume cumulé des pins gris (<i>Pinus banksiana</i> Lamb.) plantés sur le parc à résidus (PARM) de la mine Niobec et sur les sites naturels étudiés à proximité de cette mine (à savoir, PLP01 et PLP03-04)	40
Tableau 7 : Résultats de l'analyse de variance à deux facteurs dont un à mesures répétées (ANOVAR) pour le volume cumulé des pins gris (<i>Pinus banksiana</i> Lamb.) se trouvant dans la plantation sur le parc à résidus de l'ancienne mine du Lac Jeannine et dans le peuplement analogue de plantation étudié à proximité de cette mine (à savoir, LJ-Nat)	44
Tableau 8 : Résultats de l'analyse de variance à deux facteurs dont un à mesures répétées (ANOVAR) pour le volume cumulé des épinettes noires (<i>Picea mariana</i> (Mill.) B.S.P.) se trouvant dans la plantation sur le parc à résidus de l'ancienne mine du Lac Jeannine et dans le peuplement analogue de plantation étudié à proximité de cette mine (à savoir, LJ-Nat)	47

LISTE DES FIGURES

- Figure 1 :** Localisation des trois sites d'étude par rapport à la limite territoriale des forêts attribuables entrée en vigueur le 1^{er} avril 2018 au Québec, Canada (tracé inspiré de MFFP 2016a). 8
- Figure 2 :** Emplacement des trois plantations de pin gris (*Pinus banksiana* Lamb.) mises en terre sur des sites naturels près de la mine Niobec et utilisées comme comparatif édaphique pour le parc à résidus de cette mine. 12
- Figure 3 :** Représentation schématique de la méthode de prélèvement des rondelles d'un arbre abattu et ébranché. 23
- Figure 4 :** Potentiel de croissance en volume cumulé moyen (en dm³) des pins gris (*Pinus banksiana* Lamb.) plantés sur le parc à résidus de la mine Niobec et sur les sites naturels étudiés à proximité de cette dernière (à savoir, PLP01 et PLP03-04) par année d'âge cambial. 41
- Figure 5 :** Rendement potentiel projeté – sous forme de volume marchand brut (en m³×ha⁻¹) – des éventuels pins gris (*Pinus banksiana* Lamb.) plantés, à raison de 2 000 tiges×ha⁻¹, sur le parc à résidus de la mine Niobec en fonction de leur âge (en années). 42
- Figure 6 :** Potentiel de croissance en volume cumulé moyen (en dm³) des pins gris (*Pinus banksiana* Lamb.) se trouvant dans la plantation sur le parc à résidus de l'ancienne mine du Lac Jeannine et dans le peuplement analogue de plantation étudié à proximité de cette dernière (à savoir, LJ-Nat) par année d'âge cambial. 44
- Figure 7 :** Rendement potentiel projeté – sous forme de volume marchand brut (en m³×ha⁻¹) – des éventuels pins gris (*Pinus banksiana* Lamb.) plantés, à raison de 2 000 tiges×ha⁻¹, sur le parc à résidus de l'ancienne mine du Lac Jeannine en fonction de leur âge (en années). 45
- Figure 8 :** Potentiel de croissance en volume cumulé moyen (en dm³) des épinettes noires (*Picea mariana* (Mill.) B.S.P.) se trouvant dans la plantation sur le parc à résidus de l'ancienne mine du Lac Jeannine et dans le peuplement analogue de plantation étudié à proximité de cette dernière (à savoir, LJ-Nat) par année d'âge cambial. 47
- Figure 9 :** Rendement potentiel projeté – sous forme de volume marchand brut (en m³×ha⁻¹) – des éventuelles épinettes noires (*Picea mariana* (Mill.) B.S.P.) plantées, à raison de 2 000 tiges×ha⁻¹, sur le parc à résidus de l'ancienne mine du Lac Jeannine en fonction de leur âge (en années). 48
- Figure 10 :** Courbe de correction édaphique affectant la croissance en volume cumulé des éventuelles épinettes noires (EPN ; *Picea mariana* (Mill.) B.S.P.) plantées sur le parc à résidus miniers de la mine de Mont-Wright. 49

Figure 11 : Courbe de correction édaphique affectant le rendement – sous forme de volume marchand brut – des éventuelles épinettes noires (EPN ; <i>Picea mariana</i> (Mill.) B.S.P.) plantées, à raison de 2 000 tiges×ha ⁻¹ , sur le parc à résidus miniers de la mine de Mont-Wright.	50
Figure 12 : Potentiel de croissance en volume cumulé moyen (en dm ³) des épinettes noires (EPN ; <i>Picea mariana</i> (Mill.) B.S.P.) se trouvant dans l'éventuelle plantation sur le parc à résidus de la mine de Mont-Wright et dans les peuplements analogues de plantations étudiés à proximité de cette dernière (à savoir, MW1 et MW2) par année d'âge cambial.	51
Figure 13 : Rendement potentiel projeté – sous forme de volume marchand brut (en m ³ ×ha ⁻¹) – des éventuelles épinettes noires (EPN ; <i>Picea mariana</i> (Mill.) B.S.P.) plantées, à raison de 2 000 tiges×ha ⁻¹ , sur le parc à résidus de la mine de Mont-Wright en fonction de leur âge (en années).	53
Figure 14 : Rendement potentiel projeté – sous forme de volume marchand brut (en m ³ ×ha ⁻¹) – des éventuels pins gris (<i>Pinus banksiana</i> Lamb.) plantés, à raison de 2 000 tiges×ha ⁻¹ , sur les parcs à résidus de la mine Niobec et de l'ancienne mine du Lac Jeannine en fonction de leur âge (en années).	54
Figure 15 : Rendement potentiel projeté – sous forme de volume marchand brut (en m ³ ×ha ⁻¹) – des éventuels pins gris (<i>Pinus banksiana</i> Lamb.) et des éventuelles épinettes noires (<i>Picea mariana</i> (Mill.) B.S.P.) plantés, à raison de 2 000 tiges×ha ⁻¹ , sur le parc à résidus de l'ancienne mine du Lac Jeannine en fonction de leur âge (en années).	55
Figure 16 : Rendement potentiel projeté – sous forme de volume marchand brut (en m ³ ×ha ⁻¹) – des éventuelles épinettes noires (<i>Picea mariana</i> (Mill.) B.S.P.) plantées, à raison de 2 000 tiges×ha ⁻¹ , sur les parcs à résidus de l'ancienne mine du Lac Jeannine et de la mine de Mont-Wright en fonction de leur âge (en années).	57

REMERCIEMENTS

Je voudrais adresser mes remerciements à toutes les personnes qui m'ont donné la chance de pouvoir effectuer ma maîtrise et qui m'ont aidée à la réaliser.

Je tiens tout d'abord à remercier vivement Jean-François Boucher, mon directeur de maîtrise, pour m'avoir fait confiance et pour m'avoir permis de travailler sur un sujet de recherche aussi intéressant et passionnant. Je voudrais également le remercier pour ses conseils et ses explications qui m'ont été très précieux dans la réalisation de mon projet. Je tiens aussi à remercier vivement Boris Dufour, mon co-directeur de maîtrise, pour son aide indispensable tant dans la récolte de mes données sur le terrain que dans l'analyse de ces dernières. J'aimerais également le remercier pour son soutien, ses encouragements et sa disponibilité tout au long de ma maîtrise.

Par la suite, je tiens à remercier Pascal Tremblay et Florence Bouchard-Jean pour m'avoir encouragée à faire une maîtrise en ressources renouvelables avec Jean-François. Je tiens à remercier Marie-Josée Tremblay, Olivier Fradette, Marco Fillion, Alyson Gagnon, Jérémy Desbiens, Anne-Elizabeth Harvey, Sophie-Ann Renald, Maxime Paré et Guillaume Bonvalot-Maltais pour leur aide précieuse dans la récolte de mes échantillons et de mes données sur le terrain ou dans l'analyse de mes échantillons au laboratoire. Je voudrais également remercier Cornélia Krause pour avoir répondu à mes interrogations et pour avoir validé certaines de mes données ainsi que, Frédéric Gagnon pour ses informations concernant la mine Niobec. Un grand merci à Valérie Levasseur pour son aide précieuse quant à la réutilisation de matériel sous droit d'auteur et à la mise en forme de mon mémoire. Je tiens aussi à remercier Charles Ward, Lise Charette et Isabelle Auger pour m'avoir donné des conseils et des explications concernant la modélisation des courbes de croissance et de rendement ligneux. Un immense merci également à Julie Barrette pour ses recommandations et ses précieux encouragements.

Je tiens à remercier le Conseil de recherches en sciences naturelles et en génie du Canada (CRSNG) pour avoir financé et donc rendu possible ce projet. Je souhaiterais aussi remercier Niobec Inc. et ArcelorMittal Exploitation minière Canada s.e.n.c. pour leur confiance.

Enfin, je tiens à remercier toute ma famille et tous mes amis pour m'avoir encouragée tout au long de ma maîtrise. J'aimerais remercier en particulier mes parents qui m'ont toujours soutenue et qui m'ont laissée étudier ce qui me plaisait même si cela impliquait que je vive à plus de 5 000 km d'eux. Pour finir, je souhaiterais remercier vivement Élodie et Oriane pour m'avoir soutenue, écoutée, déstressée, conseillée et aidée sans relâche.

CHAPITRE 1

INTRODUCTION

1.1 Lutte aux changements climatiques

Les changements climatiques font, depuis maintenant plusieurs années, consensus au sein de la communauté scientifique (Doran et Zimmerman 2009 ; Carlton *et al.* 2015 ; Cook *et al.* 2016). Ces changements climatiques seraient dus aux activités humaines qui entraînent une modification de la composition atmosphérique par, notamment, une augmentation des concentrations atmosphériques de différents gaz à effet de serre (GES), tels que le dioxyde de carbone (CO₂), le méthane (CH₄) et le protoxyde d'azote (N₂O) (IPCC 2021). La hausse des émissions de ces gaz est principalement attribuable à l'utilisation des combustibles fossiles qui émettent du CO₂ dans l'atmosphère et aux changements d'affectation des terres, principalement la déforestation (IPCC 2021). Ces émissions d'origine humaine entraînent une augmentation de la concentration des GES dans l'atmosphère car les systèmes naturels sont incapables d'absorber ces gaz au même rythme qu'ils sont produits. En effet, durant la décennie 2012 – 2021 par exemple, les émissions globales de CO₂ associées à l'utilisation de combustibles fossiles et l'industrie étaient, en moyenne, de $9,6 \pm 0,5$ gigatonnes de carbone par an (Gt C×an⁻¹) et celles associées aux changements d'affectation des terres étaient, en moyenne, de $1,2 \pm 0,7$ Gt C×an⁻¹ (Friedlingstein *et al.* 2022). Or, durant cette même décennie, les deux principaux puits de carbone de l'écosphère, à savoir les écosystèmes terrestres et les océans, ont absorbé respectivement, $3,1 \pm 0,6$ Gt C×an⁻¹ et $2,9 \pm 0,4$ Gt C×an⁻¹ (Friedlingstein *et al.* 2022). Ainsi, entre 2012 et 2021, $5,2 \pm 0,02$ Gt C×an⁻¹ ont, en moyenne, été émises directement dans l'atmosphère (Friedlingstein *et al.* 2022). De plus, les émissions

de GES vers l'atmosphère ont considérablement augmenté depuis le début de l'industrialisation. Par conséquent, alors qu'en 1750, la concentration de CO₂ dans l'atmosphère était d'environ 278,3 parties par million (ppm), cette dernière atteignait, en moyenne, $415,7 \pm 0,2$ ppm en 2021 (WMO 2022). Les concentrations de CH₄ et N₂O dans l'atmosphère, sont, quant à elles, passées respectivement de 729,2 parties par milliard (ppb) en 1750 à $1\,908 \pm 2,0$ ppb en 2021 et de 270,1 ppb lors de la période préindustrielle à $334,5 \pm 0,1$ ppb en 2021 (WMO 2022). Les concentrations atmosphériques de ces GES n'ont jamais été aussi élevées et leur augmentation rapide conduit à d'imprévisibles changements dans le système climatique (IPCC 2021 ; IPCC 2022 ; WMO 2022).

Les conséquences de ces hausses de teneur en GES sont nombreuses car elles entraînent une hausse des températures moyennes de l'atmosphère et des océans (IPCC 2021). Cette augmentation des températures globales entraîne, quant à elle, une fréquence et une gravité accrues des périodes de canicule, une hausse du nombre d'évènements de précipitations abondantes, un déplacement des enveloppes bioclimatiques et une élévation du niveau de la mer, pour ne citer que ces impacts (IPCC 2021 ; IPCC 2022). Cet ensemble de conséquences pourrait avoir des répercussions sur les écosystèmes en modifiant, par exemple, la distribution des plantes ou en augmentant le nombre d'extinctions d'espèces (IPCC 2022). Il y aurait également de fortes répercussions sanitaires et économiques pour la population humaine (IPCC 2022). C'est pourquoi, actuellement, l'atténuation des changements climatiques est un des enjeux majeurs pour l'humanité.

Depuis 2013, le Québec est un des partenaires de la *Western Climate Initiative* Inc. (WCI) qui regroupe l'état de la Californie (États-Unis) et la province du Québec (Canada). Ces participants souhaitent lutter, par une approche commune, contre l'ampleur

des conséquences des changements climatiques (MELCCFP 2018a). Pour cela, la WCI mise sur un marché du carbone nord américain qui vise la réduction des émissions de GES (MELCCFP 2018a). La mise en œuvre de ce marché par l'établissement d'un système nord-américain de plafonnement et d'échange de droits d'émissions de GES a pour but, pour le Québec, de réduire les émissions de GES de 37,5 % d'ici 2030, par rapport à 1990, et d'atteindre la quasi-carboneutralité en 2050 (WCI 2022). Ainsi, dans le cadre de la WCI, les industries visées par le règlement doivent se conformer à des limites d'émissions de GES imposées en réduisant, dans un premier temps, leurs émissions. Pour cela, elles peuvent diminuer leur consommation d'énergie et leur utilisation de combustibles fossiles en développant des solutions alternatives à ces combustibles, telles que des carburants à faible intensité carbonique (Goulder et Nadreau 2002 ; Schrag 2007). Ensuite, s'il est impossible pour les industries de suffisamment réduire leurs émissions de GES, elles peuvent faire l'acquisition de droits d'émissions sur le marché et/ou les compenser à l'aide du système de crédits carbone compensatoires (MELCCFP 2018b). De tels crédits carbone peuvent provenir, entre autres, de l'évitement d'émissions de méthane des sites d'enfouissement et, éventuellement au Québec, de la capacité de séquestration du carbone des forêts (Robert et Saugier 2003 ; Ussiri et Lal 2005 ; Faubert *et al.* 2015). À ce titre, le reboisement des zones dégradées par les actions humaines, telles que les sites miniers, pourraient s'avérer prometteur, pour autant que davantage de recherches y soient consenties afin d'en préciser les effets (Goulder et Nadreau 2002 ; Boucher *et al.* 2012 ; Gagnon 2021).

1.2 Restauration de sites miniers

Depuis les années 1920, l'industrie minière est un secteur en plein développement au Québec qui représente un moteur économique important en créant des emplois et des richesses (Aubertin *et al.* 2002 ; MRNF 2019). Cependant, de nombreux enjeux sont associés à ce secteur. En effet, l'exploitation des gisements qui ne sont jamais constitués à 100 % de minerai d'intérêt entraîne un rejet de résidus inutilisables. Ces derniers se présentent sous différentes formes : stériles, boues ou résidus solides fins (Aubertin *et al.* 2002). Les résidus fins sont créés lorsque la portion du substrat exploité contenant le minerai d'intérêt est soumise à un processus de concentration visant à purifier le minerai (Aubertin *et al.* 2002). Les résidus sont ensuite disposés dans des parcs à résidus miniers (PARM) qui couvraient en 2002, au Québec, environ 13 000 ha (Aubertin *et al.* 2002). Cela représente de grands enjeux environnementaux car ces parcs génèrent des poussières aéroportées (érosion éolienne), un changement d'affectation des terres (les PARM remplaçant souvent des forêts productives) et une perte de biodiversité, tout en représentant un encadrement visuel problématique (Bridge 2004 ; Girard 2017). C'est pourquoi, en 1995, le gouvernement du Québec a modifié la Loi sur les mines en ajoutant un article afin que les compagnies d'exploitation minière déposent un plan de restauration de leur PARM et prévoient les fonds nécessaires à cette restauration (MERN 2022). Ainsi, à la fin de vie utile du parc, les industries doivent procéder à sa mise en végétation (MERN 2022). Cependant, les modalités de cette mise en végétation n'étant pas définies clairement, la majorité des industriels optent pour la solution la moins coûteuse qui représente donc le cours normal des affaires (CNA) : l'ensemencement d'espèces herbacées (Cooke et Johnson 2002). Toutefois, l'avènement récent des marchés du carbone et du système de plafonnement et d'échange de crédits compensatoires dans le cadre

de la WCI pousse certaines compagnies à dépasser le CNA et à opter pour des solutions présentant un plus grand avantage pour l'environnement et la lutte aux changements climatiques, par exemple en débutant la mise en végétation de leur PARM avant la fin de sa vie utile et en utilisant des espèces ligneuses. Cela permet un meilleur contrôle de l'érosion éolienne en formant une haie brise-vent, une amélioration de l'encadrement visuel et une augmentation de la séquestration de carbone et de la biodiversité (Ussiri et Lal 2005 ; Sheoran *et al.* 2010 ; Asensio *et al.* 2013 ; Mukaro *et al.* 2017). Par contre, une mise en végétation anthropique s'avère nécessaire. La régénération naturelle est, en effet, difficilement possible sur les sols miniers puisque, généralement, ces derniers sont pauvres en éléments nutritifs, contiennent très peu de matière organique et ont une capacité de rétention d'eau très faible (Daniels et Zipper 2010 ; Sheoran *et al.* 2010). C'est aussi pour ces raisons que les espèces ligneuses choisies pour la mise en végétation des PARM doivent être peu exigeantes sur les plans hydrique et nutritionnel. Les essences préférées pour reboiser les sites miniers sont celles retrouvées aux abords des mines, c'est-à-dire, les espèces ligneuses indigènes.

Les sites miniers restaurés diffèrent des forêts naturelles par leurs conditions édaphiques et parfois climatiques (Daniels et Zipper 2010 ; Sheoran *et al.* 2010). De plus, certains de ces sites ont une position septentrionale et se situent donc au-delà des zones forestières inventoriées. C'est pourquoi, bien qu'il existe des tables de rendement et des modèles faisant état de la productivité des forêts naturelles, peu de données existent concernant la productivité forestière sur des sites miniers restaurés. Or, si la croissance et le rendement ligneux de tels sites sont inconnus, il est difficile d'évaluer ce qu'ils peuvent séquestrer comme GES et, potentiellement, rapporter en tant que crédits compensatoires sur le marché du carbone. Ainsi, dans une optique de lutte aux changements climatiques, deux

minières québécoises, à savoir Niobec Inc. et ArcelorMittal Exploitation minière Canada s.e.n.c. (appelée simplement ArcelorMittal ci-après), ont fait appel à l'équipe de recherche de l'Université du Québec à Chicoutimi (UQAC) afin d'évaluer les bénéfices de la séquestration biologique du carbone et la faisabilité d'une mise en végétation de leurs PARM avec des espèces ligneuses. Cette initiative des deux minières permettra, au final, d'établir une stratégie de fermeture définitive de leurs PARM, tout en atténuant l'érosion éolienne et en réduisant les impacts visuel et environnemental des sites. L'équipe de recherche a donc fourni un ensemble de scénarios de restauration des PARM en prenant en compte le besoin de stabiliser les résidus à l'aide d'amendements organiques et de les reboiser avec des espèces herbacées et ligneuses.

1.3 Hypothèses et objectif du projet

Le présent projet est un projet de modélisation pour lequel les hypothèses de travail sont que les arbres d'une essence donnée croissant sur un PARM présenteront une croissance inférieure à celle des arbres de la même essence croissant sur un site naturel situé à proximité dudit PARM et que la croissance et le rendement ligneux seront différents pour chaque essence testée et pour chacun des PARM étudiés.

L'objectif de la présente étude est d'établir, pour la toute première fois pour ce type de sites, les courbes spécifiques de croissance¹ et de rendement² du pin gris (PIG ; *Pinus banksiana* Lamb.) et de l'épinette noire (EPN ; *Picea mariana* (Mill.) B.S.P.) sur trois PARM québécois restaurés, dont un appartient à Niobec Inc. et deux à ArcelorMittal. Les courbes

¹ Dans l'ensemble du présent document, le terme « croissance » renvoie à l'accroissement en volume total cumulé des arbres.

² Dans l'ensemble du présent document, le terme « rendement » renvoie au rendement – sous forme de volume marchand brut – des arbres. Sauf mention contraire, s'il s'agit d'un rendement de plantation, il est associé à une densité arborescente de 2 000 tiges×ha⁻¹.

de rendement ainsi établies serviront, dans le cadre d'une étude future, à modéliser le stockage de carbone à long terme sur ces trois mêmes sites, à l'aide du modèle du bilan du carbone du secteur forestier canadien (MBC-SFC3), les courbes de rendement ligneux étant le principal intrant de ce modèle (Kurz *et al.* 2009).

CHAPITRE 2

MATÉRIEL ET MÉTHODES

2.1 Sites d'étude

Afin d'atteindre les objectifs général et spécifique du présent projet, la végétation ligneuse présente sur les PARM et en périphérie de trois mines québécoises a été étudiée (figure 1).



Figure 1 : Localisation des trois sites d'étude par rapport à la limite territoriale des forêts attribuables entrée en vigueur le 1^{er} avril 2018 au Québec, Canada (tracé inspiré de MFFP 2016a). Les étoiles représentent les emplacements des sites d'étude et le trait vert foncé représente la limite territoriale des forêts attribuables. (Modifiée de Gaba 2009a, 2009b et de Sémhur 2010, sous licences CC BY-SA 4.0.)

2.1.1 Mine Niobec

La première mine à l'étude est celle appartenant à la compagnie Niobec Inc. Cette mine souterraine, de laquelle est extrait du niobium depuis 1976, se situe à Saint-Honoré (Saguenay-Lac-Saint-Jean, Québec, Canada – 48°32'05,1" N, 71°08'59,0" O). Elle est ainsi localisée en zone tempérée nordique, dans le domaine bioclimatique de la sapinière à bouleau jaune (sous-domaine de l'Est) (Morneau 2021). La région dans laquelle se trouve la mine Niobec possède une géologie particulière. En effet, alors que le bouclier canadien sur lequel elle se trouve est généralement composé de roches magmatiques et métamorphiques, cette mine est établie sur une partie d'un complexe d'environ 25 km², appelé le complexe alcalin de Saint-Honoré, qui est recouvert de calcaires ordoviciens (Brunette 2017). Au niveau de la mine Niobec, la température varie, en moyenne, entre - 3,0 °C et 8,6 °C pour une température annuelle moyenne de 2,8 °C (données récoltées à la station météorologique de Shipshaw entre 1966 et 1984³, Gouvernement du Canada 2022a). Les précipitations annuelles totales moyennes sont de 906,8 mm. Ces dernières tombent à 74,4 % sous forme de pluie (ce qui représente 674,7 mm) et à 25,6 % sous forme de neige (ce qui représente 232,1 mm). Le couvert de neige est généralement présent de la mi-novembre à la mi-avril et la saison de croissance⁴ dure, en moyenne, 159 jours.

³ Les données climatiques présentées dans ce document proviennent toutes de mesures réalisées entre 1966 et 1984 car cette période est la seule durant laquelle il est possible d'obtenir des données pour chacune des stations météorologiques situées près des sites d'étude.

⁴ Le concept de « saison de croissance » prend ici le sens décrit par Gérardin et McKenney (2001, p. 5). Ainsi, la saison de croissance débute « dès que la température quotidienne moyenne, pendant cinq journées consécutives après le 1^{er} mars, est égale ou supérieure à 5 °C. Elle se termine quand, à partir du 1^{er} août, la température quotidienne minimale est inférieure à - 2 °C ».

2.1.1.1 Parcs à résidus de la mine Niobec

À la mine Niobec, les résidus miniers générés par l'exploitation du niobium sont entreposés dans deux PARM recouvrant, actuellement, 77,4 ha du site. Ces résidus miniers légèrement alcalins ($\text{pH} = 7 - 8$) sont disposés afin de former des digues atteignant une hauteur totale de 30 m et présentant une pente de 15 % (Gagnon 2018). Une fois qu'une partie des PARM a atteint sa capacité maximale en hauteur, elle est recouverte d'une couche d'humus forestier de 10 cm d'épaisseur puisensemencée avec du trèfle blanc (*Trifolium repens* L.). Il est à noter que le sol utilisé dans ce processus de mise en végétation, qui représente le CNA de la mine Niobec, est l'humus forestier initialement présent à l'endroit où se trouvent maintenant les deux PARM. Il avait été retiré puis stocké par la minière avant la construction des parcs. À la mine Niobec, le sol est donc un Technosol composé de résidus calcaires (150 – 180 μm) et de sol forestier (IUSS Working Group 2015).

Sur les digues du PARM numéro un de la mine Niobec, dont la construction est terminée, des essais de mise en végétation avec des espèces ligneuses ont été effectués à petite échelle. En effet, deux plantations de PIG ont été réalisées par la Société sylvicole du Saguenay Ltée⁵. La première plantation, composée de 12 105 PIG répartis sur 8,1 ha (ce qui donne une densité d'environ 1 500 arbres $\times\text{ha}^{-1}$), a été mise en terre de manière progressive entre 1989 et 1994. Les plants de PIG alors utilisés provenaient de la pépinière Boucher localisée à Saint-Ambroise (Saguenay-Lac-Saint-Jean, Québec, Canada). La seconde plantation, datant quant à elle de 2004, est composée de 12 240 PIG répartis sur 5,5 ha (ce qui donne une densité d'environ 2 225 arbres $\times\text{ha}^{-1}$). Les plants de PIG utilisés provenaient,

⁵ La réalisation des deux plantations sur le PARM numéro un de la mine Niobec n'ayant pas été documentée, les informations présentées dans le texte sont les seules qui ont pu être récoltées auprès de la minière et de la Société sylvicole du Saguenay Ltée.

cette fois-ci, de la pépinière de Normandin localisée à Normandin (Saguenay-Lac-Saint-Jean, Québec, Canada). Les deux plantations décrites ci-dessus sont toutefois considérées comme une pratique exceptionnelle puisque, depuis 2004, la pratique courante de Niobec Inc. est devenue l'ensemencement des PARM avec du trèfle blanc.

2.1.1.2 Périphérie de la mine Niobec

Afin d'obtenir un comparatif fiable entre les conditions édaphiques des PARM de la mine Niobec et celles de sites naturels, trois plantations de PIG réalisées en forêt boréale et situées près de la mine ont été étudiées⁶ (figure 2). La première des trois plantations (PLP01) est localisée à Saint-David-de-Falardeau (Saguenay-Lac-Saint-Jean, Québec, Canada – 48°41'01,4" N, 71°12'37,9" O), à environ 20 km au nord de la mine Niobec, et date de 1985. Cette plantation de 15,3 ha possède une densité arborescente d'environ 2 600 PIG×ha⁻¹. La seconde plantation (PLP03) est située, quant à elle, aux Passes-Dangereuses (Saguenay-Lac-Saint-Jean, Québec, Canada – 48°56'57,8" N, 71°42'30,5" O), à environ 60 km au nord-ouest de la mine Niobec. Cette plantation, datant de 1991, possède une superficie de 10,5 ha et une densité d'environ 3 750 PIG×ha⁻¹. Enfin, la troisième plantation (PLP04), également localisée aux Passes-Dangereuses (48°50'59,1" N, 71°44'12,0" O), a été mise en terre en 1989. Située à environ 55 km au nord-ouest de la mine Niobec, elle présente une superficie de 53,3 ha et une densité de 2 650 PIG×ha⁻¹.

⁶ L'ensemble des données concernant les trois plantations mises en terre sur des sites naturels près de la mine Niobec a été récolté et analysé par Charles-Augustin Déry Bouchard et est présenté dans Déry Bouchard 2014.

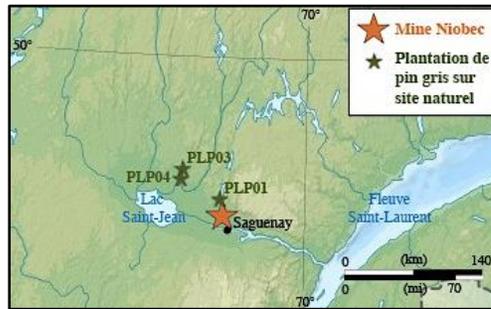


Figure 2 : Emplacement des trois plantations de pin gris (*Pinus banksiana* Lamb.) mises en terre sur des sites naturels près de la mine Niobec (voir étoiles de couleur verte) et utilisées comme comparatif édaphique pour le parc à résidus de cette mine. (Modifiée de Gaba 2009a, sous licence CC BY-SA 4.0.)

2.1.2 Mine de Mont-Wright

La seconde mine à l'étude appartient à la compagnie ArcelorMittal. Cette mine à ciel ouvert, de laquelle est extrait du fer depuis 1974, se situe à Fermont (Côte-Nord, Québec, Canada – 52°48'17,8" N, 67°21'29,0" O). Elle est ainsi localisée au-delà de la limite nordique des forêts attribuables, en zone boréale, à la jonction entre les domaines bioclimatiques de la pessière à mousses et de la pessière à lichens (Morneau 2021). À la mine de Mont-Wright et dans ses alentours, la température varie, en moyenne, entre - 8,5 °C et 1,6 °C (données récoltées à la station météorologique de Wabush⁷ entre 1966 et 1984, Gouvernement du Canada 2022b). La température annuelle moyenne et les précipitations annuelles moyennes sous forme de pluie y sont, respectivement, de - 3,5 °C et de 488,7 mm. La saison de croissance dure, en moyenne, 118 jours.

⁷ Les données climatiques présentées pour la mine de Mont-Wright sont celles récoltées à la station météorologique de Wabush (Terre-Neuve-et-Labrador, Canada), située à environ 35 km au nord-est de la mine, car celle de Fermont ne présentait pas de données climatiques pour les années couvertes par les stations météorologiques près des deux autres sites d'étude. La température et les précipitations sous forme de pluie sont similaires à Fermont et à Wabush. Par contre, les précipitations sous forme de neige sont différentes. C'est pourquoi, elles ne sont pas présentées dans le texte.

2.1.2.1 Parc à résidus de la mine de Mont-Wright

Les résidus miniers générés par l'exploitation de fer à la mine de Mont-Wright sont neutres (pH = 6,9) (Juge et Cossette 2015a). Ils sont entreposés dans un PARM qui recouvre, actuellement, une superficie de plus de 1 500 ha. Le sol de ce parc est un Technosol principalement composé de silice (IUSS Working Group 2015). Depuis 2010, l'entreprise Irrigation Norco Inc. remet en végétation les zones inactives, c'est-à-dire les zones stabilisées, du PARM de la mine de Mont-Wright. Pour cela, l'entreprise utilise un mélange de foin, de fumier de poulet et d'espèces herbacées adaptées à la région dans laquelle se trouve la mine (Juge et Cossette 2015b). Ce procédé, dit « procédé Norco », est le CNA de la mine de Mont-Wright.

Sur le PARM de cette mine, il n'y a pas eu d'effort de mise en végétation avec des espèces ligneuses à proprement parler. Les seuls arbres plantés sur ce parc font partie de dispositifs expérimentaux mis en place en 2015 par une équipe de recherche de l'UQAC. Il n'y a donc, pour le moment, pas d'indicateur quant à la survie et à la croissance des espèces ligneuses sur ce site. Ainsi, aucun arbre présent sur le PARM de la mine de Mont-Wright n'a été analysé dans le cadre de cette étude.

2.1.2.2 Périphérie de la mine de Mont-Wright

Afin de modéliser la croissance et le rendement potentiels d'arbres plantés sur le PARM de la mine de Mont-Wright, il a été nécessaire d'étudier les arbres présents sur les sites naturels en périphérie de ce dernier. Ces arbres ont, en effet, permis de déterminer l'impact qu'avaient les conditions climatiques locales sur la croissance et le rendement ligneux. Il est à noter que la région dans laquelle se trouve la mine de Mont-Wright est située

au-delà de la limite territoriale des forêts attribuables et qu'il n'existe, par conséquent, aucune plantation aux abords du PARM de cette mine. Ce sont donc les EPN naturelles, présentes en grande majorité dans les peuplements naturels adjacents à la mine de Mont-Wright (96 % des arbres composant ces peuplements sont des EPN), qui ont été étudiées.

2.1.3 Ancienne mine du Lac Jeannine

Toujours dans le but de modéliser la croissance et le rendement potentiels d'arbres plantés sur le PARM de la mine de Mont-Wright, il s'est avéré judicieux d'étudier les EPN établies sur et aux abords du PARM d'une autre mine de fer présentant des résidus similaires à ceux générés par l'exploitation de la mine de Mont-Wright. Cette étude a été essentielle afin de déterminer l'impact des conditions édaphiques du PARM de la mine de Mont-Wright sur la croissance et le rendement ligneux, ce que ne permettait pas de faire la trop récente plantation expérimentale établie par une équipe de recherche de l'UQAC en 2015. C'est pourquoi, le troisième site d'étude est l'ancienne mine du Lac Jeannine.

Cette ancienne mine à ciel ouvert de laquelle était extrait du fer entre 1961 et 1976, appartenait à la Compagnie minière Québec Cartier Ltée (aujourd'hui appelée ArcelorMittal Exploitation minière Canada s.e.n.c.). Elle est située en périphérie de l'ancienne ville de Gagnon (Côte-Nord, Québec, Canada – 51°50'36,0" N, 68°04'05,5" O), en zone boréale, dans le domaine bioclimatique de la pessière à mousses (sous-domaine de l'Est) (Morneau 2021). L'ancienne mine du Lac Jeannine se trouve près de la limite territoriale des forêts attribuables, à environ 150 km au sud-ouest de la mine de Mont-Wright. À l'ancienne mine du Lac Jeannine et dans ses alentours, la température varie, en moyenne, entre - 7,2 °C et 2,4 °C pour une température annuelle moyenne de - 2,4 °C (données récoltées à la station

météorologique de Gagnon entre 1966 et 1984, Gouvernement du Canada 2022c). Les précipitations annuelles totales moyennes sont de 1 092,2 mm. Ces dernières tombent, à 57,7 % sous forme de pluie (ce qui représente 629,8 mm) et, à 42,3 % sous forme de neige (ce qui représente 462,4 mm). Le couvert de neige est généralement présent de la fin octobre à la mi-mai. En moyenne, la saison de croissance dure 116 jours.

2.1.3.1 Parc à résidus de l'ancienne mine du Lac Jeannine

Les résidus miniers entreposés dans le PARM de 650 ha de l'ancienne mine du Lac Jeannine sont neutres (pH = 7,2) (Lamontagne 2016). Comme à la mine de Mont-Wright, ces résidus ont été générés par l'exploitation du fer et le sol du PARM est un Technosol principalement composé de silice (IUSS Working Group). Lorsque la mine du Lac Jeannine était active, la Loi sur les mines n'obligeait pas encore les industriels à restaurer leur PARM en fin de vie utile. Il n'existe donc pas de CNA quant à la mise en végétation du PARM de l'ancienne mine du Lac Jeannine. Quelques essais de végétalisation à petite échelle ont tout de même été réalisés par la compagnie minière Québec Cartier Ltée entre 1976 et 1999 (Hydrosemence de l'Estrie 1980 ; Gambles 2011).

Dans le cadre du présent projet, ce sont les EPN et les PIG d'un de ces essais de mise en végétation du PARM de l'ancienne mine du Lac Jeannine, effectué en juin 1980, qui ont été étudiés. Pour réaliser cet essai, un mélange de semences nommé « polar 80*2 »⁸, du paillis Verdiol standard éprouvé en laboratoire ainsi que de l'engrais 15-28-15⁹ ont tout d'abord été

⁸ Le mélange de semences « polar 80*2 » épandu, à raison de 110,8 kg×ha⁻¹, sur 37 ha de résidus de l'ancienne mine du Lac Jeannine comportait les espèces herbacées suivantes : de la coronille bigarrée (*Securigera varia*), du sainfoin (*Onobrychis* sp.), du mélilot blanc (*Melilotus albus*), de l'agropyre à crête (*Agropyron cristatum*), des fétuques (*Festuca* sp.), des fleurs sauvages, du seigle d'automne (*Secale cereale* L.) et de l'élyme de Russie (*Psathyrostachys juncea* (Fisch.) Nevski) (Hydrosemence de l'Estrie 1980).

⁹ L'engrais 15-28-15 épandu, à raison de 658 kg×ha⁻¹, sur 37 ha de résidus de l'ancienne mine du Lac Jeannine était composé de sel d'Epsom, de sulfate de cuivre, de sulfate de zinc, de borax, de sulfate de magnésium, de molybdate de sodium et de sulfate d'aluminium (Hydrosemence de l'Estrie 1980).

épanchés sur 37 ha de résidus (Hydrosemence de l'Estrie 1980). Puis, une centaine d'arbres, à savoir des aulnes rugueux (*Alnus incana* subsp. *rugosa* (Du Roi) J. Clausen), des bouleaux glanduleux (*Betula glandulosa* Michx.), des EPN, des mélèzes laricins (*Larix laricina* (Du Roi) K. Koch), des PIG et des saules (*Salix* sp.), ont été transplantés dans une zone de 0,1 ha comportant l'épandage décrit précédemment (Hydrosemence de l'Estrie 1980 ; Gambles 2011). La plupart de ces arbres provenaient de la forêt environnante.

Comme expliqué auparavant, l'étude des EPN plantées sur le PARM de l'ancienne mine du Lac Jeannine a servi à modéliser la croissance et le rendement potentiels d'EPN plantées sur le PARM de la mine de Mont-Wright. L'étude des PIG plantés sur le PARM de l'ancienne mine du Lac Jeannine a, quant à elle, servi à comparer la croissance ligneuse des plantations présentes sur les PARM des mines Niobec et du Lac Jeannine.

2.1.3.2 Périphérie de l'ancienne mine du Lac Jeannine

Afin d'obtenir un comparatif fiable entre les conditions édaphiques du PARM de l'ancienne mine du Lac Jeannine et celles de sites naturels, la végétation ligneuse située en périphérie du parc a été étudiée. Dans le but de ne pas introduire un biais dans le calcul de la croissance et du rendement ligneux potentiels de plantations sur le PARM de la mine de Mont-Wright, il était nécessaire d'avoir une approche similaire à celle réalisée pour les sites naturels près de ce dernier. C'est pourquoi, les EPN et les PIG étudiés en périphérie de l'ancienne mine du Lac Jeannine étaient issus d'un peuplement naturel.

2.2 Échantillonnage

2.2.1 Délimitation des placettes d'étude

Afin de réaliser l'échantillonnage, une placette circulaire de 400 m² a été définie dans une partie représentative de chacun des peuplements composant les sites d'étude. Ainsi, concernant les plantations présentes sur les PARM étudiés, une placette a été délimitée dans la plantation de 1989 – 1994 du PARM numéro un de la mine Niobec, une autre a été délimitée dans la plantation de 2004 de ce même PARM et une dernière a été délimitée dans la plantation de 1980 du PARM de l'ancienne mine du Lac Jeannine. Pour ce qui en est des plantations présentes près de la mine Niobec, à savoir PLP01, PLP03 et PLP04, les données récoltées à l'intérieur d'une placette définie dans chacune des plantations ont été utilisées. Enfin, l'emplacement des placettes délimitées dans les peuplements naturels adjacents aux PARM des mines de Mont-Wright et du Lac Jeannine a été choisi selon certains critères. Premièrement, les placettes devaient être définies dans un peuplement mature et équilibré établi sur une pente peu abrupte (c'est-à-dire présentant une inclinaison de moins de 15 %). Ce premier critère a permis de prédire à quoi pourront ressembler les vieilles plantations sur les PARM bien que les arbres présents sur les sites adjacents à ces parcs soient issus de peuplements régénérés naturellement. D'ailleurs, dans le reste du présent document, ces peuplements seront considérés comme des « analogues de plantations ». Deuxièmement, en plus de devoir être représentatives de l'environnement immédiat des mines, les placettes devaient être composées des espèces ligneuses principalement visées dans la mise en végétation des PARM des mines de Mont-Wright et du Lac Jeannine. Autrement dit, les placettes en périphérie de la mine située près de Fermont devaient être définies dans des

peuplements composés principalement d'EPN tandis que celle en périphérie de l'ancienne mine du Lac Jeannine devait être définie dans un site comportant de l'EPN et du PIG. Aux abords du PARM de la mine de Mont-Wright, plusieurs peuplements d'EPN différents ont été observés. C'est pourquoi, afin de caractériser au mieux la périphérie de cette mine, deux placettes ont été circonscrites près du PARM. La première (nommée MW1) a été définie au nord-est du PARM tandis que la seconde (nommée MW2) a été définie au sud-ouest du parc. Concernant le peuplement en périphérie de l'ancienne mine du Lac Jeannine, une seule placette (nommée LJ-Nat) comprenant de l'EPN et du PIG a été délimitée.

2.2.2 Caractérisation des placettes d'étude

Une fois les placettes d'étude définies, leur topographie, leur sol et leur végétation ont été caractérisés à l'aide de différents relevés réalisés conformément au point d'observation écologique (Saucier *et al.* 1994). Le relevé topographique a permis de recueillir les informations générales sur l'emplacement des placettes et de décrire la topographie des terrains sur lesquels sont établis les peuplements étudiés. Le relevé édaphique a, quant à lui, permis de déterminer le type de sol dans lequel la végétation constituant chaque peuplement étudié est enracinée. Pour le réaliser, un pèdon de 1 m³ creusé au centre de chacune des placettes a été observé. Enfin, le relevé de végétation a permis d'identifier les espèces végétales présentes dans tous les étages ligneux et non ligneux des placettes d'étude, ainsi que d'évaluer le recouvrement de chacune de ces espèces. Afin d'effectuer ce relevé, trois sous-placettes de 1 m² ont été réparties systématiquement à l'intérieur des placettes.

Pour compléter les données d'inventaire, la végétation ligneuse composant les peuplements étudiés a été caractérisées plus précisément. Pour ce faire, l'espèce, la hauteur

et le diamètre à hauteur de poitrine (DHP ; soit le diamètre d'un arbre mesuré à 1,3 m au-dessus du niveau du sol) de chacune des tiges ligneuses incluses dans les placettes ont été mesurés à l'aide, respectivement, d'un hypsomètre (modèle Vertex IV de Haglöf Sweden®) et d'un galon circonférentiel (de Lufkin®). Toutes les tiges de chacune des essences présentes dans les placettes ont également été dénombrées, afin de calculer la densité des peuplements étudiés grâce à l'équation 1.

$$\rho = \frac{N}{S} \quad (1)$$

où, ρ = densité du peuplement (en tiges×ha⁻¹),

N = nombre de tiges dénombrées dans la placette,

S = superficie de la placette (en ha ; soit, ici, 0,04).

Les principales caractéristiques des placettes définies sur les PARM des mines Niobec et du Lac Jeannine sont présentées dans le tableau 1, tandis que celles des placettes délimitées dans les peuplements en périphérie des trois mines à l'étude sont présentées dans le tableau 2.

Tableau 1 : Principales caractéristiques des placettes de 400 m² délimitées et échantillonnées dans les plantations étudiées sur les parcs à résidus miniers des mines Niobec et du Lac Jeannine

		Parc à résidus numéro un de la mine Niobec		Parc à résidus de la mine du Lac Jeannine
		Plantation de 1989 – 1994	Plantation de 2004	Plantation de 1980
Caractéristiques topographiques de la placette	Coordonnées GPS	48°31'47,2" N, 71°09'18,9" O	48°31'49,4" N, 71°09'16,1" O	51°50'34,0" N, 68°04'39,1" O
	Altitude	132 m	135 m	555 m
	Inclinaison et forme de la pente	15 % Régulière	15 % Régulière	15 % Régulière
	Orientation	Sud-ouest	Sud-ouest	Ouest
Caractéristiques de la végétation présente dans la placette au moment de l'échantillonnage	Essence(s) étudiée(s)	PIG [†]	PIG [†]	EPN [†] PIG [†]
	Âge de la plantation	23 – 28 ans	13 ans	38 ans
	Hauteur moyenne de la végétation ligneuse (± écart-type)	11,6 m (± 0,4 m)	6,0 m (± 0,2 m)	EPN [†] : 3,5 m (± 1,0 m) PIG [†] : 7,0 m (± 0,6 m)
	DHP* moyen de la végétation ligneuse (± écart-type)	14,9 cm (± 0,7 cm)	9,1 cm (± 1,2 cm)	EPN [†] : 4,6 cm (± 1,9 cm) PIG [†] : 14,1 cm (± 1,9 cm)
	Densité du peuplement	Environ 1 500 tiges×ha ⁻¹	Environ 2 250 tiges×ha ⁻¹	Moins de 1 000 tiges×ha ⁻¹
	Espèce(s) non ligneuse(s) principalement présente(s)	Trèfle blanc (<i>Trifolium repens</i>)	Trèfle blanc (<i>Trifolium repens</i>)	Hypne cyprès (<i>Hypnum cupressiforme</i>) Hypne cimier (<i>Ptilium crista-castrensis</i>)
Caractéristiques du sol de la placette	Type d'humus	Mor (en développement)	Mor (en développement)	Mor (en développement)
	Pierrosité	0 %	0 %	0 %
	Drainage	Bon	Bon	Bon à rapide

* Le diamètre à hauteur de poitrine (DHP) correspond au diamètre de l'arbre mesuré à 1,3 m au-dessus du sol.

† EPN = épinette noire (*Picea mariana* (Mill.) B.S.P.) ; PIG = pin gris (*Pinus banksiana* Lamb.).

Tableau 2 : Principales caractéristiques des placettes de 400 m² délimitées et échantillonnées dans les peuplements situés en périphérie des mines Niobec, de Mont-Wright et du Lac Jeannine

			Périphérie de la mine Niobec*			Périphérie de la mine du Mont-Wright		Périphérie de la mine du Lac Jeannine
			PLP01	PLP03	PLP04	MW1	MW2	LJ-Nat
Caractéristiques topographiques de la placette	Coordonnées GPS	N	48°41'01"	48°56'58"	48°50'59"	52°48'45"	52°47'34"	51°49'47"
		O	71°12'38"	71°42'31"	71°44'12"	67°18'53"	67°24'58"	68°04'05"
	Altitude		195 m	170 m	165 m	684 m	627 m	526 m
	Inclinaison et forme de la pente		0 % –	0 % –	0 % –	5 % Régulière	12 % Régulière	7 % Irrégulière
	Orientation		–	–	–	Sud-ouest	Sud-ouest	Nord-est
Caractéristiques de la végétation présente dans la placette au moment de l'échantillonnage	Essence(s)		100 % PIG†	100 % PIG†	100 % PIG†	98 % EPN† 2 % MEL†	100 % EPN†	74 % EPN† 26 % PIG†
	Âge du peuplement		27 ans	21 ans	23 ans	Au moins 141 ans	Au moins 171 ans	58 ans
	Hauteur moyenne de la végétation ligneuse (± écart-type)		11,8 m (± 0,5 m)	6,7 m (± 0,6 m)	7,0 m (± 0,6 m)	EPN† : 6,9 m (± 2,5 m) MEL† : 6,8 m (± 1,0 m)	9,0 m (± 3,1 m)	EPN† : 5,9 m (± 1,9 m) PIG† : 6,5 m (± 3,5 m)
	DHP‡ moyen de la végétation ligneuse (± écart-type)		13,5 cm (± 0,4 cm)	6,9 cm (± 0,5 cm)	7,6 cm (± 0,6 cm)	EPN† : 8,7 cm (± 3,7 cm) MEL† : 10,9 cm (± 6,0 cm)	10,2 cm (± 4,2 cm)	EPN† : 7,3 cm (± 3,1 cm) PIG† : 10,4 cm (± 8,7 cm)
	Densité du peuplement		2 600 tiges×ha ⁻¹	3 750 tiges×ha ⁻¹	2 650 tiges×ha ⁻¹	2 750 tiges×ha ⁻¹	3 825 tiges×ha ⁻¹	1 625 tiges×ha ⁻¹
	Type de peuplement		Plantation de PIG†	Plantation de PIG†	Plantation de PIG†	Pessière noire à mousses et éricacées	Pessière noire à mousses et éricacées	Pessière noire à lichens avec PIG†
Caractéristiques du sol de la placette	Type de dépôt		Épandage	Delta fluvio-glaciaire	Delta fluvio-glaciaire	Till d'ablation	Till	Moraine de Rogen
	Type d'humus		Mor	Sol organique	Sol organique	Mor	Mor	Mor
	Pierrosité et sa distribution		0 % –	2 % –	2 % –	60 % Uniforme	60 % Uniforme	50 % Uniforme
	Profondeur d'enracinement		–	–	–	76 cm	50 cm	30 cm
	Drainage		Bon	Modéré	Bon	Imparfait	Imparfait	Bon

* Les données présentées pour les plantations situées près de la mine Niobec proviennent de Déry Bouchard 2014 ou de MFFP 2017. Les informations manquantes n'ont été trouvées dans aucune des deux sources.

† EPN = épinette noire (*Picea mariana* (Mill.) B.S.P.) ; MEL = mélèze laricin (*Larix laricina* (Du Roi) K. Koch) ; PIG = pin gris (*Pinus banksiana* Lamb.).

‡ Le diamètre à hauteur de poitrine (DHP) correspond au diamètre de l'arbre mesuré à 1,3 m au-dessus du sol.

2.2.3 Sélection des arbres-études

Dans le but d'évaluer le potentiel de croissance ligneuse des sites d'étude, trois arbres dominants¹⁰ par placette ont été sélectionnés pour être échantillonnés et analysés. Afin d'améliorer la puissance des tests statistiques effectués sur les données obtenues pour les arbres se trouvant sur le PARM de l'ancienne mine du Lac Jeannine et sur le site naturel à proximité de cette dernière, un quatrième PIG dominant et une quatrième EPN dominante ont été échantillonnés sur ces deux sites puis analysés. La sélection de l'ensemble des arbres dominants s'est faite grâce aux données de hauteur récoltées lors de l'inventaire de la végétation ligneuse décrit précédemment.

En plus de répondre au but énoncé ci-dessus, le fait de choisir les arbres dominants dans chacune des parcelles a permis d'éviter la sélection de tiges ayant subi de la compétition, notamment dans les peuplements naturels analogues de plantations. Ce critère a été important afin de limiter les différences de croissance pouvant exister entre les arbres issus d'une plantation et ceux issus d'une régénération naturelle. Sur les sites échantillonnés en périphérie des mines de Mont-Wright et du Lac Jeannine, il a ainsi été possible de simuler la croissance et le rendement d'éventuelles plantations à partir des données des individus ligneux ayant germé naturellement. De plus, les arbres qui seront éventuellement plantés sur les PARM en vue de la mise en végétation totale de ces derniers, ne subiront, normalement, aucune compétition significative. Leur croissance et leur rendement ne devaient donc pas être modélisés à partir d'arbres en ayant subi.

¹⁰ L'expression « arbre dominant » prend ici le sens décrit par le MFFP (2016b, p. 68). Ainsi, un arbre dominant est un « arbre dont le houppier vivant dépasse visiblement l'espace occupé par ceux des codominants. Au moins une partie de son houppier vivant dépasse la hauteur la plus fréquente de la canopée. Généralement, les dominants sont peu nombreux (maximum 4 ou 5 par placette). Les vétérans sont exclus de cette classe (si leur recouvrement cumulé ne dépasse pas 25 % du couvert de la canopée du peuplement). »

Il est à noter que pour être choisis, les arbres-études devaient également répondre aux autres critères de sélection connus pour cette méthode, à savoir qu'ils ne devaient présenter qu'une seule tige, aucune réduction évidente du feuillage, aucune décomposition et aucun signe de suppression de la croissance juvénile (MFFP 2016b).

2.2.4 Échantillonnage des arbres-études

Une fois choisis, les arbres-études de chaque placette du projet ont été abattus et ébranchés. Puis, des rondelles ont été prélevées dans leur tige selon le modèle illustré par la figure 3.

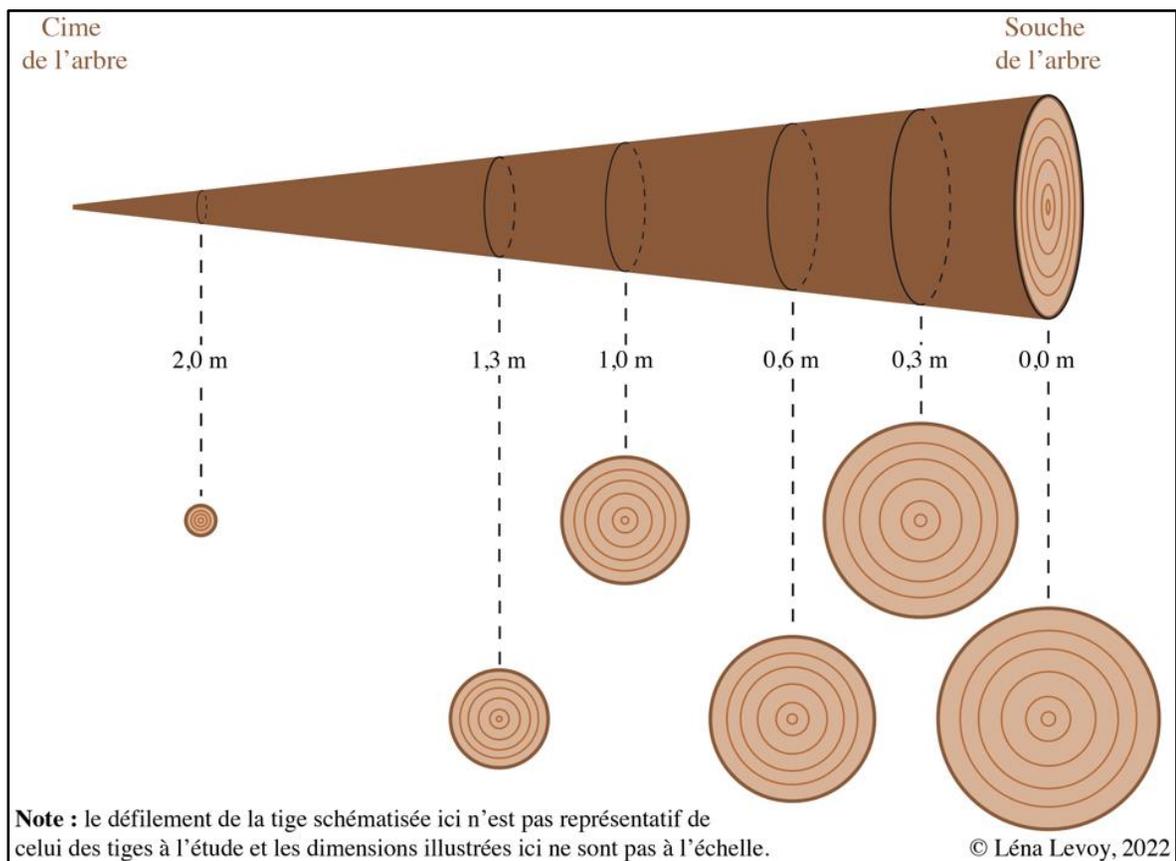


Figure 3 : Représentation schématique de la méthode de prélèvement des rondelles d'un arbre abattu et ébranché. À partir de la souche de l'arbre (0,0 m), une rondelle a été récoltée à tous les mètres ainsi qu'à 0,3, 0,6 et 1,3 m.

2.3 Modélisation de la croissance et du rendement ligneux

2.3.1 Estimation de la croissance ligneuse

À l'exception du PARM de la mine de Mont-Wright (voir section 2.3.1.3), l'analyse de la croissance ligneuse sur les différents sites d'étude était basée sur la méthode reconnue pour les analyses de tige (Pardé et Bouchon 1988 ; Mailly et Gaudreault 2005).

2.3.1.1 Analyses de tige des arbres-études

Afin de réaliser ces dernières, les rondelles prélevées dans la tige de chacun des arbres-études ont, dans un premier temps, été entreposées dans les serres de l'UQAC jusqu'à ce qu'elles soient complètement sèches. Elles ont ensuite été sablées successivement à l'aide de papiers sablés de différents grains, soit 80, 220 puis 400 grains \times po⁻², pour qu'il soit possible de distinguer clairement les cernes de croissance. Différents rayons ont ensuite été tracés sur la surface sablée de chacune d'entre elles. Sur les rondelles récoltées entre 0,0 et 1,0 m de hauteur dans les tiges des arbres-études, quatre rayons ont été dessinés de manière à former des angles d'approximativement 90°. Sur celles récoltées à partir de 1,3 m de hauteur, seuls deux rayons ont été tracés. Ces derniers étaient opposés et formaient donc un angle de 180°. Les rondelles ont ensuite été observées sous une loupe binoculaire afin de dénombrer et de dater les cernes de croissance présents sur chacune d'entre elles. La datation des cernes a été possible puisque l'année du dernier cerne complet était connue. Elle correspondait, en effet, à l'année précédent celle à laquelle les arbres-études avaient été abattus.

La largeur de chacun des cernes de croissance présents sur les rondelles ainsi préparées a, ensuite, été mesurée le long de chacun des rayons tracés. Lorsque les cernes étaient clairement définis, cette étape a été réalisée à l'aide du logiciel WinDENDRO™, version 2005a (Regent Instruments Inc., Guay *et al.* 1992) couplé à un scanner. Lorsque les cernes étaient plus difficiles à distinguer, leur largeur a été mesurée à l'aide du logiciel TSAP-Win™, version 0.55 (Rinntech Inc., Rinntech Inc. 2013a) couplé à un LinTab™ (Rinntech Inc., Rinntech Inc. 2013b). Afin de limiter les possibles erreurs de datation dues, notamment, aux cernes absents ou discontinus, le programme COFECHA (Holmes 1983) a été utilisé pour valider statistiquement les données. Ce dernier a, en effet, permis d'évaluer si les mesures annuelles obtenues pour les rayons d'une même rondelle, pour les rondelles d'un même arbre et pour les arbres d'une même espèce issus de la même placette, étaient bien corrélées entre elles. Des corrections ont été apportées lorsque cela était nécessaire.

2.3.1.2 Construction des courbes de croissance ligneuse

Une fois l'interdatation des données vérifiée, le logiciel WinSTEM™, version 2005a (Regent Instruments Inc., Regent Instruments Inc. 2003) a été utilisé. Ce dernier permet de calculer différentes variables à partir de la largeur moyenne et de l'âge de chaque cerne de croissance observé sur les rondelles analysées. Dans le cadre de la présente étude, la variable retenue pour illustrer la croissance ligneuse des sites d'étude était le volume cumulé des arbres (exprimé en dm^3) en fonction du temps. Afin de le déterminer, WinSTEM™ a d'abord calculé le volume de chaque cône de tige tronqué se trouvant entre deux rondelles consécutives récoltées dans un arbre (équation 2) (Regent Instruments Inc. 2003). Il a ensuite

calculé la somme de tous les cônes de tige tronqués appartenant à cet arbre (équation 3) (Regent Instruments Inc. 2003).

$$V_{\text{cône tronqué}} = \frac{\pi \times H \times (R_a^2 + R_a \times R_b + R_b^2)}{3} \quad (2)$$

où, $V_{\text{cône tronqué}}$ = volume d'un cône de tige tronqué (en m³),

H = hauteur du tronc de cône de tige tronqué (en m),

R_a = rayon de la rondelle la plus large (en mm),

R_b = rayon de la rondelle la moins large (en mm).

$$V_{\text{arbre}} = \sum \left(\frac{V_{\text{cône tronqué}}}{1000} \right) \quad (3)$$

où, V_{arbre} = volume d'un arbre (en dm³),

$V_{\text{cône tronqué}}$ = volume d'un cône de tige tronqué (en m³).

À l'aide de ces données, une courbe montrant le potentiel de croissance ligneuse de chacun des sites d'étude, à l'exception du PARM de la mine de Mont-Wright, a ensuite été construite. Cette courbe représente le volume cumulé moyen des arbres-études du site (en dm³) en fonction de l'âge cambial (en années).

2.3.1.3 Modélisation de la croissance ligneuse sur le parc à résidus de la mine de Mont-Wright

Enfin, il a été nécessaire de modéliser la croissance ligneuse qu'une éventuelle plantation d'EPN donnerait sur le PARM de la mine de Mont-Wright. En effet, comme aucun arbre présent sur ce parc n'a pu être analysé dans le cadre de cette étude (les seuls arbres plantés en 2015 étant trop jeunes), la croissance ligneuse n'a pas pu être estimée par la

méthode reconnue pour les analyses de tige. La prédiction du volume potentiel de ce peuplement a ainsi nécessité l'utilisation de l'équation 4 et des postulats 1 et 2.

(Postulat 1) Le ratio de croissance entre les arbres croissant sur un PARM donné et ceux croissant à proximité est, pour une même espèce, représentatif de l'effet du substrat offert par le PARM (effet édaphique) sur la croissance ligneuse.

(Postulat 2) Le ratio de croissance entre les arbres d'une même espèce se développant naturellement sur des sites forestiers éloignés, mais comparables sur le plan édaphique, est représentatif de l'effet de la différence de climat entre les deux localités sur la croissance ligneuse.

$$V_{\text{arbre PARM-MW ; \hat{a}ge cambial}} = V_{\text{arbre NAT-MW ; \hat{a}ge cambial}} \times \frac{V_{\text{arbre PARM-LJ ; \hat{a}ge cambial}}}{V_{\text{arbre NAT-LJ ; \hat{a}ge cambial}}} \quad (4)$$

où, $V_{\text{arbre PARM-MW ; \hat{a}ge cambial}}$ = volume d'une EPN plantée sur le parc à résidus de la mine de Mont-Wright (en dm³) pour un âge cambial donné (par pas de 1 an entre 1 et 29 ans),

$V_{\text{arbre NAT-MW ; \hat{a}ge cambial}}$ = volume d'une EPN faisant partie des peuplements analogues de plantations étudiés près de la mine de Mont-Wright (en dm³) pour un âge cambial donné,

$V_{\text{arbre PARM-LJ ; \hat{a}ge cambial}}$ = volume d'une EPN plantée sur le parc à résidus de l'ancienne mine du Lac Jeannine (en dm³) pour un âge cambial donné,

$V_{\text{arbre NAT-LJ ; \hat{a}ge cambial}}$ = volume d'une EPN faisant partie du peuplement analogue de plantation étudié près de l'ancienne mine du Lac Jeannine (en dm³) pour un âge cambial donné.

Selon le postulat 1, le ratio $\frac{V_{\text{arbre PARM-LJ ; \hat{a}ge cambial}}}{V_{\text{arbre NAT-LJ ; \hat{a}ge cambial}}}$ représente le facteur de

correction édaphique affectant la croissance des EPN plantées sur les PARM de l'ancienne mine du Lac Jeannine et de la mine de Mont-Wright pour un âge cambial donné.

2.3.2 Modélisation du rendement ligneux

La modélisation des courbes de rendement des éventuels arbres plantés sur les sites d'étude lors d'un futur reboisement de ces derniers, nécessaires pour prédire le stockage de carbone à long terme sur ces sites, a été réalisée à partir de la mise à jour des tables de rendement du manuel d'aménagement forestier (MRN 2000). Pour obtenir le rendement des

éventuels PIG plantés, la table de rendement du Ministère des Ressources naturelles (MRN) utilisée était celle des PIG en plantations. Dans cette table, le volume marchand brut (VMB ; exprimé en $m^3 \times ha^{-1}$) des peuplements de PIG a été projeté à partir des données de Bolghari et Bertrand (1984) lorsque les peuplements étaient âgés de 20 à 40 ans et approximé à partir des données de Pothier et Savard (1998) lorsqu'ils étaient âgés de 45 à 140 ans. Pour obtenir le rendement des éventuelles EPN plantées, la table de rendement du MRN utilisée était celle des EPN en plantations. Dans cette dernière, le VMB des peuplements d'EPN a été modélisé à partir des données de Prégent *et al.* (1996) lorsque les peuplements étaient âgés de 20 à 35 ans et approximé à partir des données de Pothier et Savard (1998) lorsqu'ils étaient âgés de 40 à 200 ans. Ainsi, que ce soit pour les PIG ou les EPN en plantations, l'approximation réalisée pour mettre à jour les tables de rendement utilisées était basée sur les données d'arbres issus d'une régénération naturelle comme imposé par l'usage des travaux de Pothier et Savard (1998).

2.3.2.1 Détermination de l'indice de qualité de station des sites d'étude à 50 ans

Afin de pouvoir utiliser les tables de rendement décrites précédemment, il a fallu, dans un premier temps, quantifier la productivité des sites d'étude en calculant un indice de qualité de station pour chacun d'entre eux. Habituellement, cet indice correspond à la hauteur moyenne que les arbres dominants d'un peuplement sont capables d'atteindre à 15 ans (IQS 15) pour les PIG en plantations et à 25 ans (IQS 25) pour les EPN en plantations. Or, comme expliqué antérieurement, les tables de rendement mises à jour pour les PIG et les EPN en plantations ont été construites, en partie, à l'aide de données récoltées sur des arbres issus d'une régénération naturelle. Il a donc été possible de se servir de ces tables en utilisant

l'indice de qualité de station à 50 ans (IQS 50), qui est généralement calculé afin de déterminer le rendement d'arbres naturels. Cet indice correspond à la hauteur moyenne que les arbres dominants d'un peuplement peuvent atteindre à 50 ans et a été obtenu à partir de l'équation 5 et du tableau 3 (Pothier et Savard 1998).

$$IQS\ 50 = b_1 \times H^{b_2} \times (1 - e^{-b_3 \times A_c})^{b_4} \times H^{-b_5} \quad (5)$$

où, IQS 50 = indice de qualité de station d'un peuplement à 50 ans (en m),
H = hauteur totale moyenne des arbres dominants du peuplement (en m),
A_c = âge moyen des arbres du peuplement déterminé à une hauteur de 1,0 m (en années ; dans la présente étude, cette donnée a été obtenue grâce à la datation des rondelles récoltées dans la tige des arbres-études à une hauteur de 1,0 m),
b₁, b₂, b₃, b₄, b₅ = coefficients dont les valeurs sont compilées dans le tableau 3 (ces coefficients varient selon l'espèce ligneuse présente dans le peuplement étudié).

Tableau 3 : Valeurs des coefficients b₁, b₂, b₃, b₄ et b₅ de l'équation 4 permettant de déterminer l'indice de qualité de station des sites d'étude à 50 ans (données tirées de Pothier et Savard 1998)

Espèce	b ₁	b ₂	b ₃	b ₄	b ₅
Pin gris	0,8661	0,9734	0,02840	- 0,8925	0,04827
Épinette noire	0,9604	0,9412	0,03379	- 0,6970	- 0,1046

Les caractéristiques édaphiques et/ou climatiques des PARM étudiés étant exceptionnelles, leurs IQS 50 diffèrent de ceux proposés dans les tables de rendement du MRN. Dans le but de prédire au mieux le rendement ligneux des sites d'étude, des modèles de régression ont donc été créés pour projeter le VMB des plantations étudiées à partir de leur IQS 50 exact. Ces modèles de régression auraient pu prédire le VMB des PIG et des

EPN en plantations pour des âges cambiaux respectivement compris entre 20 et 140 ans et entre 20 et 200 ans. Toutefois, dans cette étude, ils ont été construits pour prédire le VMB des deux espèces ligneuses en plantations pour des âges cambiaux compris entre 20 et 100 ans. Il est, pour le moment, difficile de prédire comment la mortalité ligneuse, expliquant généralement le rendement au-delà de 100 ans, sera sur les PARM.

2.3.2.2 Modélisation du rendement des pins gris

Ainsi, un modèle de régression a d'abord été créé afin de prédire le rendement potentiel de plantations de PIG sur les PARM des mines Niobec et du Lac Jeannine, selon leur IQS spécifique. La densité arborescente visée dans le reboisement des PARM étudiés étant de 2 000 tiges×ha⁻¹, les données du MRN utilisées pour concevoir le modèle souhaité étaient celles de VMB et d'IQS 50 associées à chaque âge cambial (par pas de 5 ans entre 20 et 100 ans) de la table de rendement des PIG plantés à raison de 2 000 tiges×ha⁻¹. Six courbes de rendement du MRN, associées à autant d'IQS 15 s'étendant de 3 à 8 m (équivalents à des IQS 50 s'étendant de 11 à 27 m), ont donc servi à fournir les six données de modélisation pour chaque âge cambial afin que le rendement puisse être projeté pour les valeurs d'IQS des plantations sur PARM. Ces données ont été compilées dans le logiciel JMP Pro, version 4.3.0 (SAS Institute Inc.) pour construire différents modèles de régression par âge cambial. Parmi ces derniers, ce sont finalement les régressions linéaires qui ont été sélectionnées pour prédire le rendement potentiel de plantations de PIG mises en terre sur les sites d'étude puisque, graphiquement, elles correspondaient au modèle le plus conservateur et qu'il était important que les VMB modélisés ne soient pas surestimés. Le rendement ligneux potentiel de

peuplements de PIG sur les PARM étudiés a ainsi été déterminé à partir de l'équation 6 et du tableau 4.

$$\text{VMB}_{\text{âge cambial}} = a_{\text{PIG ; âge cambial}} + b_{\text{PIG ; âge cambial}} \times \text{IQS 50} \quad (6)$$

où, $\text{VMB}_{\text{âge cambial}}$ = volume marchand brut (en $\text{m}^3 \times \text{ha}^{-1}$) d'un peuplement de PIG en plantations pour un âge cambial donné (par pas de 5 ans entre 20 et 100 ans),

IQS 50 = indice de qualité de station du peuplement à 50 ans (en m),

$a_{\text{PIG ; âge cambial}}$, $b_{\text{PIG ; âge cambial}}$ = coefficients dont les valeurs sont compilées dans le tableau 4 (ces coefficients varient selon l'âge cambial).

Tableau 4 : Valeurs estimées des coefficients et statistiques d’ajustement des régressions linéaires permettant de prédire, à partir de l’indice de qualité de station à 50 ans (IQS 50), le rendement – sous forme de volume marchand brut (VMB ; en m³×ha⁻¹) – de pins gris (PIG ; *Pinus banksiana* Lamb.) plantés à raison de 2 000 tiges×ha⁻¹

Âge cambial (en années)	Coefficient	Valeur estimée du coefficient	Erreur type du coefficient	Coefficient de détermination (R ²)	Racine de l’erreur quadratique moyenne
20	a _{PIG ; 20 ans}	- 36,87634	3,023428	0,994030	2,082634
	b _{PIG ; 20 ans}	3,9408602	0,152706		
25	a _{PIG ; 25 ans}	- 27,48925	3,966817	0,993550	2,732471
	b _{PIG ; 25 ans}	4,9731183	0,200354		
30	a _{PIG ; 30 ans}	- 16,13441	4,711070	0,993923	3,245137
	b _{PIG ; 30 ans}	6,0860215	0,237945		
35	a _{PIG ; 35 ans}	- 5,387097	5,660195	0,994172	3,898925
	b _{PIG ; 35 ans}	7,4677419	0,285883		
40	a _{PIG ; 40 ans}	5,6290323	6,021270	0,995464	4,147645
	b _{PIG ; 40 ans}	9,0107527	0,304120		
45	a _{PIG ; 45 ans}	23,607527	6,494744	0,994974	4,473789
	b _{PIG ; 45 ans}	9,2311828	0,328034		
50	a _{PIG ; 50 ans}	41,956989	7,503135	0,993365	5,168401
	b _{PIG ; 50 ans}	9,2741935	0,378966		
55	a _{PIG ; 55 ans}	58,956989	8,614581	0,991273	5,934001
	b _{PIG ; 55 ans}	9,2741935	0,435102		
60	a _{PIG ; 60 ans}	73,634409	10,16101	0,987830	6,999232
	b _{PIG ; 60 ans}	9,2473118	0,513209		
65	a _{PIG ; 65 ans}	88,279570	10,85099	0,985805	7,474509
	b _{PIG ; 65 ans}	9,1344086	0,548058		
70	a _{PIG ; 70 ans}	100,27419	11,81013	0,982973	8,135198
	b _{PIG ; 70 ans}	9,0645161	0,596502		
75	a _{PIG ; 75 ans}	111,58602	12,03489	0,981890	8,290022
	b _{PIG ; 75 ans}	8,9516129	0,607854		
80	a _{PIG ; 80 ans}	122,61290	13,13543	0,977776	9,048109
	b _{PIG ; 80 ans}	8,8010753	0,663440		
85	a _{PIG ; 85 ans}	131,58065	13,61326	0,975707	9,377249
	b _{PIG ; 85 ans}	8,7150538	0,687573		
90	a _{PIG ; 90 ans}	138,57527	14,65124	0,971527	10,09225
	b _{PIG ; 90 ans}	8,6451613	0,740000		
95	a _{PIG ; 95 ans}	145,23656	15,03927	0,969569	10,35953
	b _{PIG ; 95 ans}	8,5752688	0,759598		
100	a _{PIG ; 100 ans}	150,92473	15,36793	0,967879	10,58593
	b _{PIG ; 100 ans}	8,5215054	0,776198		

Note : pour un âge cambial donné (par pas de 5 ans entre 20 et 100 ans), le VMB est déterminé à l’aide de l’équation linéaire suivante : $VMB_{\text{âge cambial}} = a_{\text{PIG ; âge cambial}} + b_{\text{PIG ; âge cambial}} \times IQS 50$.

2.3.2.3 Modélisation du rendement des épinettes noires

Un modèle de régression a ensuite été créé afin de prédire le rendement potentiel de plantations d’EPN sur les PARM des mines du Lac Jeannine et de Mont-Wright. Ce modèle

a été conçu selon la même méthodologie que celle décrite précédemment pour modéliser le rendement des PIG sauf que les données du MRN utilisées étaient celles de VMB et d'IQS 50 associées à chaque âge cambial (par pas de 5 ans entre 20 et 100 ans) de la table de rendement des EPN plantées à raison de 2 000 tiges×ha⁻¹. Cinq courbes de rendement du MRN, associées à autant d'IQS 25 s'étendant de 6 à 10 m (équivalents à des IQS 50 s'étendant de 6,5 à 18,5 m), ont donc servi à fournir les cinq données de modélisation pour chaque âge cambial, afin que le rendement puisse être projeté pour les valeurs d'IQS des plantations sur PARM. Cette fois-ci, les régressions quadratiques représentaient le modèle le plus conservateur. Ainsi, le rendement ligneux potentiel de peuplements d'EPN sur les PARM étudiés a été déterminé à partir de l'équation quadratique 7 et du tableau 5.

$$\text{VMB}_{\text{âge cambial}} = a_{\text{EPN ; âge cambial}} + b_{\text{EPN ; âge cambial}} \times \text{IQS } 50 + c_{\text{EPN ; âge cambial}} \times \text{IQS } 50^2 \quad (7)$$

où, $\text{VMB}_{\text{âge cambial}}$ = volume marchand brut (en m³×ha⁻¹) d'un peuplement d'EPN en plantations pour un âge cambial donné (par pas de 5 ans entre 20 et 100 ans),

IQS 50 = indice de qualité de station du peuplement à 50 ans (en m),

$a_{\text{EPN ; âge cambial}}$, $b_{\text{EPN ; âge cambial}}$, $c_{\text{EPN ; âge cambial}}$ = coefficients dont les valeurs sont compilées dans le tableau 5 (ces coefficients varient selon l'âge cambial).

Tableau 5 : Valeurs estimées des coefficients et statistiques d'ajustement des régressions quadratiques permettant de prédire, à partir de l'indice de qualité de station à 50 ans (IQS 50), le rendement – sous forme de volume marchand brut (VMB ; en m³×ha⁻¹) – d'épinettes noires (EPN ; *Picea mariana* (Mill.) B.S.P.) plantées à raison de 2 000 tiges×ha⁻¹

Âge cambial (en années)	Coefficient	Valeur estimée du coefficient	Erreur type du coefficient	Coefficient de détermination (R ²)	Racine de l'erreur quadratique moyenne
20	a _{EPN ; 20 ans}	- 54,42113	6,339476	0,999524	0,371718
	b _{EPN ; 20 ans}	6,3292496	0,877159		
	c _{EPN ; 20 ans}	- 0,109941	0,029440		
25	a _{EPN ; 25 ans}	- 88,43039	9,104895	0,999217	0,922216
	b _{EPN ; 25 ans}	12,416843	1,348259		
	c _{EPN ; 25 ans}	- 0,207680	0,047791		
30	a _{EPN ; 30 ans}	- 150,0943	20,35255	0,998308	2,061468
	b _{EPN ; 30 ans}	23,803317	3,013819		
	c _{EPN ; 30 ans}	- 0,493246	0,106829		
35	a _{EPN ; 35 ans}	- 206,9559	13,92613	0,999426	1,410550
	b _{EPN ; 35 ans}	36,348511	2,062191		
	c _{EPN ; 35 ans}	- 0,882924	0,073097		
40	a _{EPN ; 40 ans}	- 253,1640	19,67980	0,999014	1,993327
	b _{EPN ; 40 ans}	46,742822	2,914199		
	c _{EPN ; 40 ans}	- 1,227387	0,103298		
45	a _{EPN ; 45 ans}	- 297,2473	50,92725	0,994067	5,158317
	b _{EPN ; 45 ans}	56,777353	7,541341		
	c _{EPN ; 45 ans}	- 1,570286	0,267314		
50	a _{EPN ; 50 ans}	- 330,5245	76,08064	0,987555	7,706052
	b _{EPN ; 50 ans}	65,070401	11,26607		
	c _{EPN ; 50 ans}	- 1,861841	0,399342		
55	a _{EPN ; 55 ans}	- 352,6674	100,3982	0,978780	10,16913
	b _{EPN ; 55 ans}	71,534355	14,86703		
	c _{EPN ; 55 ans}	- 2,098644	0,526983		
60	a _{EPN ; 60 ans}	- 365,7849	121,3779	0,969066	12,29411
	b _{EPN ; 60 ans}	76,491166	17,97371		
	c _{EPN ; 60 ans}	- 2,285999	0,637104		
65	a _{EPN ; 65 ans}	- 386,2430	145,8975	0,955919	14,77766
	b _{EPN ; 65 ans}	82,138829	21,60460		
	c _{EPN ; 65 ans}	- 2,498244	0,765806		
70	a _{EPN ; 70 ans}	- 396,8184	155,3420	0,949562	15,73428
	b _{EPN ; 70 ans}	86,099378	23,00315		
	c _{EPN ; 70 ans}	- 2,652841	0,815380		
75	a _{EPN ; 75 ans}	- 405,2002	170,4302	0,938973	17,26253
	b _{EPN ; 75 ans}	89,513512	25,23742		
	c _{EPN ; 75 ans}	- 2,787762	0,894577		
80	a _{EPN ; 80 ans}	- 412,2572	184,5590	0,929022	18,69360
	b _{EPN ; 80 ans}	92,274623	27,32961		
	c _{EPN ; 80 ans}	- 2,894051	0,968738		
85	a _{EPN ; 85 ans}	- 418,1514	186,7274	0,926254	18,91323
	b _{EPN ; 85 ans}	94,853470	27,65071		
	c _{EPN ; 85 ans}	- 2,998866	0,980120		

Tableau 5 (suite) : Valeurs estimées des coefficients et statistiques d'ajustement des régressions quadratiques permettant de prédire, à partir de l'indice de qualité de station à 50 ans (IQS 50), le rendement – sous forme de volume marchand brut (VMB ; en $m^3 \times ha^{-1}$) – d'épinettes noires (EPN ; *Picea mariana* (Mill.) B.S.P.) plantées à raison de 2 000 tiges $\times ha^{-1}$

Âge cambial (en années)	Coefficient	Valeur estimée du coefficient	Erreur type du coefficient	Coefficient de détermination (R^2)	Racine de l'erreur quadratique moyenne
90	a _{EPN ; 90 ans}	- 416,4727	195,0665	0,918512	19,75789
	b _{EPN ; 90 ans}	96,071903	28,88558		
	c _{EPN ; 90 ans}	- 3,052722	1,023891		
95	a _{EPN ; 95 ans}	- 422,1891	205,5995	0,909990	20,82475
	b _{EPN ; 95 ans}	98,142163	30,44531		
	c _{EPN ; 95 ans}	- 3,134121	1,079178		
100	a _{EPN ; 100 ans}	- 423,8545	210,2611	0,905928	21,29691
	b _{EPN ; 100 ans}	99,486037	31,13560		
	c _{EPN ; 100 ans}	- 3,187643	1,103646		

Note : pour un âge cambial donné (par pas de 5 ans entre 20 et 200 ans), le VMB est déterminé à l'aide de l'équation quadratique suivante : $VMB_{\text{âge cambial}} = a_{EPN} ; \text{âge cambial} + b_{EPN} ; \text{âge cambial} \times IQS 50 + c_{EPN} ; \text{âge cambial} \times IQS 50^2$.

Enfin, il a été nécessaire de déterminer le rendement ligneux qu'une plantation d'EPN donnerait sur le PARM de la mine de Mont-Wright. En effet, ce rendement n'a pas pu être projeté à partir du modèle de régression décrit précédemment puisqu'aucun arbre n'avait été mesuré et récolté pour calculer l'IQS 50 d'un peuplement d'EPN plantées sur le site d'étude en question. La prédiction du VMB potentiel de ce peuplement a ainsi nécessité l'utilisation de l'équation 8 et des deux postulats suivants :

(Postulat 3) le ratio de rendement entre les arbres croissant sur un PARM donné et ceux croissant à proximité est, pour une même espèce, représentatif de l'effet du substrat offert par le PARM (effet édaphique) sur le rendement ligneux ;

(Postulat 4) le ratio de rendement entre les arbres d'une même espèce se développant naturellement sur des sites forestiers éloignés, mais comparables sur le plan édaphique, est représentatif de l'effet de la différence de climat entre les deux localités sur le rendement ligneux.

$$VMB_{\text{PARM-MW}; \text{âge cambial}} = VMB_{\text{NAT-MW}; \text{âge cambial}} \times \frac{VMB_{\text{PARM-LJ}; \text{âge cambial}}}{VMB_{\text{NAT-LJ}; \text{âge cambial}}} \quad (8)$$

où, $VMB_{\text{PARM-MW}; \text{âge cambial}}$ = volume marchand brut (en $\text{m}^3 \times \text{ha}^{-1}$) d'un peuplement d'EPN en plantations sur le parc à résidus de la mine de Mont-Wright pour un âge cambial donné (par pas de 5 ans entre 20 et 100 ans),

$VMB_{\text{NAT-MW}; \text{âge cambial}}$ = volume marchand brut (en $\text{m}^3 \times \text{ha}^{-1}$) des peuplements analogues de plantations d'EPN étudiés près de la mine de Mont-Wright pour l'âge cambial donné,

$VMB_{\text{PARM-LJ}; \text{âge cambial}}$ = volume marchand brut (en $\text{m}^3 \times \text{ha}^{-1}$) du peuplement d'EPN en plantations sur le parc à résidus de l'ancienne mine du Lac Jeannine pour un âge cambial donné,

$VMB_{\text{NAT-LJ}; \text{âge cambial}}$ = volume marchand brut (en $\text{m}^3 \times \text{ha}^{-1}$) d'un peuplement analogue de plantation d'EPN étudié près de l'ancienne mine du Lac Jeannine pour l'âge cambial donné.

Selon le postulat 3, le ratio $\frac{VMB_{\text{PARM-LJ}; \text{âge cambial}}}{VMB_{\text{NAT-LJ}; \text{âge cambial}}}$ représente le facteur de

correction édaphique affectant la rendement des EPN plantées sur les PARM de l'ancienne mine du Lac Jeannine et de la mine de Mont-Wright pour un âge cambial donné.

2.4 Analyses statistiques

Bien que cela ne soit pas déterminant pour répondre à l'objectif du présent projet, des tests statistiques peuvent être utilisés comme barème de comparaison entre les différentes

conditions de croissance étudiées, montrées par les différents sites d'étude et leurs particularités, notamment édaphiques et climatiques. C'est pourquoi des analyses de variance à deux facteurs dont un à mesures répétées (ANOVAR) ont été effectuées sur les données de volume cumulé. Le facteur à mesures répétées était alors le temps représenté par l'âge cambial (en années). Bien que l'ANOVAR soit appropriée pour les tests où il y a une dépendance intra-sujet (l'autocorrélation temporelle dans le cas de la croissance des arbres), il est tout de même important de prendre en compte le non-respect de la condition de sphéricité qui lui est inhérente. Pour cela, une correction du nombre de degrés de liberté utilisés pour les tests d'hypothèses, celle de Greenhouse-Geisser, a été appliquée (Quinn et Keough 2002). Cette correction fait en sorte, au final, d'augmenter la valeur de la probabilité d'erreur de type I (p) d'une valeur qui varie selon le niveau du manque de sphéricité et permet d'éviter de faire un test plus permissif que le niveau de risque souhaité au départ. Lorsque la croissance ligneuse de plus de deux sites d'étude était comparée, des contrastes orthogonaux ont été effectués.

Pour réaliser l'ensemble des analyses statistiques, le logiciel JMP Pro, version 4.3.0, a été utilisé avec un seuil de signification de 0,05 ($\alpha = 0,05$).

CHAPITRE 3

RÉSULTATS

3.1 Mine Niobec

3.1.1 Croissance des pins gris plantés sur le parc à résidus de la mine Niobec et dans sa périphérie

Entre la première et la quatorzième année de croissance ligneuse, le site, l'âge cambial et l'interaction entre ces deux facteurs possédaient un effet significatif sur le volume cumulé des PIG plantés sur le PARM de la mine Niobec et sur les sites naturels étudiés près de cette mine, à savoir PLP01 et PLP03-04 (tableau 6). Dans la présente partie, les peuplements de PIG plantés en 1989 – 1994 et en 2004 sur le PARM de la mine Niobec sont regroupés et montrent le potentiel de croissance ligneuse général sur le PARM de la mine Niobec (se référer à l'annexe 1 afin de voir le manque de différence significative entre la croissance des PIG plantés en 1989 – 1994 sur le PARM de la mine Niobec et celle des PIG plantés en 2004 sur ce même PARM, pour un âge cambial compris entre 1 et 14 ans). Il en va de même pour les peuplements de PIG plantés sur deux des sites naturels étudiés à proximité de la mine Niobec, à savoir PLP03 et PLP04 (se référer à l'annexe 2 afin d'observer l'absence de différence significative entre la croissance des PIG plantés sur le site PLP03 et celle des PIG plantés sur le site PLP04, pour un âge cambial compris entre 1 et 14 ans). La croissance de ces deux plantations, regroupées sous l'appellation « PLP03-04 », représente le potentiel de croissance des plantations de PIG mises en terre à 60 km au nord-ouest de la mine Niobec.

Tableau 6 : Résultats de l'analyse de variance à deux facteurs dont un à mesures répétées (ANOVAR) pour le volume cumulé des pins gris (*Pinus banksiana* Lamb.) plantés sur le parc à résidus (PARM) de la mine Niobec et sur les sites naturels étudiés à proximité de cette mine (à savoir, PLP01 et PLP03-04)

Source de variation	Valeur de <i>F</i> exacte ou approximative	Degrés de liberté du numérateur	Degrés de liberté du dénominateur	<i>p</i> > <i>F</i> *
Facteurs inter-sujets				
Constante	451,7711	1	18	< 0,0001
Site	36,5262	2	18	< 0,0001
C1 (1, - 1, 0) [§]	2,7480	1	18	0,1147
C2 (1, 0, - 1) [§]	38,5753	1	18	< 0,0001
C3 (0, 1, - 1) [§]	59,1111	1	18	< 0,0001
C4 (1, - 0,5, - 0,5) [§]	5,0228	1	18	0,0379
Facteurs intra-sujets[†]				
Âge cambial [‡]	613,0711	1,1619	20,9140	< 0,0001
Site × Âge cambial [‡]	55,0774	2,3238	20,9140	< 0,0001
C1 [§] × Âge cambial [‡]	4,4030	1,1619	20,9140	0,0431
C2 [§] × Âge cambial [‡]	57,6530	1,1619	20,9140	< 0,0001
C3 [§] × Âge cambial [‡]	89,4913	1,1619	20,9140	< 0,0001
C4 [§] × Âge cambial [‡]	7,3756	1,1619	20,9140	0,0103

* Les valeurs de *p* en gras et en rouge indiquent que les résultats du test réalisé sont significatifs par rapport au seuil de 0,05.

† Afin de corriger le manque de sphéricité de la matrice variance-covariance, les degrés de liberté du test *F* réalisé pour les facteurs intra-sujets et les *p* qui en résultent sont ajustés avec l' ϵ de Greenhouse-Geisser. La valeur de *F* reportée pour l'interaction entre le site et l'âge cambial est approximative.

‡ Dans cette ANOVAR, l'âge cambial est compris entre 1 et 14 ans.

§ Le contraste orthogonal C1 compare les PIG plantés sur le PARM de la mine Niobec avec ceux plantés sur le site naturel PLP01 : C1 (1, - 1, 0, pour les sites « PARM de la mine Niobec », « PLP01 » et « PLP03-04 », respectivement). Le contraste orthogonal C2 compare les PIG plantés sur le PARM de la mine Niobec avec ceux plantés sur les sites naturels PLP03-04 : C2 (1, 0, - 1, pour les sites « PARM de la mine Niobec », « PLP01 » et « PLP03-04 », respectivement). Le contraste orthogonal C3 compare les PIG plantés sur le site naturel PLP01 avec ceux plantés sur les sites naturels PLP03-04 : C3 (0, 1, - 1, pour les sites « PARM de la mine Niobec », « PLP01 » et « PLP03-04 », respectivement). Le contraste orthogonal C4 compare les PIG plantés sur le PARM de la mine Niobec avec ceux plantés sur les sites naturels PLP01 et PLP03-04 : C4 (1, - 0,5, - 0,5, pour les sites « PARM de la mine Niobec », « PLP01 » et « PLP03-04 », respectivement).

La figure 4 montre qu'entre leur première et leur quatorzième année de croissance, les PIG mis en terre sur le PARM de la mine Niobec possédaient un accroissement en volume cumulé significativement moins prononcé que celui des arbres de la même espèce plantés sur le site naturel PLP01, étudié à 20 km au nord de cette mine. Ces mêmes PIG possédaient, entre leur première et leur quatorzième année de croissance, un accroissement en volume

cumulé significativement plus prononcé que celui des arbres de la même espèce plantés sur les sites naturels PLP03-04 situés à environ 60 km au nord-ouest de la mine Niobec. En effet, durant les 14 premières années de croissance ligneuse, les PIG plantés sur le site PLP01 présentaient, en moyenne, un volume cumulé 1,1 fois supérieur à celui des PIG plantés sur le PARM de la mine Niobec tandis que ces derniers présentaient, en moyenne, un volume cumulé 2,2 fois supérieur à celui des PIG mis en terre sur les sites PLP03-04.

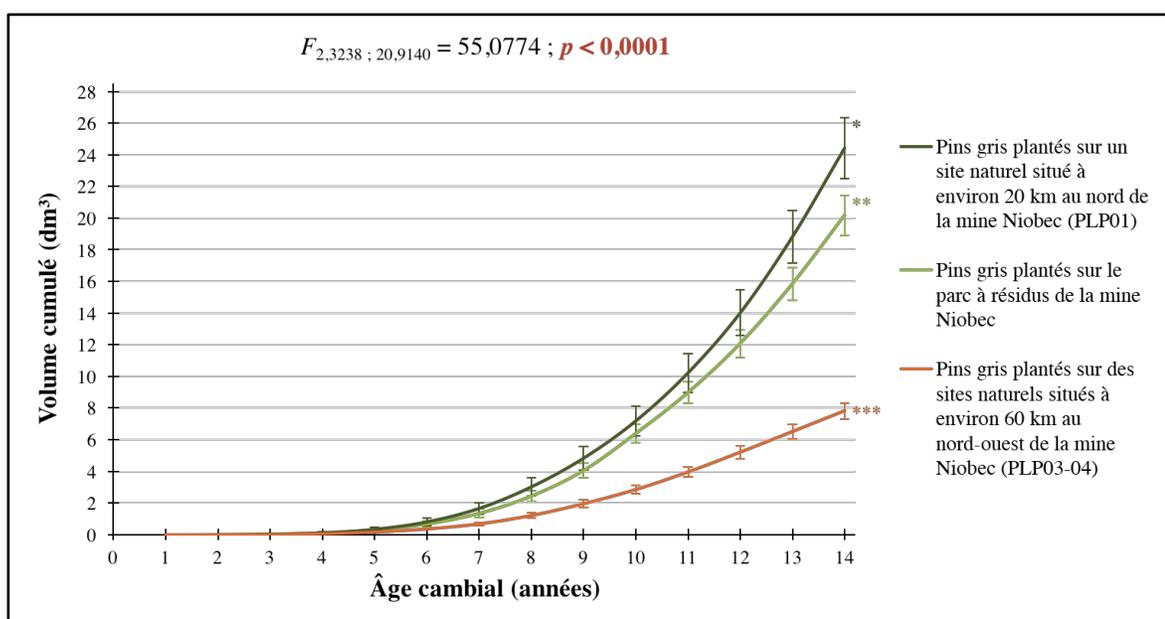


Figure 4 : Potentiel de croissance en volume cumulé moyen (en dm^3) des pins gris (*Pinus banksiana* Lamb.) plantés sur le parc à résidus de la mine Niobec et sur les sites naturels étudiés à proximité de cette dernière (à savoir, PLP01 et PLP03-04) par année d'âge cambial. Les barres d'erreur représentent l'erreur type et les courbes non connectées par le même nombre d'astérisques sont, selon les tests de contraste appropriés (voir tableau 6), significativement différentes au seuil de 0,05.

3.1.2 Rendement des éventuelles plantations de pin gris sur le parc à résidus de la mine Niobec

Le rendement des deux plantations sur le PARM de la mine Niobec, modélisé distinctement sur la figure 5, montre l'étendue des données de rendement ligneux possible

sur ce PARM. La plantation de PIG de 1989 – 1994 présentait un IQS 50 de 17,88 tandis que celle de 2004 en présentait un de 15,87. L’IQS 50 potentiel moyen du site d’étude était donc de 16,88. Ainsi, dans le cadre d’un éventuel reboisement du PARM de la mine Niobec, les PIG plantés, à raison de 2 000 tiges×ha⁻¹, atteindraient un rendement potentiel moyen de 198,51 m³×ha⁻¹ à 50 ans et de 294,77 m³×ha⁻¹ à 100 ans (se référer au tableau 3.1 de l’annexe 3 pour obtenir la table de rendement présentant, pour des âges cambiaux allant de 20 à 100 ans par pas de 5 ans, les valeurs du VMB des PIG éventuellement plantés sur le PARM de la mine Niobec, à raison de 2 000 tiges×ha⁻¹).

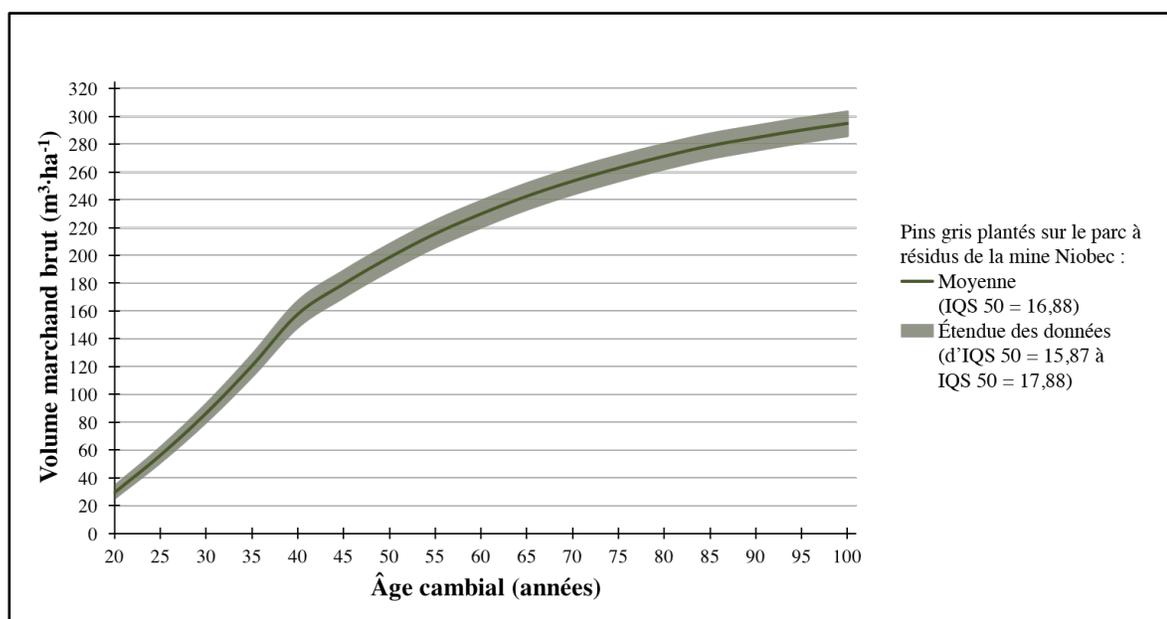


Figure 5 : Rendement potentiel projeté – sous forme de volume marchand brut (en m³×ha⁻¹) – des éventuels pins gris (*Pinus banksiana* Lamb.) plantés, à raison de 2 000 tiges×ha⁻¹, sur le parc à résidus de la mine Niobec en fonction de leur âge (en années).

3.2 Ancienne mine du Lac Jeannine

3.2.1 Croissance des pins gris plantés sur le parc à résidus de l'ancienne mine du Lac Jeannine et dans sa périphérie

Entre la première et la trente-cinquième année de croissance ligneuse, l'âge cambial possédait un effet significatif sur le volume cumulé des PIG se trouvant dans la plantation sur le PARM de l'ancienne mine du Lac Jeannine et dans le peuplement analogue de plantation étudié près de cette mine, à savoir LJ-Nat (tableau 7). L'ANOVAR révèle également que le volume cumulé de ces mêmes PIG n'était pas significativement influencé par le site et l'interaction entre le site et l'âge cambial, lorsque ce dernier était compris entre 1 et 35 ans. Cependant, il est possible d'observer sur la figure 6, qu'entre leur première et leur trente-cinquième année de croissance, les PIG plantés sur le PARM de l'ancienne mine du Lac Jeannine possédaient un accroissement en volume cumulé qui tendait à être moins prononcé que celui des arbres de la même espèce se trouvant sur le site naturel étudié à proximité de cette ancienne mine. En effet, durant les 35 premières années de croissance ligneuse, les PIG étudiés sur le site LJ-Nat possédaient, en moyenne, un volume cumulé tendant à être 2,7 fois supérieur à celui des PIG plantés sur le PARM de l'ancienne mine du Lac Jeannine.

Tableau 7 : Résultats de l'analyse de variance à deux facteurs dont un à mesures répétées (ANOVAR) pour le volume cumulé des pins gris (*Pinus banksiana* Lamb.) se trouvant dans la plantation sur le parc à résidus de l'ancienne mine du Lac Jeannine et dans le peuplement analogue de plantation étudié à proximité de cette mine (à savoir, LJ-Nat)

Source de variation	Valeur de F exacte	Degrés de liberté du numérateur	Degrés de liberté du dénominateur	$p > F ^*$
Facteurs inter-sujets				
Constante	29,9945	1	6	0,0015
Site	3,9065	1	6	0,0955
Facteurs intra-sujets[†]				
Âge cambial [‡]	38,8610	1,0610	6,3659	0,0006
Site × Âge cambial [‡]	3,7591	1,0610	6,3659	0,0969

* Les valeurs de p en gras et en rouge indiquent que les résultats du test réalisé sont significatifs par rapport au seuil de 0,05.

† Afin de corriger le manque de sphéricité de la matrice variance-covariance, les degrés de liberté du test F réalisé pour les facteurs intra-sujets et les p qui en résultent sont ajustés avec l' ε de Greenhouse-Geisser.

‡ Dans cette ANOVAR, l'âge cambial est compris entre 1 et 35 ans.

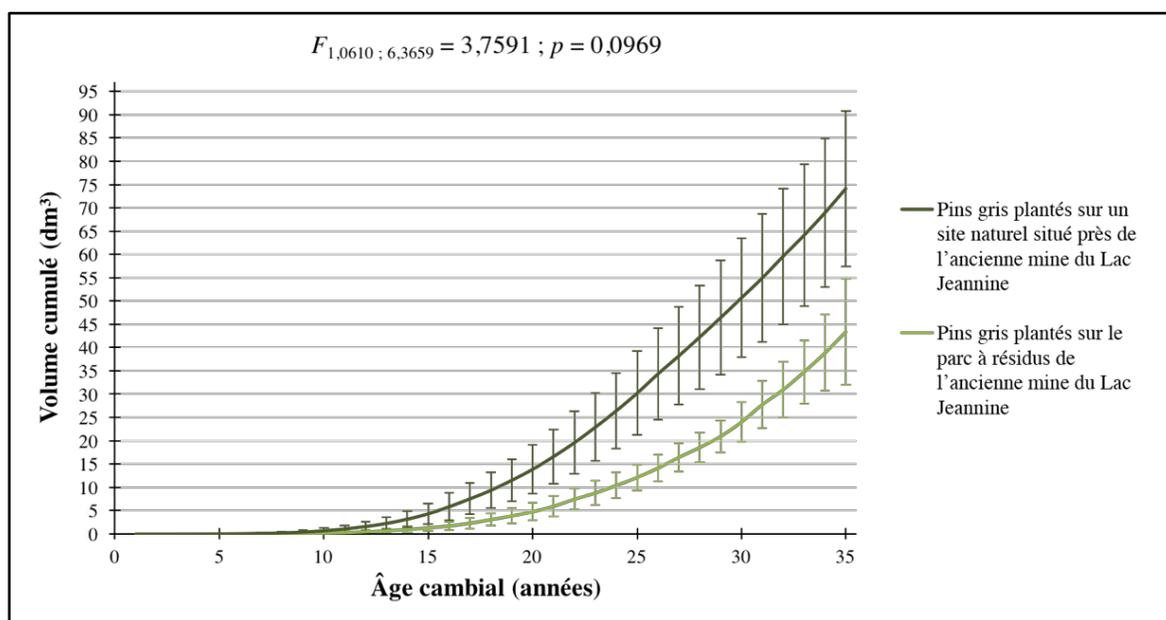


Figure 6 : Potentiel de croissance en volume cumulé moyen (en dm³) des pins gris (*Pinus banksiana* Lamb.) se trouvant dans la plantation sur le parc à résidus de l'ancienne mine du Lac Jeannine et dans le peuplement analogue de plantation étudié à proximité de cette dernière (à savoir, LJ-Nat) par année d'âge cambial. Les barres d'erreur représentent l'erreur type.

3.2.2 Rendement des éventuelles plantations de pin gris sur le parc à résidus de l'ancienne mine du Lac Jeannine

Sur le PARM de l'ancienne mine du Lac Jeannine, la plantation de PIG de 1980 présentait un IQS 50 potentiel de 9,03. Ainsi, dans le cadre d'un éventuel reboisement de ce PARM avec des PIG, les arbres plantés, à raison de 2 000 tiges×ha⁻¹, atteindraient un rendement potentiel de 125,70 m³×ha⁻¹ à 50 ans et de 227,87 m³×ha⁻¹ à 100 ans (figure 7 ; se référer au tableau 3.2 de l'annexe 3 pour obtenir la table de rendement présentant, pour des âges cambiaux allant de 20 à 100 ans par pas de 5 ans, les valeurs du VMB des PIG éventuellement plantés sur le PARM de l'ancienne mine du Lac Jeannine, à raison de 2 000 tiges×ha⁻¹).

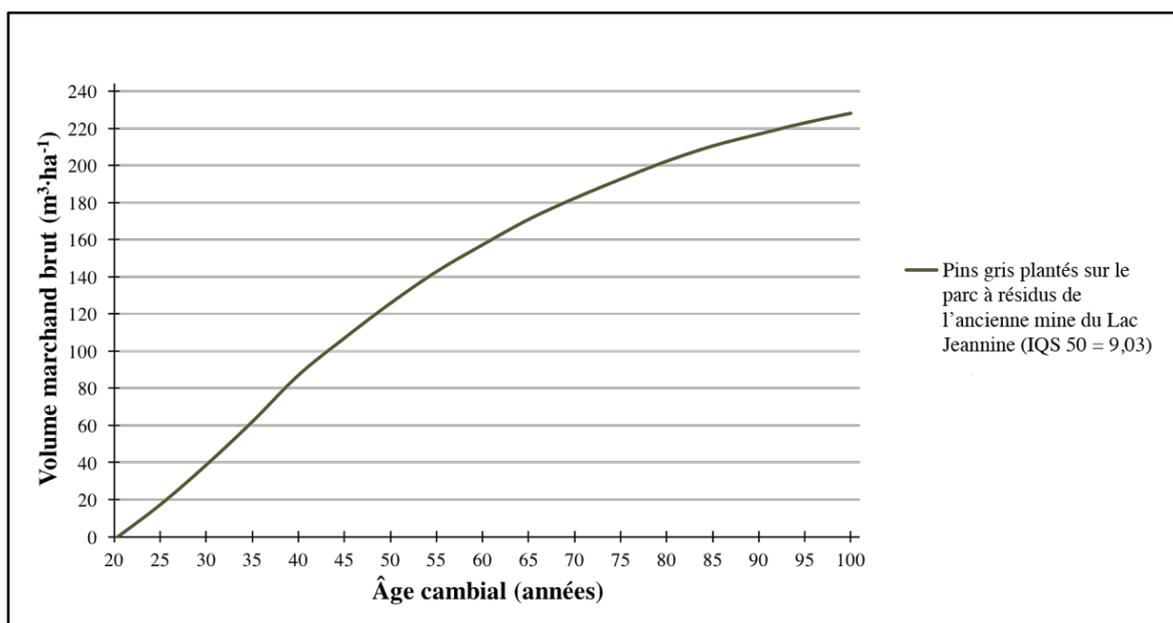


Figure 7 : Rendement potentiel projeté – sous forme de volume marchand brut (en m³×ha⁻¹) – des éventuels pins gris (*Pinus banksiana* Lamb.) plantés, à raison de 2 000 tiges×ha⁻¹, sur le parc à résidus de l'ancienne mine du Lac Jeannine en fonction de leur âge (en années).

3.2.3 Croissance des épinettes noires plantées sur le parc à résidus de l'ancienne mine du Lac Jeannine et dans sa périphérie

Entre la première et la vingt-neuvième année de croissance ligneuse, l'âge cambial possédait un effet significatif sur le volume cumulé des EPN faisant partie de la plantation sur le PARM de l'ancienne mine du Lac Jeannine et du peuplement analogue de plantation sur le site LJ-Nat (tableau 8). L'ANOVAR révèle également que ce volume n'était pas significativement influencé par le site et l'interaction entre le site et l'âge cambial, lorsque ce dernier était compris entre 1 et 29 ans. Cependant, il est possible d'observer sur la figure 8, qu'entre leur première et leur vingt-neuvième année de croissance, les EPN plantées sur le PARM de l'ancienne mine du Lac Jeannine possédaient un accroissement en volume cumulé qui tendait à être moins prononcé que celui des arbres de la même espèce se trouvant sur le site naturel étudié à proximité de cette ancienne mine. En effet, durant les 29 premières années de croissance ligneuse, les EPN du site LJ-Nat possédaient, en moyenne, un volume cumulé tendant à être 6,7 fois supérieur à celui des EPN plantées sur le PARM de l'ancienne mine du Lac Jeannine.

Tableau 8 : Résultats de l'analyse de variance à deux facteurs dont un à mesures répétées (ANOVAR) pour le volume cumulé des épinettes noires (*Picea mariana* (Mill.) B.S.P.) se trouvant dans la plantation sur le parc à résidus de l'ancienne mine du Lac Jeannine et dans le peuplement analogue de plantation étudié à proximité de cette mine (à savoir, LJ-Nat)

Source de variation	Valeur de F exacte	Degrés de liberté du numérateur	Degrés de liberté du dénominateur	$p > F ^*$
Facteurs inter-sujets				
Constante	11,5511	1	6	0,0145
Site	4,8313	1	6	0,0703
Facteurs intra-sujets[†]				
Âge cambial [‡]	16,0558	1,0171	6,1028	0,0067
Site × Âge cambial [‡]	5,6254	1,0171	6,1028	0,0544

* Les valeurs de p en gras et en rouge indiquent que les résultats du test réalisé sont significatifs par rapport au seuil de 0,05.

† Afin de corriger le manque de sphéricité de la matrice variance-covariance, les degrés de liberté du test F réalisé pour les facteurs intra-sujets et les p qui en résultent sont ajustés avec l' ε de Greenhouse-Geisser.

‡ Dans cette ANOVAR, l'âge cambial est compris entre 1 et 29 ans.

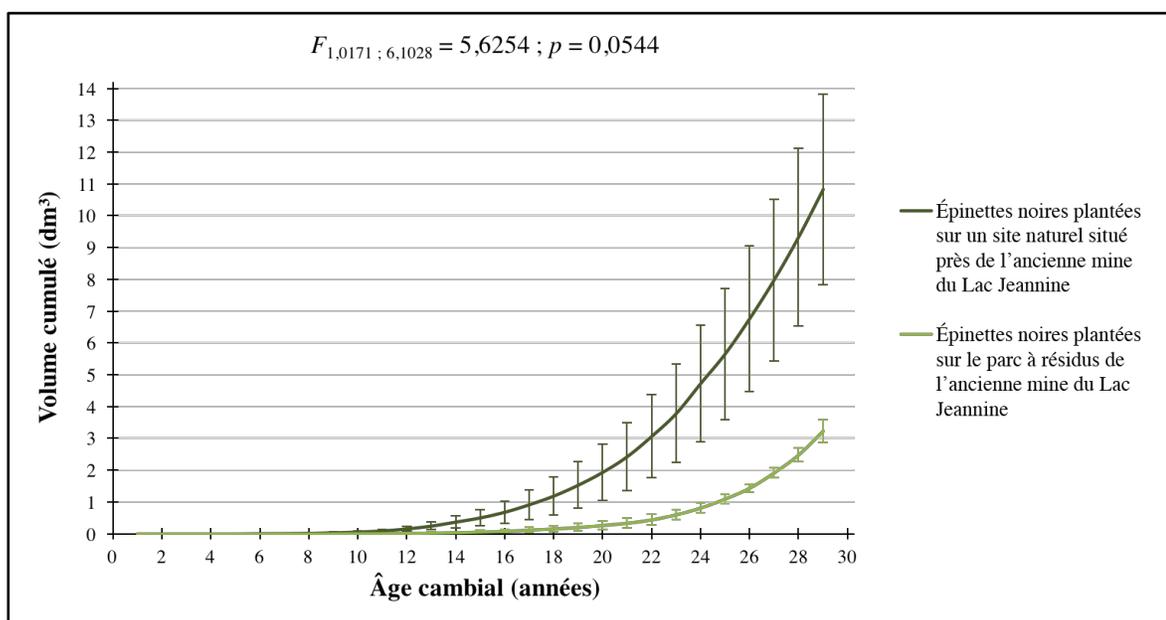


Figure 8 : Potentiel de croissance en volume cumulé moyen (en dm^3) des épinettes noires (*Picea mariana* (Mill.) B.S.P.) se trouvant dans la plantation sur le parc à résidus de l'ancienne mine du Lac Jeannine et dans le peuplement analogue de plantation étudié à proximité de cette dernière (à savoir, LJ-Nat) par année d'âge cambial. Les barres d'erreur représentent l'erreur type.

3.2.4 Rendement des éventuelles plantations d'épinette noire sur le parc à résidus de l'ancienne mine du Lac Jeannine

Sur le PARM de l'ancienne mine du Lac Jeannine, la plantation d'EPN de 1980 présentait un IQS 50 potentiel de 7,11. Ainsi, dans le cadre d'un éventuel reboisement de ce PARM avec des EPN, les arbres plantés, à raison de 2 000 tiges×ha⁻¹, atteindraient un rendement potentiel de 38,01 m³×ha⁻¹ à 50 ans et de 122,35 m³×ha⁻¹ à 100 ans (figure 9 ; se référer au tableau 3.3 de l'annexe 3 pour obtenir la table de rendement présentant, pour des âges cambiaux allant de 20 à 100 ans par pas de 5 ans, les valeurs du VMB des EPN éventuellement plantées sur le PARM de l'ancienne mine du Lac Jeannine, à raison de 2 000 tiges×ha⁻¹).

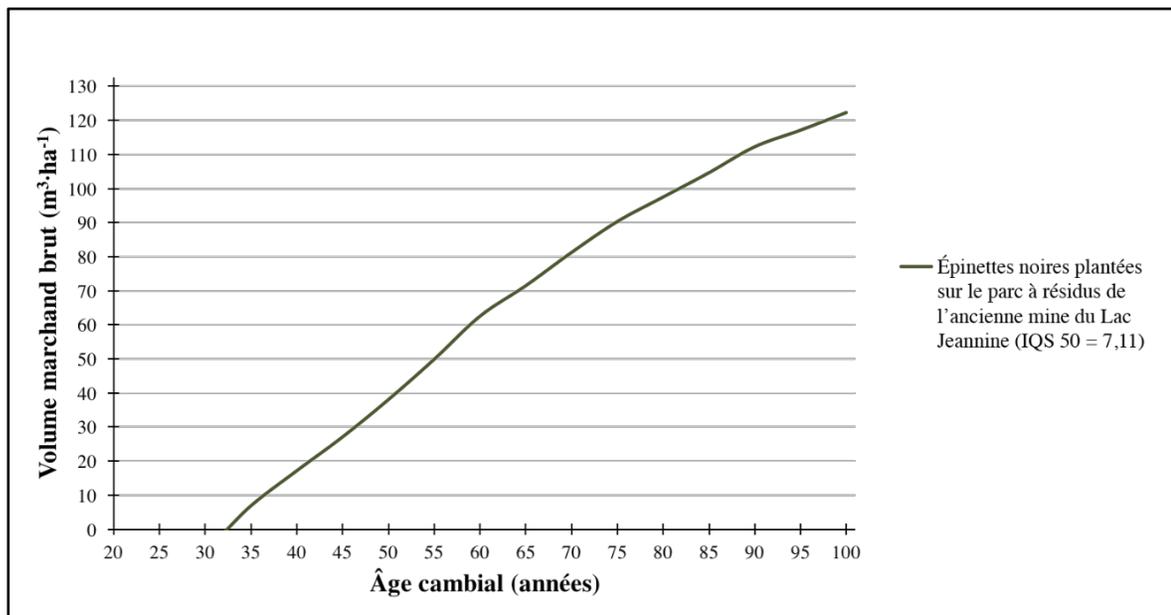


Figure 9 : Rendement potentiel projeté – sous forme de volume marchand brut (en m³×ha⁻¹) – des éventuelles épinettes noires (*Picea mariana* (Mill.) B.S.P.) plantées, à raison de 2 000 tiges×ha⁻¹, sur le parc à résidus de l'ancienne mine du Lac Jeannine en fonction de leur âge (en années).

3.3 Mine de Mont-Wright

3.3.1 Facteurs de correction édaphique affectant la croissance et le rendement des éventuelles épinettes noires plantées sur le parc à résidus de la mine de Mont-Wright

Le facteur de correction édaphique affectant la croissance en volume cumulé des EPN éventuellement plantées sur le PARM de la mine de Mont-Wright serait différent pour chaque âge cambial compris entre 1 et 24 ans (figure 10). Entre la première et la cinquième année de croissance ligneuse, ce facteur serait nul. À partir de la sixième année de croissance et jusqu'à la vingt-quatrième, il fluctuerait entre 0,25 (valeur atteinte pour un âge cambial de 7 ans) et 0,42 (valeur atteinte pour un âge cambial de 24 ans), pour une valeur moyenne de 0,34.

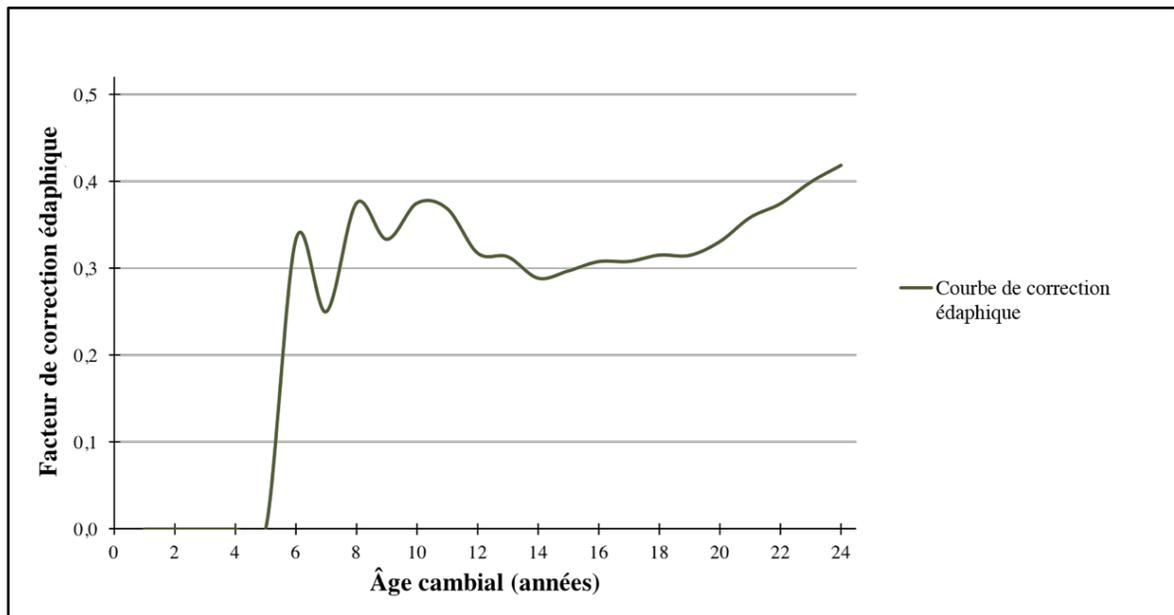


Figure 10 : Courbe de correction édaphique affectant la croissance en volume cumulé des éventuelles épinettes noires (EPN ; *Picea mariana* (Mill.) B.S.P.) plantées sur le parc à résidus miniers de la mine de Mont-Wright. Pour un âge cambial donné, le facteur de correction édaphique correspond au ratio entre le potentiel de croissance, à l'âge cambial donné, des EPN plantées sur le parc à résidus de l'ancienne mine du Lac Jeannine et celui, à l'âge cambial donné, des EPN faisant partie du peuplement analogue de plantation étudié à proximité de cette ancienne mine.

La figure 11 montre que plus les éventuelles EPN plantées sur le PARM de la mine de Mont-Wright seront vieilles, plus le facteur édaphique affectant leur rendement – sous forme de VMB – sera important. La valeur de ce facteur augmenterait rapidement entre les âges cambiaux de 25 et 35 ans, passant de 0,00 à 0,32. Ensuite, cette valeur continuerait d’augmenter, mais plus lentement, pour atteindre 0,59 à 100 ans.

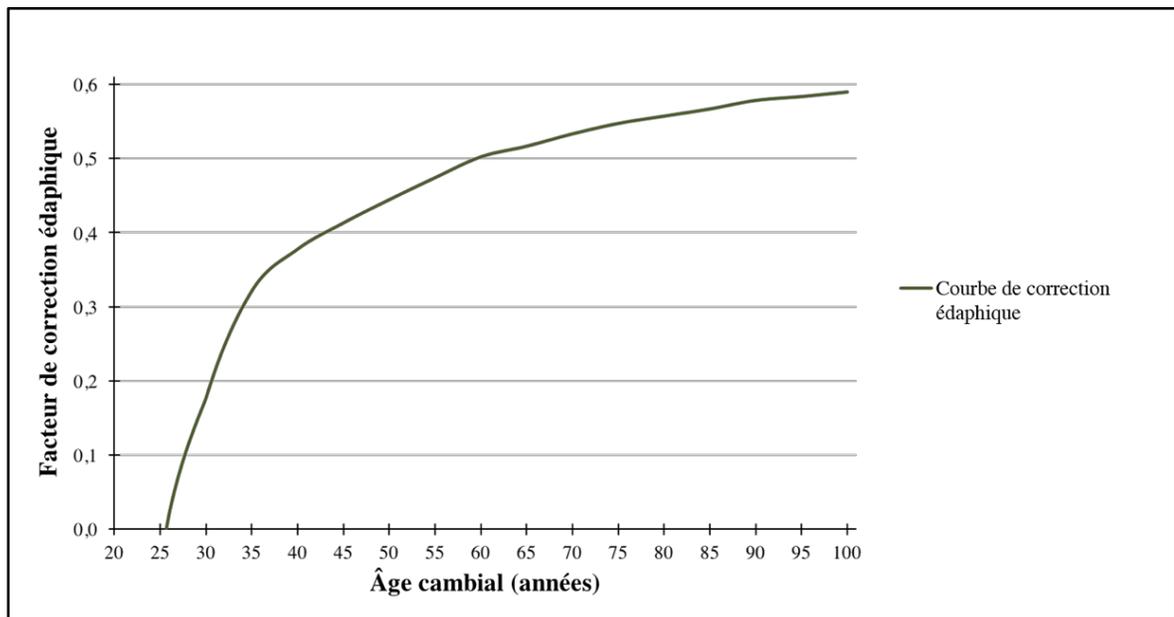


Figure 11 : Courbe de correction édaphique affectant le rendement – sous forme de volume marchand brut – des éventuelles épinettes noires (EPN ; *Picea mariana* (Mill.) B.S.P.) plantées, à raison de 2 000 tiges×ha⁻¹, sur le parc à résidus miniers de la mine de Mont-Wright. Pour un âge cambial donné, le facteur de correction édaphique correspond au ratio entre le rendement potentiel projeté, à l’âge cambial donné, des EPN plantées, à raison de 2 000 tiges×ha⁻¹, sur le parc à résidus de l’ancienne mine du Lac Jeannine et celui, à l’âge cambial donné, des EPN plantées, à raison de 2 000 tiges×ha⁻¹, sur le site étudié à proximité de cette ancienne mine où se trouve le peuplement analogue de plantation.

3.3.2 Croissance des éventuelles plantations d’épinettes noires sur le parc à résidus de la mine de Mont-Wright et dans sa périphérie

Il est possible d’observer sur la figure 12 qu’entre leur première et leur vingt-neuvième année de croissance, les éventuels EPN plantées sur le PARM de la mine de Mont-Wright

posséderaient un accroissement potentiel en volume cumulé qui tendrait à être moins prononcé que le volume cumulé des arbres de la même espèce se trouvant dans les peuplements analogues de plantations étudiés à proximité de cette mine, à savoir MW1 et MW2. En effet, durant les 29 premières années de croissance ligneuse, les EPN se trouvant en périphérie nord-est du PARM de la mine de Mont-Wright posséderaient, en moyenne, un volume cumulé tendant à être 4,9 fois supérieur au volume cumulé potentiel des éventuelles EPN plantées sur le PARM tandis que les EPN se trouvant en périphérie sud-ouest du PARM posséderaient, en moyenne, un volume cumulé tendant à être 8,6 fois supérieur au volume cumulé potentiel des éventuelles EPN plantées sur le PARM.

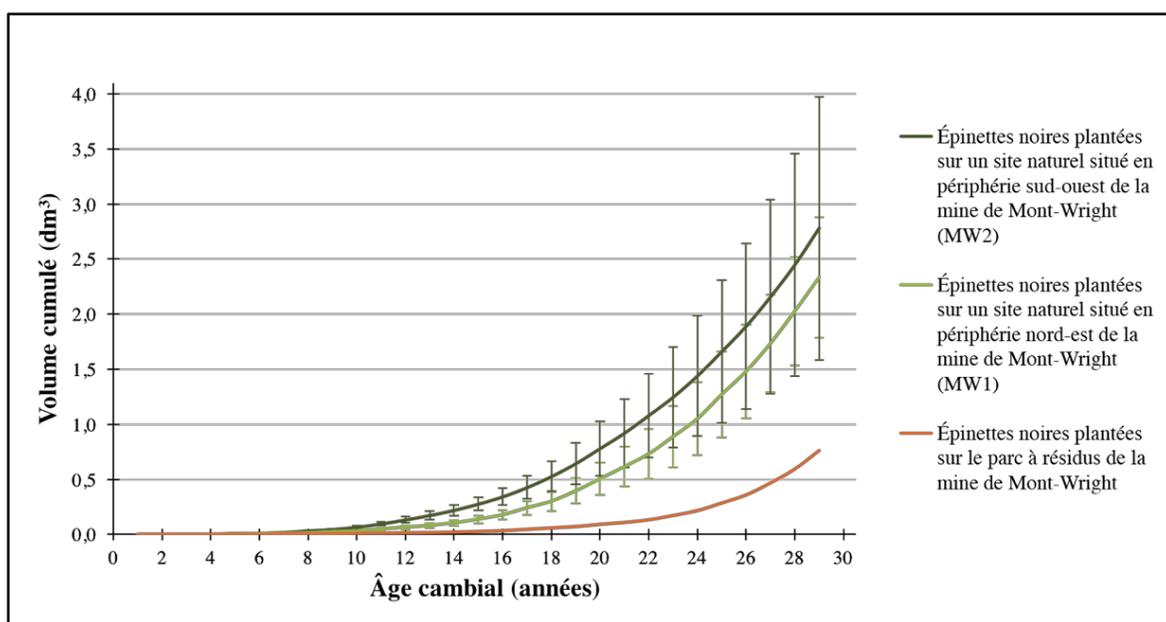


Figure 12 : Potentiel de croissance en volume cumulé moyen (en dm^3) des épinettes noires (EPN ; *Picea mariana* (Mill.) B.S.P.) se trouvant dans l'éventuelle plantation sur le parc à résidus de la mine de Mont-Wright et dans les peuplements analogues de plantations étudiés à proximité de cette dernière (à savoir, MW1 et MW2) par année d'âge cambial. Les barres d'erreur représentent l'erreur type et le potentiel de croissance moyen des éventuelles EPN plantées sur le parc à résidus de la mine de Mont-Wright a été projeté à partir des données du potentiel de croissance des EPN se trouvant sur les sites MW1 et MW2 et des facteurs de correction édaphique présentés dans la figure 10.

3.3.3 Rendement des éventuelles plantations d'épinette noire sur le parc à résidus de la mine de Mont-Wright

La figure 13 montre que, dans le cadre d'un éventuel reboisement du PARM de la mine de Mont-Wright avec des EPN, les arbres plantés, à raison de 2 000 tiges×ha⁻¹, atteindraient un rendement potentiel moyen de 31,02 m³×ha⁻¹ à 50 ans et de 106,17 m³×ha⁻¹ à 100 ans (se référer au tableau 3.4 de l'annexe 3 pour obtenir la table de rendement présentant, pour des âges cambiaux allant de 20 à 100 ans par pas de 5 ans, les valeurs du VMB des EPN éventuellement plantées sur le PARM de la mine de Mont-Wright, à raison de 2 000 tiges×ha⁻¹). Ces données de rendement potentiel correspondraient à celles d'une plantation de 2 000 EPN×ha⁻¹ présentant un IQS 50 moyen d'environ 6,89.

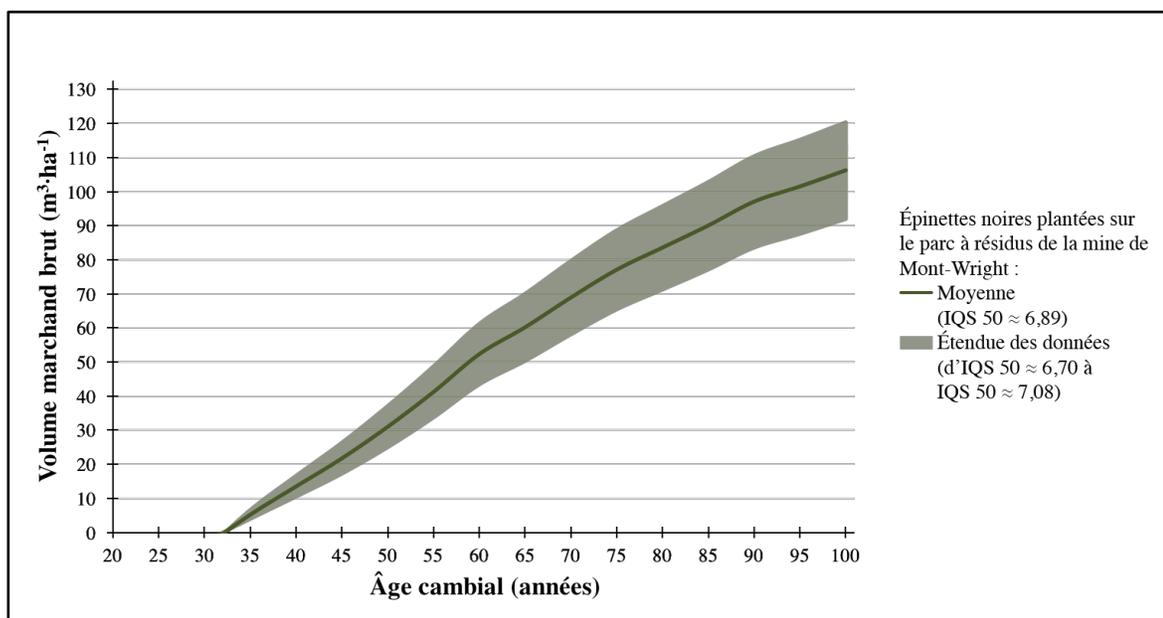


Figure 13 : Rendement potentiel projeté – sous forme de volume marchand brut (en $\text{m}^3 \times \text{ha}^{-1}$) – des éventuelles épinettes noires (EPN ; *Picea mariana* (Mill.) B.S.P.) plantées, à raison de $2\,000 \text{ tiges} \times \text{ha}^{-1}$, sur le parc à résidus de la mine de Mont-Wright en fonction de leur âge (en années). Ce rendement potentiel a été modélisé à partir des données de rendement potentiel projeté des éventuelles EPN plantées, à raison de $2\,000 \text{ tiges} \times \text{ha}^{-1}$, sur les deux sites étudiés à proximité de la mine de Mont-Wright où se trouvent les peuplements analogues de plantations et des facteurs de correction édaphique présentés dans la figure 11.

3.4 Comparaison du rendement des éventuelles plantations de pin gris sur les parcs à résidus de la mine Niobec et de l'ancienne mine du Lac Jeannine

Dans le cadre d'un éventuel reboisement des PARM de la mine Niobec et de l'ancienne mine du Lac Jeannine avec des FIG, les arbres éventuellement plantés à raison de $2\,000 \text{ tiges} \times \text{ha}^{-1}$, présenteraient, pour un âge cambial donné compris entre 20 et 100 ans, un rendement potentiel moyen plus important sur le PARM de la mine Niobec que sur celui de l'ancienne mine du Lac Jeannine (figure 14). À l'âge cambial de 50 ans, les éventuels FIG plantés, à raison de $2\,000 \text{ tiges} \times \text{ha}^{-1}$, sur le PARM de la mine Niobec possèderaient un rendement potentiel moyen projeté 1,58 fois plus élevé que celui des éventuels arbres de la même espèce plantés, à raison de $2\,000 \text{ tiges} \times \text{ha}^{-1}$, sur le PARM de l'ancienne mine du Lac

Jeannine, tandis qu'à l'âge cambial de 100 ans, ils en possèderaient un 1,30 fois plus élevé. En moyenne, le rendement potentiel moyen projeté des éventuels PIG plantés, à raison de 2 000 tiges×ha⁻¹, sur le PARM de la mine Niobec serait 1,64 fois supérieur à celui des éventuels arbres de la même espèce plantés, à raison de 2 000 tiges×ha⁻¹, sur le PARM de l'ancienne mine du Lac Jeannine.

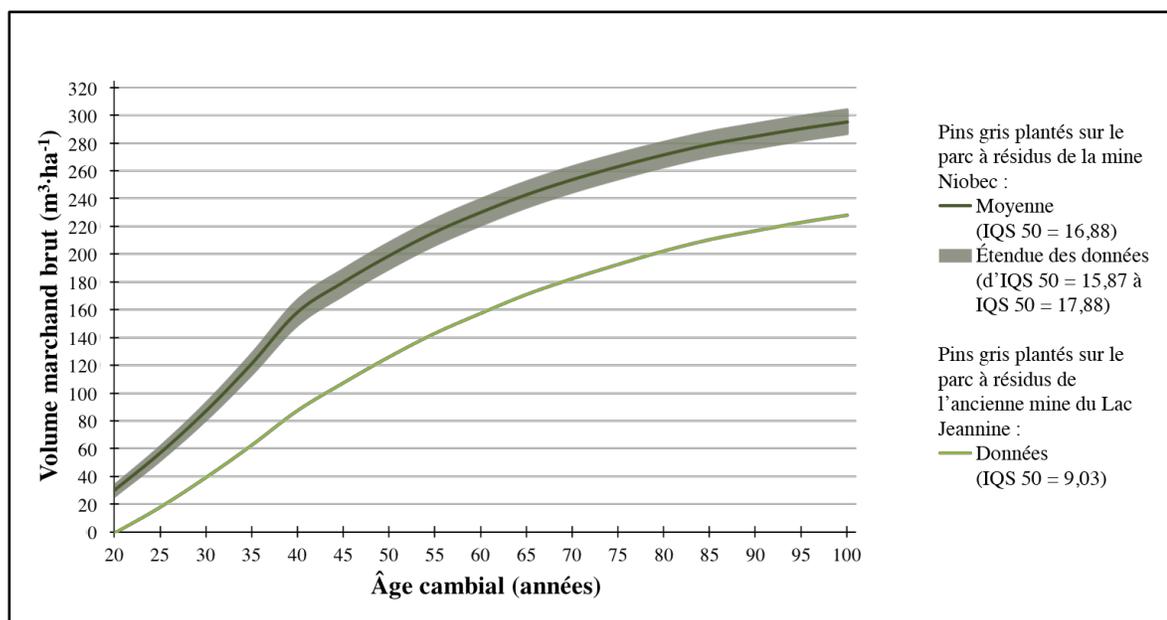


Figure 14 : Rendement potentiel projeté – sous forme de volume marchand brut (en m³×ha⁻¹) – des éventuels pins gris (*Pinus banksiana* Lamb.) plantés, à raison de 2 000 tiges×ha⁻¹, sur les parcs à résidus de la mine Niobec et de l'ancienne mine du Lac Jeannine en fonction de leur âge (en années).

3.5 Comparaison du rendement des éventuelles plantations de pin gris et d'épinette noire sur le parc à résidus de l'ancienne mine du Lac Jeannine

Dans le cadre d'un éventuel reboisement du PARM de l'ancienne mine du Lac Jeannine avec des PIG et des EPN, les éventuels PIG plantés à raison de 2 000 tiges×ha⁻¹, présenteraient, pour un âge cambial donné compris entre 20 et 100 ans, un rendement potentiel moyen plus important que les éventuelles EPN plantées à raison de 2 000 tiges×ha⁻¹.

¹ (figure 15). À l'âge cambial de 50 ans, les éventuels PIG plantés, à raison de 2 000 tiges×ha⁻¹, sur le PARM de l'ancienne mine du Lac Jeannine posséderaient un rendement potentiel moyen projeté 3,31 fois plus élevé que celui des éventuelles EPN plantées, à raison de 2 000 tiges×ha⁻¹, sur le même PARM tandis qu'à l'âge cambial de 100 ans, ils en posséderaient un 1,86 fois plus élevé. En moyenne, le rendement potentiel moyen projeté des éventuels PIG plantés, à raison de 2 000 tiges×ha⁻¹, sur le PARM de l'ancienne mine du Lac Jeannine serait 3,09 fois supérieur à celui des éventuelles EPN plantées, à raison de 2 000 tiges×ha⁻¹, sur le même PARM.

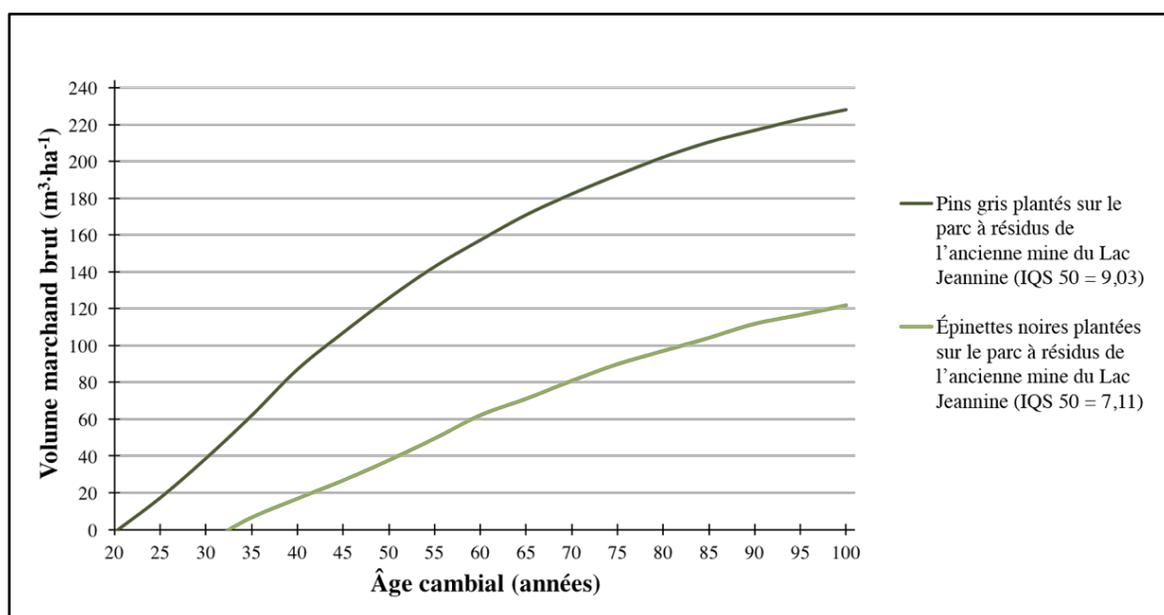


Figure 15 : Rendement potentiel projeté – sous forme de volume marchand brut (en m³×ha⁻¹) – des éventuels pins gris (*Pinus banksiana* Lamb.) et des éventuelles épinettes noires (*Picea mariana* (Mill.) B.S.P.) plantés, à raison de 2 000 tiges×ha⁻¹, sur le parc à résidus de l'ancienne mine du Lac Jeannine en fonction de leur âge (en années).

3.6 Comparaison du rendement des éventuelles plantations d'épinette noire sur les parcs à résidus de l'ancienne mine du Lac Jeannine et de la mine de Mont-Wright

Dans le cadre d'un éventuel reboisement des PARM de l'ancienne mine du Lac Jeannine et de la mine de Mont-Wright avec des EPN, les éventuels arbres plantés à raison de 2 000 tiges×ha⁻¹, présenteraient, pour un âge cambial donné compris entre 20 et 100 ans, un rendement potentiel moyen plus important sur le PARM de l'ancienne mine du Lac Jeannine que sur celui de la mine de Mont-Wright (figure 16). À l'âge cambial de 50 ans, les éventuelles EPN plantées, à raison de 2 000 tiges×ha⁻¹, sur le PARM de l'ancienne mine du Lac Jeannine posséderaient un rendement potentiel moyen projeté 1,23 fois plus élevé que celui des éventuels arbres de la même espèce plantés, à raison de 2 000 tiges×ha⁻¹, sur le PARM de la mine de Mont-Wright, tandis qu'à l'âge cambial de 100 ans, elles en posséderaient un 1,15 fois plus élevé. En moyenne, le rendement potentiel moyen projeté des éventuelles EPN plantées, à raison de 2 000 tiges×ha⁻¹, sur le PARM de l'ancienne mine du Lac Jeannine serait 1,24 fois supérieur à celui des éventuels arbres de la même espèce plantés, à raison de 2 000 tiges×ha⁻¹, sur le PARM de la mine de Mont-Wright.

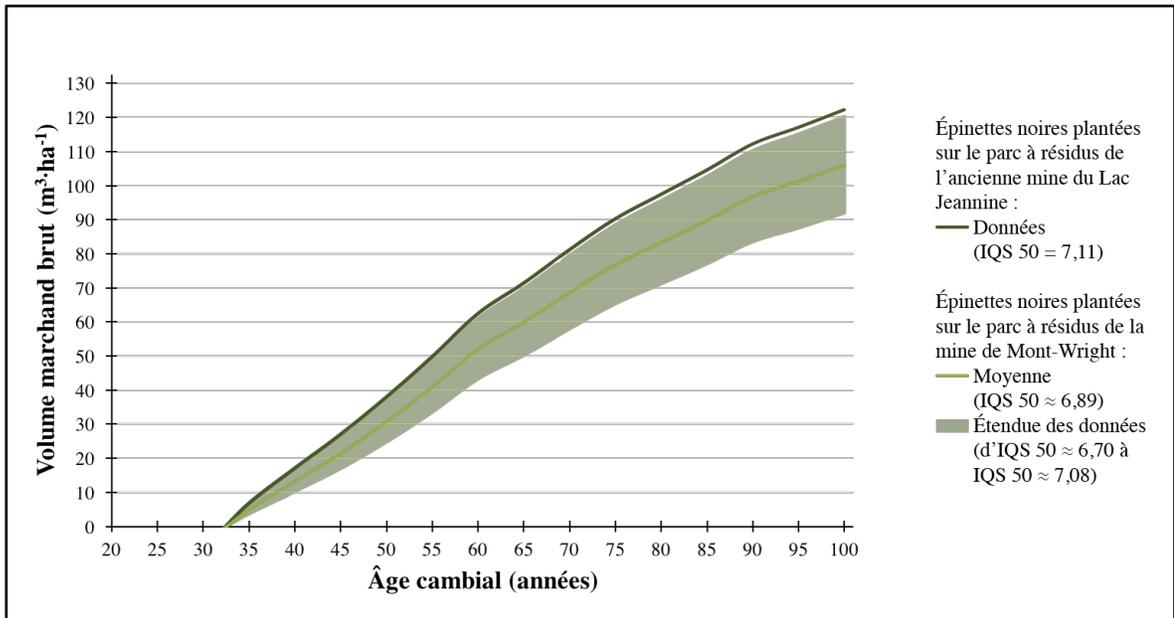


Figure 16 : Rendement potentiel projeté – sous forme de volume marchand brut (en $\text{m}^3 \times \text{ha}^{-1}$) – des éventuelles épinettes noires (*Picea mariana* (Mill.) B.S.P.) plantées, à raison de 2 000 tiges $\times \text{ha}^{-1}$, sur les parcs à résidus de l'ancienne mine du Lac Jeannine et de la mine de Mont-Wright en fonction de leur âge (en années).

CHAPITRE 4

DISCUSSION

4.1 Croissance et rendement de plantations sur parcs à résidus miniers restaurés au Québec

4.1.1 Croissance et rendement des pins gris plantés sur le parc à résidus de la mine Niobec

Les résultats obtenus pour les PIG issus des deux plantations présentes sur les digues du PARM de la mine Niobec montrent que, malgré les conditions hydriques et nutritionnelles généralement difficiles qu'offrent les résidus miniers à la végétation (Daniels et Zipper 2010 ; Sheoran *et al.* 2010), une croissance des PIG mis en terre sur les PARM de la mine Niobec était observable et donc possible. Cette croissance a pu notamment être affectée par certaines conditions édaphiques exceptionnelles de la région dans laquelle est située la mine Niobec. En effet, cette dernière se trouve sur le complexe alcalin de Saint-Honoré et, plus précisément, sur la partie du complexe dominée par la principale roche source de niobium, à savoir la carbonatite dolomitique riche en apatite (Brunette 2017 ; Néron *et al.* 2018 ; Desjardins 2022). Ainsi, le gisement exploité par la minière dans le but d'extraire le niobium, est composé, en moyenne, d'environ 73 % de minéraux de la sous-classe des carbonates, majoritairement de la dolomite et d'environ 9 % d'apatite qui est un minéral de la sous-classe des phosphates (Frédéric Gagnon, communication personnelle 2020). La mine Niobec récupérant, actuellement, uniquement le niobium, les minéraux décrits ci-dessus sont rejetés dans les PARM et peuvent jouer un rôle dans la croissance des arbres utilisés pour mettre en végétation ces parcs. La dolomite et l'apatite peuvent notamment affecter positivement cette

croissance. La première en agissant comme un régulateur de pH du milieu (Rikala et Jozefek 1990 ; Rastija *et al.* 2014) et en fournissant des nutriments bénéfiques pour la croissance des végétaux, en particulier du calcium, du magnésium et du phosphore (Moore *et al.* 2000 ; Rastija *et al.* 2014). La seconde en apportant du phosphore à long terme en présence de mycorhizes adéquates (Wallander *et al.* 1997 ; Vanden Bossche 1999 ; Wallander 2000).

La plantation PLP01 étant située à seulement 20 km au nord de la mine Niobec, il est possible que les PIG la composant aient également bénéficié des conditions édaphiques exceptionnelles du complexe alcalin de Saint-Honoré. Concernant les conditions climatiques, au niveau de la région dans laquelle se trouve PLP01, la température annuelle moyenne globale est plus basse de 1,5 °C et la saison de croissance globale est plus courte de 14 jours par rapport à la région dans laquelle se situe la mine Niobec (données récoltées aux stations météorologiques de Shipshaw et de Chute-aux-Galets entre 1952 et 1961, Gouvernement du Canada 2022a ; Gouvernement du Canada. 2022d). Cependant, les PIG du PARM de la mine Niobec sont plantés au sommet des digues, formées par les résidus, mesurant environ 30 m de hauteur (Gagnon 2018). Ainsi, localement, ils sont probablement plus exposés au vent et subissent possiblement un microclimat plus sec que les PIG de PLP01 qui sont davantage protégés puisqu'ils se trouvent en fond de vallée, entourés d'autres arbres (MFFP 2017). Cela peut donc expliquer, en partie, pourquoi la croissance des PIG plantés sur le site naturel PLP01 était significativement supérieure à celle des arbres de la même espèce mis en terre sur le PARM de la mine Niobec.

Malgré cela, la croissance des PIG plantés sur le PARM de la mine Niobec restait toutefois significativement plus élevée que celle d'arbres de la même espèce mis en terre sur des sites naturels localisés plus loin de la mine et ne bénéficiant donc pas des conditions

édaphiques exceptionnelles du complexe alcalin de Saint-Honoré. L'absence de ces dernières explique, en partie, pourquoi les PIG des plantations PLP03-04, situées à 60 km au nord-ouest de la mine Niobec, possédaient un accroissement en volume cumulé significativement inférieur à celui des PIG mis en terre sur le parc. Les conditions climatiques sont également légèrement différentes entre l'endroit où se trouvent les plantations PLP03-04 et celui où se trouve la mine Niobec. En moyenne, au niveau de cette dernière, la température est plus haute de 0,9 °C, les précipitations annuelles sous forme de pluie sont supérieures de 200,5 mm et la saison de croissance est plus courte de 3 jours (données récoltées aux stations météorologiques de Shipshaw et de Chute-à-la-Savane entre 1952 et 1961, Gouvernement du Canada 2022a ; Gouvernement du Canada 2022e). Dans l'ensemble, les conditions climatiques sont donc plus difficiles pour la croissance des PIG composant PLP03-04 (Way et Oren 2010).

Ainsi, l'accroissement en volume cumulé des PIG mis en terre sur le PARM de la mine Niobec était comparable à celui d'arbres de la même espèce plantés sur des sites forestiers naturels au Québec. Dépendamment des conditions édaphiques et climatiques de ces sites, les PIG plantés sur le PARM de la mine Niobec présentaient une croissance supérieure ou inférieure à celle de PIG plantés sur des sites naturels. Il en est de même pour leur IQS 50 et leur rendement projeté – sous forme de VMB ; pour une densité de 2 000 tiges×ha⁻¹. En effet, au Québec, les sites naturels sur lesquels 2 000 PIG×ha⁻¹ sont mis en terre possèdent, généralement, un IQS 15 compris entre 3 et 8, qui correspond à un IQS 50 compris entre 11 et 27 (MRN 2000). L'IQS 50 moyen des plantations actuellement en place sur le PARM de la mine Niobec étant de 16,88, il était légèrement inférieur à l'IQS 50 médian des plantations québécoises de 2 000 PIG×ha⁻¹. Le rendement – sous forme de VMB – des

arbres a été projeté à partir de l'IQS 50 du site d'étude. C'est pourquoi, dans le cadre d'un éventuel reboisement des PARM de la mine Niobec à l'aide de PIG mis en terre à raison de 2 000 tiges×ha⁻¹, le rendement des PIG serait également comparable à celui d'arbres plantés de la même espèce, à raison de la même densité, sur des sites naturels au Québec. Plus précisément, il correspondrait à un rendement légèrement inférieur au rendement médian des plantations de 2 000 PIG×ha⁻¹ sur des sites naturels québécois.

4.1.2 Croissance et rendement des arbres plantés sur le parc à résidus de l'ancienne mine du Lac Jeannine

4.1.2.1 Croissance et rendement des pins gris plantés sur le parc à résidus de l'ancienne mine du Lac Jeannine

Les résultats obtenus pour les PIG plantés à très petite échelle, en 1980, sur le PARM de l'ancienne mine du Lac Jeannine montrent qu'une croissance des PIG sur ce PARM était observable et donc possible, et ce, malgré les conditions édaphiques et climatiques du site d'étude qui peuvent être difficiles pour la survie et l'accroissement de la végétation.

Les conditions édaphiques du PARM de l'ancienne mine du Lac Jeannine sont difficiles pour la croissance des PIG car, comme la majorité des résidus miniers, ceux de l'ancienne mine offrent un substrat une faible teneur en matière organique et en éléments nutritifs (Daniels et Zipper 2010 ; Sheoran *et al.* 2010). De plus, l'humus présent à la surface du PARM est un mor en développement. Ainsi, il possède une capacité de rétention d'eau plus faible que l'humus, davantage développé, présent à la surface du sol du site naturel étudié à proximité du PARM de l'ancienne mine du Lac Jeannine (Prescott et Maynard 2000 ;

Berner *et al.* 2013). L'ensemble des conditions édaphiques particulières du PARM expliquent pourquoi les PIG plantés au niveau de l'ancienne mine du Lac Jeannine possédaient une croissance qui tendait à être inférieure à celle d'arbres de la même espèce se trouvant dans le peuplement analogue de plantation subissant des conditions climatiques semblables à celles du PARM de l'ancienne mine. Il est à noter que l'accroissement des PIG sur ces deux sites était significativement influencé par l'âge cambial mais ne s'est pas révélé l'être par l'endroit où les PIG se trouvaient, ni par l'interaction entre l'âge cambial et le site. Cependant, la tendance décrite précédemment demeurait marquée et la puissance de l'ANOVAR, limitée par un échantillon de 4 arbres et 35 années de croissance seulement, doit être ici mise en cause. Il est ainsi justifié, dans le cadre de cette étude, que la modélisation du rendement potentiel – sous forme de VMB – des éventuels PIG plantés sur le PARM de l'ancienne mine du Lac Jeannine, à raison de 2 000 tiges×ha⁻¹, soit réalisée indépendamment des données du milieu naturel adjacent. Tel que discuté ci-après, cela était plus prudent pour ne pas surestimer la productivité du site d'étude et la possible séquestration de GES en résultant.

L'IQS 50 et le rendement potentiel – sous forme de VMB – des éventuels PIG plantés, à raison de 2 000 tiges×ha⁻¹, sur le PARM de l'ancienne mine du Lac Jeannine, ont donc été respectivement calculé et projeté. L'IQS 50 alors obtenu étant de 9,03, le rendement potentiel modélisé des PIG plantés sur le PARM de l'ancienne mine était inférieur au rendement de PIG en plantations québécoises (MRN 2000). Ce rendement était, toutefois, comparable à celui de PIG en peuplements naturels purs et réguliers au Québec et, plus particulièrement, au rendement – sous forme de VMB – de PIG issus d'une régénération naturelle se trouvant sur des sites forestiers québécois présentant un IQS 50 de 18 et une densité ligneuse relative

entre faible et moyenne (Pothier et Savard 1998). Ainsi, la productivité du site d'étude correspondait à celle de sites forestiers abritant des PIG situés, par exemple, dans les régions administratives des Laurentides (Québec, Canada) et de Lanaudière (Québec, Canada) (MFFP 2017).

En comparaison avec les éventuels PIG plantés sur le PARM de la mine Niobec, les éventuels PIG mis en terre sur le PARM de l'ancienne mine du Lac Jeannine possédaient un rendement potentiel projeté – sous forme de VMB ; pour une densité de 2 000 tiges×ha⁻¹ – moins élevé pouvant être expliqué par des conditions édaphiques et climatiques plus difficiles sur le PARM de l'ancienne mine. Premièrement, la composition des résidus est différente entre les deux sites d'étude. Ainsi, contrairement aux PIG mis en terre sur le PARM de la mine Niobec, les PIG plantés sur le PARM de l'ancienne mine du Lac Jeannine ne bénéficient pas de la présence de la dolomite et de l'apatite pour croître. Deuxièmement, l'ancienne mine du Lac Jeannine est située au nord du Québec, à environ 430 km au nord de la mine Niobec, et il y fait plus froid, la saison de croissance y est plus courte et le couvert de neige y est présent plus longtemps. En effet, au niveau de la mine Niobec, la température annuelle moyenne est de 2,8 °C, la saison de croissance dure, en moyenne, 159 jours et le couvert de neige est, généralement, présent de la mi-novembre à la mi-avril (Gouvernement du Canada 2022a) tandis qu'au niveau de l'ancienne mine du Lac Jeannine, les mêmes paramètres climatiques sont, respectivement, de - 2,4 °C, 116 jours et présent de la fin octobre à la mi-mai (Gouvernement du Canada 2022c).

4.1.2.2 Croissance et rendement des épinettes noires plantées sur le parc à résidus de l'ancienne mine du Lac Jeannine

Les résultats obtenus pour les EPN plantées à très petite échelle, en 1980, sur le PARM de l'ancienne mine du Lac Jeannine montrent qu'une croissance des EPN sur ce PARM était observable et donc possible.

Cette croissance et celle des EPN se trouvant dans le peuplement analogue de plantation étudié à proximité du PARM de l'ancienne mine du Lac Jeannine étaient significativement influencées par l'âge cambial mais ne l'étaient pas par l'endroit où les arbres se trouvaient, ni par l'interaction entre l'âge cambial et le site. Cependant, les EPN plantées sur le PARM de l'ancienne mine du Lac Jeannine présentaient un accroissement en volume cumulé qui semblait être moins prononcé que celui des EPN se trouvant sur un site naturel à proximité du parc et subissant les mêmes conditions climatiques que les arbres du PARM de l'ancienne mine. Cette tendance demeurait marquée et la puissance de l'ANOVAR, limitée par un échantillon de 4 arbres et 29 années de croissance seulement, doit être ici mise en cause. Il est ainsi justifié, dans le cadre de cette étude, de modéliser le rendement potentiel – sous forme de VMB – des éventuelles EPN plantées sur le PARM de l'ancienne mine du Lac Jeannine, à raison de 2 000 tiges×ha⁻¹, indépendamment des données du milieu naturel adjacent. Cette modélisation était plus prudente afin de ne pas surestimer la productivité du PARM de l'ancienne mine du Lac Jeannine, mais également celle du PARM de la mine de Mont-Wright, qui a été modélisée à partir des données obtenues pour les EPN du PARM de l'ancienne mine du Lac Jeannine, ainsi que la séquestration de carbone potentielle en résultant. Ainsi, la tendance observée s'explique par le fait que le sol de l'ancienne mine du Lac Jeannine offre un substrat avec une très faible capacité de rétention

d'eau, l'humus n'étant pas très développé à sa surface, et pauvre en éléments nutritifs et en matière organique (Prescott et Maynard 2000 ; Daniels et Zipper 2010 ; Sheoran *et al.* 2010 ; Berner *et al.* 2013). Ces caractéristiques édaphiques spécifiques aux PARM rendent la survie et la croissance ligneuses plus difficiles.

Afin de projeter le rendement potentiel – sous forme de VMB – des éventuelles EPN plantées, à raison de 2 000 tiges×ha⁻¹, sur le PARM de l'ancienne mine du Lac Jeannine, l'IQS 50 des EPN mises en terre sur ce parc a d'abord dû être calculé. Cet IQS 50 étant de 7,11, il était inférieur aux IQS 50 habituellement obtenus pour les EPN en plantations au Québec qui sont compris entre 9,5 et 18,5 (MRN 2000). Ainsi, le rendement des éventuelles EPN plantées sur le PARM de l'ancienne mine était également inférieur à celui de plantations québécoises d'EPN. Il correspondait, cependant, à un rendement d'EPN en peuplements naturels, purs et réguliers. Plus précisément, il était comparable au rendement – sous forme de VMB – obtenu pour des EPN issues d'une régénération naturelle se trouvant sur des sites forestiers québécois présentant un IQS 50 de 15 et une densité ligneuse relative faible (Pothier et Savard 1998). Ainsi, la productivité du site d'étude correspondait à celle de sites forestiers abritant des EPN situés, par exemple, dans la région administrative du Saguenay-Lac-Saint-Jean (Québec, Canada) (MFFP 2017).

En comparaison avec les éventuels PIG plantés sur le PARM de l'ancienne mine du Lac Jeannine, les éventuelles EPN mises en terre sur ce même PARM possédaient un rendement projeté – sous forme de VMB ; pour une densité de 2 000 tiges×ha⁻¹ – moins élevé pouvant être expliqué par des sensibilités différentes aux conditions édaphiques sèches du PARM de l'ancienne mine. En effet, les deux espèces se retrouvent généralement sur des substrats acides, sont capables de se développer dans des sols relativement pauvres en

nutriments et répondent de façon similaire aux conditions climatiques mais, les EPN sont plus sensibles aux conditions édaphiques xériques (Viereck 1983 ; Viereck et Johnston 1990 ; Hébert *et al.* 2006). Or, les résidus composant les PARM présentent un sol avec une très faible capacité de rétention d'eau. Ainsi, dans le cadre d'éventuels reboisements de PARM possédant des conditions édaphiques similaires à celles du PARM de l'ancienne mine du Lac Jeannine et étant situés dans des régions où les essences indigènes sont des PIG et des EPN, il serait préférable de planter des PIG. En effet, sous des conditions climatiques et édaphiques identiques, le rendement des PIG – sous forme de VMB – est supérieur à celui des EPN. Ainsi, les PIG séquestreraient, hypothétiquement, davantage de carbone.

4.1.3 Croissance et rendement des éventuelles épinettes noires plantées sur le parc à résidus de la mine de Mont-Wright

Sur le PARM de la mine de Mont-Wright, il n'y a, pour le moment, pas de plantation suffisamment vieilles pour y évaluer directement le potentiel de croissance. L'accroissement en volume total cumulé et le rendement potentiel – sous forme de VMB – des éventuelles EPN plantées, à raison de 2 000 tiges×ha⁻¹, sur ce PARM ont donc été modélisés à partir des données des EPN se trouvant sur le PARM de l'ancienne mine du Lac Jeannine, à proximité du PARM de l'ancienne mine du Lac Jeannine et à proximité du PARM de la mine de Mont-Wright. Comme décrit par les postulats 1 et 3, le ratio de croissance (ou de rendement) entre les EPN plantées sur le PARM de l'ancienne mine du Lac Jeannine et celles se trouvant sur un site naturel à proximité de ce parc est représentatif de l'effet, sur la croissance (ou le rendement) des arbres, du substrat offert par le PARM de l'ancienne mine du Lac Jeannine, mais aussi par le PARM de la mine de Mont-Wright, car la composition de leurs résidus est

similaire (Gambles 2011). Ces derniers ont, en effet, été générés par l'exploitation du fer. Le sol des deux PARM est neutre (Juge et Cossette 2015a ; Lamontagne 2016) et est un Technosol principalement composé de silice (IUSS Working Group 2015). Les postulats 2 et 4, quant à eux, stipulent que le ratio de croissance (ou de rendement) entre les EPN croissant sur les sites étudiés à proximité des PARM de l'ancienne mine du Lac Jeannine et de la mine de Mont-Wright, qui sont éloignés de 150 km mais comparables sur le plan édaphique, est représentatif de l'effet, sur la croissance (ou le rendement) des arbres, de la différence climatique existant entre les deux localités.

Il est donc possible d'observer que l'accroissement potentiel en volume cumulé des éventuelles EPN plantées sur le PARM de la mine de Mont-Wright, ainsi projeté, tendait à être moins prononcé que celui des EPN se trouvant dans les peuplements analogues de plantations étudiés à proximité de ce parc. Cette différence correspondait à celle observée entre les EPN plantées sur le PARM de l'ancienne mine du Lac Jeannine et les EPN se trouvant dans le peuplement analogue de plantation étudié à proximité de ce parc. Elle représente, d'après les postulats 1 et 3, l'effet des conditions édaphiques particulières du PARM de l'ancienne mine du Lac Jeannine et, par conséquent celles du PARM de la mine de Mont-Wright, sur l'accroissement des EPN. En comparaison avec les sols des sites étudiés près des deux PARM, le sol de ces derniers possède une très faible capacité de rétention d'eau et de faibles teneurs en éléments nutritifs et en matière organique (Daniels et Zipper 2010 ; Sheoran *et al.* 2010) qui affectent négativement la croissance des EPN.

Il est également possible d'observer que le rendement potentiel – sous forme de VMB – des éventuelles EPN plantées, à raison de 2 000 tiges×ha⁻¹, sur le PARM de la mine de Mont-Wright, semblait inférieur à celui des EPN plantées, à raison de 2 000 tiges×ha⁻¹, sur

le PARM de l'ancienne mine du Lac Jeannine. Ces différences correspondaient à celles observées entre les EPN étudiées sur un site à proximité de l'ancienne mine du Lac Jeannine et sur des sites à proximité de la mine de Mont-Wright. Elles représentent, selon les postulats 2 et 4, la différence de climat entre l'ancienne ville de Gagnon et Fermont. Les conditions climatiques au niveau du PARM de la mine de Mont-Wright sont plus difficiles pour la croissance ligneuse que celle au niveau du PARM de l'ancienne mine du Lac Jeannine. Bien que la durée de la saison de croissance soit presque similaire entre les deux parcs (118 jours pour le PARM de la mine de Mont-Wright contre 116 jours pour le PARM de l'ancienne mine du Lac Jeannine), il fait notamment plus froid sur le premier (Gouvernement du Canada 2022b). En effet, la température annuelle moyenne à Fermont est de - 3,5 °C tandis que celle au niveau de l'ancienne ville de Gagnon est de - 2,4 °C (Gouvernement du Canada 2022f). Il a aussi été possible d'observer, lors de la récolte des données sur les sites d'étude, qu'au niveau du PARM de la mine de Mont-Wright, il y avait beaucoup de vent. Toutes ces conditions climatiques affectent négativement la croissance des EPN (Way et Oren 2010).

L'IQS 50 moyen de 6,89 et le rendement potentiel – sous forme de VMB – des éventuelles EPN plantées, à raison de 2 000 tiges×ha⁻¹, sur le PARM de la mine de Mont-Wright, respectivement calculé et projeté, étaient inférieurs à ceux d'EPN en plantations québécoises (MRN 2000). Le rendement était, toutefois, comparable à celui d'EPN en peuplements naturels purs et réguliers au Québec. Plus particulièrement, il correspondait au rendement – sous forme de VMB – d'EPN issues d'une régénération naturelle se trouvant sur des sites forestiers québécois présentant, au minimum, un IQS 50 de 12 associé à une densité ligneuse relative moyenne et, au maximum, un IQS 50 de 15 associé à une densité ligneuse relative faible (Pothier et Savard 1998). Ainsi, la productivité du site

d'étude correspondait à celle de sites forestiers abritant des EPN situés, par exemple, dans la région administrative du Saguenay-Lac-Saint-Jean (Québec, Canada) (MFFP 2017).

4.2 Nécessité de créer des courbes de rendement conservatrices et adaptées aux parcs à résidus miniers

De par leur emplacement géographique, parfois au-delà de la limite territoriale des forêts attribuables, et la spécificité du gisement exploité sur lequel ils sont établis, les sites miniers possèdent, tel que discuté précédemment, des conditions édaphiques et climatiques qui sont propres à chacun d'entre eux. En effet, bien que cela n'ait pas été démontré dans le cadre de la présente étude, ces conditions semblent être différentes d'un PARM à l'autre mais également, d'un PARM à un site naturel situé à proximité. Le rendement ligneux étant dépendant, entre autres, des caractéristiques du sol et du climat, il n'était pas envisageable d'utiliser telles quelles les courbes de rendement du MRN afin d'estimer le rendement de potentielles plantations mises en terre sur les PARM étudiés dans le cadre d'un reboisement de ces parcs. Ces courbes sont construites pour des peuplements se trouvant sur des sites naturels québécois et ne sont donc pas ajustées pour les peuplements plantés sur des PARM. Ainsi, dans le but d'évaluer au mieux ce que les sites miniers à l'étude peuvent séquestrer en carbone et rapporter, éventuellement, en tant que crédits compensatoires sur le marché du carbone, il était primordial de modéliser des courbes de rendement adaptées à chaque PARM étudié en prenant en compte ses spécificités édaphiques et climatiques.

Puisque les conditions édaphiques et climatiques des PARM semblent différer de celles des autres sites québécois et que les efforts de mise en végétation de ces derniers avec des arbres sont rares sinon récents, il existe, aujourd'hui, de nombreuses incertitudes concernant

l'impact des conditions du sol et du climat des PARM sur la croissance et le rendement ligneux. Par exemple, il est difficile à l'heure actuelle de connaître les conséquences de l'abrasion du vent, particulièrement présent sur le PARM de la mine de Mont-Wright, sur la survie et la croissance ligneuses, et notamment sur la croissance ligneuse juvénile. Cependant, tel que démontré par un récent essai avec le PIG sur le PARM de Mont-Wright, les résultats de la survie et de la croissance ligneuses semblent prometteurs, si un amendement additionnel adéquat est fait au moment de l'établissement de la plantation (Renald 2021). Il est également compliqué d'évaluer comment le microbiote du sol des PARM va évoluer. Ainsi, l'enjeu du présent projet a été de construire des courbes de rendement assez conservatrices et adaptées aux PARM étudiés pour ne pas surestimer un rendement ligneux potentiel et, à terme, une éventuelle séquestration du carbone, tout en ayant peu de matériel biologique à disposition.

Afin de créer les courbes de rendement les plus conservatrices possible, tout au long de ce projet, les décisions ont été prises dans l'optique de ne pas surestimer le rendement ligneux potentiel. C'est pour cette raison que, comme exposé précédemment, les rendements potentiels – sous forme de VMB – des éventuels PIG et des éventuelles EPN plantés sur le PARM de l'ancienne mine du Lac Jeannine, à raison de 2 000 tiges×ha⁻¹, ont été modélisés bien qu'une différence significative entre leur croissance et celle des arbres se trouvant sur un site naturel à proximité de l'ancienne mine n'ait pas été démontrée. En effet, seule une tendance était observée. Ensuite, l'approximation réalisée par le MRN (2000) afin de mettre à jour les tables de rendement du manuel d'aménagement forestier, utilisées pour construire des modèles permettant d'obtenir le rendement des éventuels arbres plantés sur les PARM selon leur IQS spécifique, était basée sur les données d'arbres issus d'une régénération

naturelle. Ces derniers ayant, généralement, une croissance et un rendement inférieurs à ceux d'arbres en plantations, l'utilisation de cette approximation était cohérente. La forme choisie des modèles, créés à partir des tables de rendement du MRN (2000), était celle qui permettait d'obtenir, au final, le rendement le moins surestimé. C'est pourquoi, un modèle linéaire a été utilisé pour estimer le rendement des PIG, tandis qu'un modèle quadratique a été utilisé pour estimer celui des EPN. Avec les modèles ainsi construits, il était possible d'observer que plus l'âge des plantations était élevé, plus le rendement projeté pour les grands IQS était mal ajusté (non montré dans ce mémoire). Cependant, tous les IQS 50 des plantations étudiées avoisinaient les plus petits IQS 50, pour lesquels le rendement était mieux ajusté. Il a donc été possible d'évaluer le rendement des potentiels arbres en plantations sur les PARM à l'aide des modèles cités ci-dessus (se référer à l'annexe 4 pour comparer les rendements ligneux approximés par le MRN en 2000 avec ceux obtenus à partir des modèles construits dans la présente étude). Enfin, plus l'âge des peuplements augmente, plus la mortalité explique leur rendement. Or, il est impossible, à l'heure actuelle, de savoir comment la mortalité ligneuse sur les PARM se compare à celle sur les sites naturels. C'est pourquoi, le rendement des éventuelles plantations sur les PARM étudiés a été modélisé jusqu'à un âge cambial de 100 ans, alors qu'il aurait été possible de l'estimer jusqu'à 140 ans pour les PIG et jusqu'à 200 ans pour les EPN.

En 2021, une actualisation des tables de rendement des PIG et des EPN en plantations construites, respectivement, à partir des modèles de Bolghari et Bertrand (1984) et de Prégent *et al.* (1996) a été réalisée par Auger et Ward. Cette actualisation a été effectuée avec des données provenant de deux réseaux de placettes permanentes de la Direction de la recherche forestière (Auger et Ward 2021). Ainsi, les courbes de rendement construites par Auger et

Ward ont été développées à partir de plantations âgées jusqu'à 59 ans pour le PIG et 55 ans pour l'EPN (Auger et Ward 2021). Ces courbes présentent donc probablement des rendements potentiels plus près des rendements réels qu'il est possible d'obtenir pour des plantations québécoises. Comme montré par l'annexe 4, les rendements potentiels des PIG et des EPN modélisés par Auger et Ward sont plus conservateurs, avant 59 ans pour les PIG et avant 55 ans pour les EPN, que ceux modélisés dans la présente étude. À l'inverse, les rendements potentiels établis dans le présent projet tendent à être plus conservateurs que ceux d'Auger et Ward, au-delà de 59 ans pour les PIG et de 55 ans pour les EPN. À l'avenir, si un projet similaire à celui-ci devait être réalisé, il serait donc intéressant d'utiliser les courbes développées par Auger et Ward pour établir les modèles permettant de prédire le rendement potentiel de PIG et d'EPN en plantations sur les PARM restaurés au Québec, tout en sachant que les rendements ainsi modélisés pourraient être supérieurs aux rendements réels des plantations, notamment au-delà de 59 ans pour les PIG et de 55 ans pour les EPN.

CHAPITRE 5

CONCLUSION

Lorsqu'aucun effort de mise en végétation avec des espèces ligneuses n'est effectué sur les PARM, à leur fin de vie utile, ils deviennent des terrains non forestiers improductifs puisque, dans la plupart des cas, les conditions édaphiques et climatiques des PARM sont trop rudes pour qu'une régénération ligneuse naturelle soit envisageable, du moins à court et moyen termes. Pourtant, s'ils sont reboisés, de tels espaces peuvent présenter de nombreux avantages, notamment environnementaux et écologiques. Étant donné le contexte climatique actuel, ces derniers sont, aujourd'hui, non négligeables.

Dans le cadre du présent projet, l'aspect le plus important d'une éventuelle mise en végétation des PARM de la mine Niobec, de l'ancienne mine du Lac Jeannine et de la mine de Mont-Wright à l'aide d'arbres est la capacité de ces derniers à séquestrer du carbone d'une manière supplémentaire par rapport au CNA. Tel que montré dans cette étude, la croissance des arbres plantés sur ces parcs est parfois modeste en comparaison avec la croissance attendue des arbres en plantations forestières. Toutefois, la densité arborescente choisie permettrait d'obtenir des rendements ligneux intéressants et d'ainsi séquestrer assez de carbone pour, potentiellement, rapporter des crédits carbone compensatoires à Niobec Inc. et ArcelorMittal. Afin d'estimer l'éventuel bénéfice du stockage biologique du carbone et ce que les PARM étudiés pourraient rapporter en tant que crédits compensatoires sur le marché du carbone s'ils sont reboisés, il convient de quantifier les taux de GES pouvant être émis lors de leur mise en végétation avec des espèces ligneuses ainsi que leur séquestration de carbone potentielle. Or, pour évaluer la séquestration du carbone à long terme des éventuelles

plantations sur les trois sites miniers étudiés, à l'aide du MBC-SFC3, il est, dans un premier temps, nécessaire de construire les courbes de rendement potentiel de ces éventuelles plantations, le rendement ligneux étant le principal intrant du modèle. Ainsi, dans la présente étude, des courbes de rendement de PIG et d'EPN, adaptées à chacun des PARM du projet, soit celui de la mine Niobec, celui de l'ancienne mine du Lac Jeannine et celui de la mine de Mont-Wright, ont été créées pour la première fois. L'étape initiale permettant de répondre au besoin de Niobec Inc. et d'ArcelorMittal, qui souhaitent que les bénéfices de la séquestration biologique du carbone et la faisabilité d'une mise en végétation de leur PARM avec des espèces ligneuses soient évalués, est donc accomplie.

BIBLIOGRAPHIE

- Asensio V, Vega F, Andrade M et Covelo E. 2013. Tree vegetation and waste amendments to improve the physical condition of copper mine soils. *Chemosphere*, 90 : 603-610.
- Aubertin M, Bussière B, Bernier L, Chapuis R, Julien M, Belem T, Simon R, Mbonimpa M, Benzaazoua M et Li L. 2002. La gestion des rejets miniers dans un contexte de développement durable et de protection de l'environnement. Dans : Congrès annuel de la Société canadienne de génie civil, Montréal, 5 au 8 juin 2002. Société canadienne de génie civile, Montréal, p. 1-10.
- Beaudet P, Grenier M, Giroux M et Girard V. 2004. Description statistique des propriétés chimiques des sols minéraux du Québec. Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation, Direction du développement durable et de l'environnement, Québec, 108 p.
- Berner A, Böhm H, Brandhuber R, Braun J, Brede U, Colling-von Roesgen JL, Demmel M, Dierauer H, Ewald B, Fließbach A, Fuchs J, Gattinger A, Heß J, Hülsbergen KJ, Köchli M, Kolbe H, Koller M, Mäder P, Müller A, Patzel N, Pfiffner L, Schmidt H, Weller S et Wild M. 2013. Les principes de la fertilité des sols : construire sa relation avec le sol. Institut de recherche de l'agriculture biologique FiBL et Bio Suisse, Frick et Bâle, 32 p.
- Bolghari HA et Bertrand V. 1984. Tables préliminaires de production des principales essences résineuses plantées dans la partie centrale du sud du Québec. Ministère de l'Énergie et des Ressources, Service de la recherche (Terres et Forêts), Québec, 392 p.
- Boucher J-F, Tremblay P, Gaboury S et Villeneuve C. 2012. Can boreal afforestation help offset incompressible GHG emissions from Canadian industries?. *Process Safety and Environmental Protection*, 90 : 459-466.
- Bridge G. 2004. Contested terrain: mining and the environment. *Annual Review of Environment and Resources*, 29 : 205-259.
- Brunette D. 2017. Géochimie des carbonates de la carbonatite de Saint-Honoré. Projet de fin d'études, Université du Québec à Chicoutimi, Chicoutimi, 39 p.
- Carlton JS, Perry-Hill R, Huber M et Prokopy LS. 2015. The climate change consensus extends beyond climate scientists. *Environmental Research Letters*, 10 : 1-12.
- Cook J, Oreskes N, Doran PT, Anderegg WRL, Verheggen B, Maibach EW, Carlton JS, Lewandowsky S, Skuce AG, Green SA, Nuccitelli D, Jacobs P, Richardson M, Winkler B, Painting R et Rice K. 2016. Consensus on consensus: a synthesis of consensus estimates on human-caused global warming. *Environmental Research Letters*, 11 : 1-7.
- Cooke JA et Johnson MS. 2002. Ecological restoration of land with particular reference to the mining of metals and industrial minerals: a review of theory and practice. *Environmental Reviews*, 10 : 41-71.

- Daniels WL et Zipper CE. 2010. Creation and management of productive mine soils. Virginia Cooperative Extension, 460 : 121.
- Déry Bouchard CA. 2014. La qualité des tiges d'épinette noire et de pin gris en plantation. Mémoire de maîtrise, Université du Québec à Chicoutimi, Chicoutimi, 53 p.
- Desjardins D. 2022. Étude pétrographique et géochimique des prochloros de la carbonatite du complexe alcalin de Saint-Honoré, Saguenay, Québec. Mémoire de maîtrise, Université du Québec à Chicoutimi, Chicoutimi, 161 p.
- Doran PT et Zimmerman MK. 2009. Examining the scientific consensus on climate change. Eos Transactions American Geophysical Union, 90 : 22-23.
- Faubert P, Lemay-Bélisle C, Bertrand N, Bouchard S, Chantigny M, Durocher S, Rochette P, Tremblay P, Ziadi N et Villeneuve C. 2015. La gestion des biosolides de papeteries au Québec : quelle serait la meilleure option pour réduire les émissions de gaz à effet de serre?. Vecteur Environnement, 48 : 50-58.
- Friedlingstein P, O'Sullivan M, Jones MW, Andrew RM, Gregor L, Hauck J, Le Quéré C, Luijkx IT, Olsen A, Peters GP, Peters W, Pongratz J, Schwingshackl C, Sitch S, Canadell JG, Ciais P, Jackson RB, Alin SR, Alkama R, Arneeth A, Arora VK, Bates NR, Becker M, Bellouin N, Bittig HC, Bopp L, Chevallier F, Chini LP, Cronin M, Evans W, Falk S, Feely RA, Gasser T, Gehlen M, Gkritzalis T, Gloege L, Grassi G, Gruber N, Gürses Ö, Harris I, Hefner M, Houghton RA, Hurtt GC, Iida Y, Ilyina T, Jain AK, Jersild A, Kadono K, Kato E, Kennedy D, Klein Goldewijk K, Knauer J, Korsbakken JI, Landschützer P, Lefèvre N, Lindsay K, Liu J, Liu Z, Marland G, Mayot N, McGrath MJ, Metzl N, Monacci NM, Munro DR, Nakaoka SI, Niwa Y, O'Brien K, Ono T, Palmer PI, Pan N, Pierrot D, Pockock K, Poulter B, Resplandy L, Robertson E, Rödenbeck C, Rodriguez C, Rosan TM, Schwinger J, Séférian R, Shutler JD, Skjelvan I, Steinhoff T, Sun Q, Sutton AJ, Sweeney C, Takao S, Tanhua T, Tans PP, Tian X, Tian H, Tilbrook B, Tsujino H, Tubiello F, van der Werf GR, Walker AP, Wanninkhof R, Whitehead C, Willstrand Wranne A, Wright R, Yuan W, Yue C, Yue X, Zaehle S, Zeng J et Zheng B. 2022. Global carbon budget 2022. Earth System Science Data, 14 : 4811-4900.
- Gaba E. 2009a (5 juillet 2010). Quebec province topographic map-blank.svg. Consulté le 15 décembre 2022, https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/8/85/Quebec_province_topographic_map-blank.svg
- Gaba E. 2009b (19 juillet 2010). Canada Quebec relief location map-conic proj.jpg. Consulté le 15 décembre 2022, https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/d/db/Canada_Quebec_relief_location_map-conic_proj.jpg
- Gagnon A, Fenton NJ, Sirois P et Boucher JF. 2021. Plant community diversity at two reclaimed mine tailing storage facilities in Québec, Canada. Land, 10 : 1191.

- Gagnon F. 2018. Utilisation d'amendements organiques pour le reboisement du parc à résidus sans drainage minier acide de la mine Niobec. Mémoire de maîtrise, Université du Québec à Chicoutimi, Chicoutimi, 46 p.
- Gambles GJ. 2011. Tailings reclamation at Mont-Wright 2011: general report. Gambles Guide, Temiskaming Shores, 58 p.
- Gerardin V et McKenney D. 2001. Une classification climatique du Québec à partir de modèles de distribution spatiale de données climatiques mensuelles : vers une définition des bioclimats du Québec. Ministère de l'Environnement, Direction du patrimoine écologique et du développement durable, Québec, 40 p.
- Girard S. 2017. Utilisation d'amendements organiques pour le reboisement du parc de résidus miniers sans rejet acide du Mont-Wright. Mémoire de maîtrise, Université du Québec à Chicoutimi, Chicoutimi, 62 p.
- Goulder LH et Nadreau BM. 2002. International approaches to reducing greenhouse gas emissions. Dans : Schneider SH, Rosencranz A et Niles JO éd. Climate change policy: a survey. Island Press, Washington, p. 115-149.
- Gouvernement du Canada. 2022a (1^{er} décembre 2022). Résultats de station - Données historiques : Shipshaw (QC). Consulté le 15 décembre 2022, https://climat.meteo.gc.ca/historical_data/search_historic_data_stations_f.html?searchType=stnName&timeframe=1&txtStationName=shipshaw&searchMethod=contains&optLimit=yearRange&StartYear=1840&EndYear=2022&Year=2022&Month=12&Day=14&selRowPerPage=25
- Gouvernement du Canada. 2022b (1^{er} décembre 2022). Résultats de station - Données historiques : Wabush lake a (NL). Consulté le 15 décembre 2022, https://climat.meteo.gc.ca/historical_data/search_historic_data_stations_f.html?searchType=stnName&timeframe=1&txtStationName=wabush&searchMethod=contains&optLimit=yearRange&StartYear=1840&EndYear=2022&Year=2022&Month=12&Day=14&selRowPerPage=25
- Gouvernement du Canada. 2022c (1^{er} décembre 2022). Résultats de station - Données historiques : Gagnon a (QC). Consulté le 15 décembre 2022, https://climat.meteo.gc.ca/historical_data/search_historic_data_stations_f.html?searchType=stnName&timeframe=1&txtStationName=gagnon&searchMethod=contains&optLimit=yearRange&StartYear=1840&EndYear=2022&Year=2022&Month=12&Day=14&selRowPerPage=25
- Gouvernement du Canada. 2022d (1^{er} décembre 2022). Résultats de station - Données historiques : Chute aux galets (QC). Consulté le 15 décembre 2022, https://climat.meteo.gc.ca/historical_data/search_historic_data_stations_f.html?searchType=stnName&timeframe=1&txtStationName=chute+aux+galets&searchMethod=contains&optLimit=yearRange&StartYear=1840&EndYear=2022&Year=2022&Month=12&Day=18&selRowPerPage=25
- Gouvernement du Canada. 2022e (1^{er} décembre 2022). Résultats de station - Données historiques : Chute à la savane (QC). Consulté le 15 décembre 2022,

https://climat.meteo.gc.ca/historical_data/search_historic_data_stations_f.html?searchType=stnName&timeframe=1&txtStationName=chute+à+la+savane&searchMethod=contains&optLimit=yearRange&StartYear=1840&EndYear=2022&Year=2022&Month=12&Day=18&selRowPerPage=25

- Gouvernement du Canada. 2022f (1^{er} décembre 2022). Résultats de station - Données historiques : Fermont (QC). Consulté le 15 décembre 2022, https://climat.meteo.gc.ca/historical_data/search_historic_data_stations_f.html?searchType=stnName&timeframe=1&txtStationName=Fermont&searchMethod=contains&optLimit=yearRange&StartYear=1840&EndYear=2022&Year=2022&Month=12&Day=18&selRowPerPage=25
- Guay R, Gagnon R et Morin H. 1992. A new automatic and interactive tree ring measurement system based on a line scan camera. *The Forestry Chronicle*, 68 : 138-141.
- Hébert F, Boucher JF, Bernier P et Lord D. 2006. Growth response and water relations of 3-year-old planted black spruce and jack pine seedlings in site prepared lichen woodlands. *Forest Ecology and Management*, 223 : 226-236.
- Holmes RL. 1983. Computer-assisted quality control in tree-ring dating and measurement. *Tree-Ring Bulletin*, 43 : 69-78.
- Hydrosemece de l'Estrie. 1980. Renaturalisation au Lac Jeannine. Hydrosemece de l'Estrie, Lennoxville, 138 p.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). 2021. Climate change 2021: the physical science basis. Dans : Masson-Delmotte V, Zhai P, Pirani A, Connors SL, Péan C, Berger S, Caud N, Chen Y, Goldfarb L, Gomis MI, Huang M, Leitzell K, Lonnoy E, Matthews JBR, Maycock TK, Waterfield T, Yelekçi O, Yu R et Zhou B édés. Contribution of working group I to the sixth assessment report of the IPCC. Cambridge University Press, Cambridge et New-York, 2391 p.
- IPCC. 2022. Climate change 2022: impacts, adaptation and vulnerability. Dans : Pörtner HO, Roberts DC, Tignor M, Poloczanska ES, Mintenbeck K, Alegria A, Craig M, Langsdorf S, Lösschke S, Möller V, Okem A, Rama B édés. Contribution of working group II to the sixth assessment report of the IPCC. Cambridge University Press, Cambridge et New-York, 3056 p.
- International Union of Soil Sciences Working Group (IUSS Working Group). 2015. World reference base for soil resources 2014: update 2015 international soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, 192 p.
- Juge C et Cossette N. 2015a. Sustainable revegetation of iron mine tailings of North-Eastern Québec and Labrador: choice of plant species, creation of a living soil and root microbial symbioses. *Canadian reclamation*, 15 : 28-33.
- Juge C et Cossette N. 2015b. Végétalisation durable des parcs à résidus des mines de fer du Nord-Est du Québec et du Labrador : choix des espèces végétales, création d'un sol vivant et symbioses racinaires microbiennes. *Science Eaux et Territoires*, Hors-série 2015, 21 : 1-6.

- Kurz WA, Dymond CC, White TM, Stinson G, Shaw CH, Rampley GJ, Smyth C, Simpson BN, Neilson ET, Tyofymow JA, Metsaranta J et Apps MJ. 2009. CBM-CFS3: a model of carbon-dynamics in forestry and land-use change implementing IPCC standards. *Ecological Modelling*, 220 : 480–504.
- Lamontagne L. 2016. *Projet 2045, Mine de Mont-Wright : programme de compensation pour les pertes d’habitat du poisson*. WSP Canada Inc., Baie-Comeau, 345 p.
- Mailly D et Gaudreault M. 2005. Growth intercept models for black spruce, jack pine and balsam fir in Quebec. *Forestry Chronicle*, 81 : 104-113.
- Ministère de l’Énergie et des Ressources naturelles (MERN). 2022. *Guide de préparation du plan de réaménagement et de restauration des sites miniers au Québec*. MERN, Direction de la restauration des sites miniers, Québec, 87 p.
- Ministère de l’Environnement, de la Lutte contre les changements climatiques, de la Faune et des Parcs (MELCCFP). 2018*a* (20 mai 2022). *Le marché du carbone : Western Climate Initiative*. Consulté le 14 décembre 2022, <https://www.environnement.gouv.qc.ca/changements/carbone/WCI.htm#haut>
- MELCCFP. 2018*b* (21 août 2022). *Crédits compensatoires : marché du carbone*. Consulté le 14 décembre 2022, <https://www.environnement.gouv.qc.ca/changements/carbone/credits-compensatoires/index.htm>
- Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs (MFFP). 2016*a*. *Limite territoriale des forêts attribuables en vigueur à partir du 1^{er} avril 2018 (RLRQ, chapitre A-18.1, article 17)*. MFFP, Direction des inventaires forestiers, Québec, 1 p.
- MFFP. 2016*b*. *Norme d’inventaire écoforestier : placettes-échantillons temporaires*. MFFP, Direction des inventaires forestiers, Québec, 172 p.
- MFFP. 2017 (21 juin 2022). *Forêt ouverte*. Consulté le 16 décembre 2022, <https://www.foretouverte.gouv.qc.ca/>
- Ministère des Ressources naturelles (MRN). 2000. *Mise à jour manuel d’aménagement forestier – Annexe 1 : les tables de rendement*. MRN, Direction des programmes forestiers, Québec, 82 p.
- Ministère des Ressources naturelles et des Forêts (MRNF). 2019 (9 septembre 2021). *Histoire de l’industrie minière*. Consulté le 15 décembre 2022, <https://mern.gouv.qc.ca/mines/industrie-substance-exploitees/industrie-histoire/>
- Moore JD, Camiré C et Ouimet R. 2000. Effects of liming on the nutrition, vigor, and growth of sugar maple at the Lake Clair Watershed, Québec, Canada. *Canadian Journal of Forest Research*, 30 : 725-732.
- Morneau C. 2021. *Classification écologique du territoire québécois*. MFFP, Direction des inventaires forestiers, Québec, 11 p.

- Mukaro E, Nyakudya IW et Jimu L. 2017. Edaphic conditions, aboveground carbon stocks and plant diversity on nickel mine tailings dump vegetated with *Senegalia polyacantha* (willd.) seigler & ebinger. *Land Degradation & Development*, 28 : 1641-1651.
- Néron A, Bédard LP et Gaboury D. 2018. The Saint-Honoré carbonatite REE zone, Québec, Canada: combined magmatic and hydrothermal processes. *Minerals*, 8 : 397.
- Pardé J et Bouchon J. 1988. *Dendrométrie : 2^e édition*. École Nationale du Génie Rural, des Eaux et Forêts, Nancy, 328 p.
- Pothier D et Savard F. 1998. Actualisation des tables de production pour les principales espèces forestières québécoises se développant en peuplements purs et réguliers. MRN, Direction de la recherche forestière, Québec, 183 p.
- Prégent G, Bertrand V et Charette L. Tables préliminaires de rendement pour les plantations d'épinette noire au Québec. MRN, Direction de la recherche forestière, Québec, 70 p.
- Prescott CE, Maynard DG et Laiho R. 2000. Humus in northern forests: friend or foe?. *Forest Ecology and Management*, 133 : 23-36.
- Quinn GP et Keough M. 2002. *Experimental design and data analysis for biologists*. Cambridge University Press, Cambridge, 537 p.
- Rastija D, Zebec V et Rastija M. 2014. Impacts of liming with dolomite on soil pH and phosphorus and potassium availabilities. Dans : 13th Alps-Adria Scientific Workshop, Villach, 2014. Növénytermelés, Villach, p. 193-196.
- Regent Instruments Inc. 2003. *WinSTEM™ 2003: user's guide*. Regent Instruments Inc., Québec, 29 p.
- Renald SA. 2021. Potentiel de sequestration de carbone dans le sol et la biomasse d'un parc à résidus miniers amendés et reboisés. Mémoire de maîtrise, Université du Québec à Chicoutimi, Chicoutimi, 42 p.
- Rikala R et Jozefek HJ. 1990 Effect of dolomite lime and wood ash on peat substrate and development of tree seedlings. *Silva Fennica*, 24 : 323-334.
- Rinntech Inc. 2013a. *Product information: TSAP-Win™ – Software for tree-ring measurement, analysis and presentation*. Rinntech Inc., Heidelberg, 2 p.
- Rinntech Inc. 2013b. *LINTAB™ 6 – Tree-ring measurement station*. Rinntech Inc., Heidelberg, 2 p.
- Robert M et Saugier CR. 2003. Contribution des écosystèmes continentaux à la séquestration du carbone. *Geoscience*, 335 : 577-595.
- Saucier JP, Berger JP, D'Avignon H et Racine P. 1994. *Le point d'observation écologique : normes techniques*. MRNF, Direction des inventaires forestiers, Québec, 116 p.
- Schrag DP. 2007. Preparing to capture carbon. *Science*, 315 : 812-813.

- Sémhur. 2010 (2 janvier 2010). Quebec (North America orthographic projection).svg. Consulté le 15 décembre 2022, https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/d/d3/Quebec_%28North_America_orthographic_projection%29.svg
- Sheoran V, Sheoran A et Poonia P. 2010. Soil reclamation of abandoned mine land by revegetation: a review. *International Journal of Soil, Sediment and Water*, 3 : 13.
- Ussiri DA et Lal R. 2005. Carbon sequestration in reclaimed minesoils. *Critical Reviews in Plant Sciences*, 24 : 151-165.
- Vanden Bossche H. 1999. Devenir du phosphore apporté sur les sols et risques de contamination des eaux de surface : cas des boues de stations d'épuration. Thèse de doctorat, Université de Rennes, Rennes, 321 p.
- Viereck LA. 1983. The effects of fire in black spruce ecosystems of Alaska and northern Canada. Dans : Wein RW et MacLean DA éd. *The role of fire northern circumpolar ecosystems*, John Wiley and Sons, New-York, p. 201-220.
- Viereck LA et Johnston F. 1990. *Picea mariana* (Mill) B.S.P. Dans : Burns RM et Honkala BH éd. *Sylvics of North America: volume 1, conifers*, Agriculture Handbook 654, Washington DC, p. 227-237.
- Wallander H, Wickman T et Jacks G. 1997. Apatite as a P source in mycorrhizal and non-mycorrhizal *Pinus sylvestris* seedlings. *Plant and Soil*, 196 : 123-131.
- Wallander H. 2000. Uptake of P from apatite by *Pinus sylvestris* seedlings colonised by different ectomycorrhizal fungi. *Plant and Soil*, 218 : 249-256.
- Way DA et Oren R. 2010. Differential responses to changes in growth temperature between trees from different functional groups and biomes: a review and synthesis of data. *Tree Physiology*, 30 : 669-688.
- Western Climate Initiative Inc. (WCI). 2022 (11 avril 2022). Gouvernements participants de WCI, inc. Consulté le 14 décembre 2022, <https://wcitestbucket.s3.us-east-2.amazonaws.com/amazon-s3-bucket/participatingjurisdiction-comparativetable-fr.pdf>
- World Meteorological Organization (WMO). 2022. The state of greenhouse gases in the atmosphere based on global observations through 2021. *WMO Greenhouse Bulletin*, 18 : 1-10.

ANNEXE 1

COMPARAISON DU POTENTIEL DE CROISSANCE DES PINS GRIS (*PINUS BANKSIANA* LAMB.) PLANTÉS SUR LE PARC À RÉSIDUS DE LA MINE NIOBEC EN 1989 – 1994 ET EN 2004

Tableau 1.1 : Résultats de l'analyse de variance à deux facteurs dont un à mesures répétées (ANOVAR) pour le volume cumulé des pins gris (*Pinus banksiana* Lamb.) plantés sur le parc à résidus de la mine Niobec en 1989 – 1994 et en 2004

Source de variation	Valeur de <i>F</i> exacte	Degrés de liberté du numérateur	Degrés de liberté du dénominateur	<i>p</i> > <i>F</i> *
<i>Facteurs inter-sujets</i>				
Constante	149,1584	1	4	0,0003
Site	0,0006	1	4	0,9813
<i>Facteurs intra-sujets</i> [†]				
Âge cambial‡	185,4376	1,1450	4,5800	< 0,0001
Site × Âge cambial‡	0,2874	1,1450	4,5800	0,6470

* Les valeurs de *p* en gras et en rouge indiquent que les résultats du test réalisé sont significatifs par rapport au seuil de 0,05.

[†] Afin de corriger le manque de sphéricité de la matrice variance-covariance, les degrés de liberté du test *F* réalisé pour les facteurs intra-sujets et les *p* qui en résultent sont ajustés avec l' ϵ de Greenhouse-Geisser.

[‡] Dans cette ANOVAR, l'âge cambial est compris entre 1 et 14 ans.

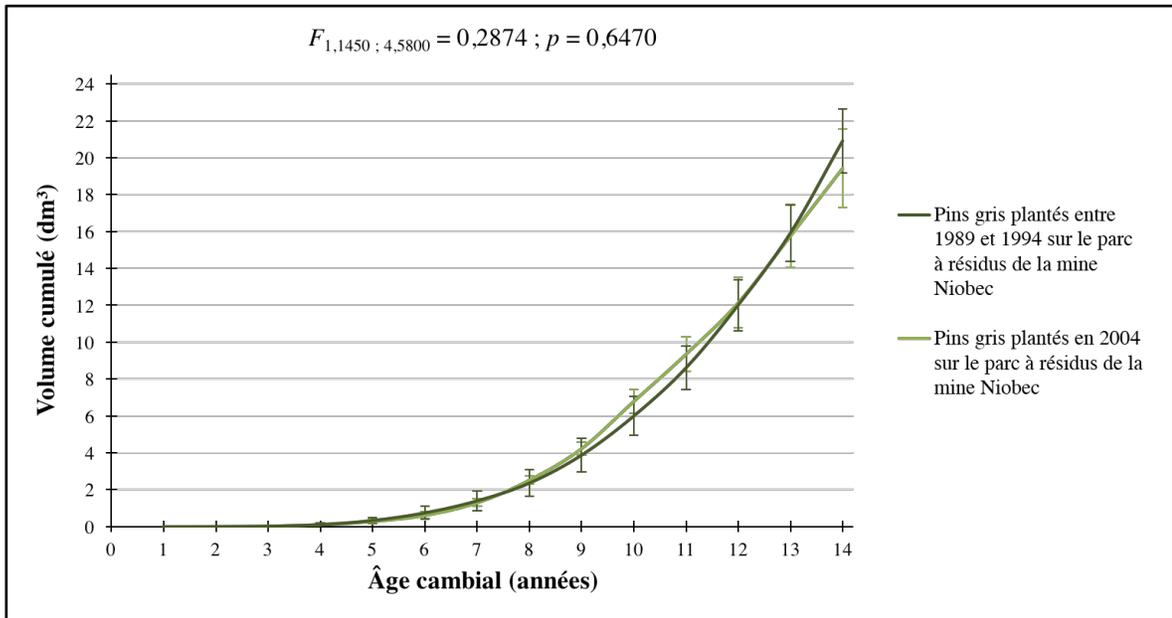


Figure 1.1 : Potentiel de croissance en volume cumulé moyen (en dm^3) des pins gris (*Pinus banksiana* Lamb.) plantés sur le parc à résidus de la mine Niobec en 1989 – 1994 et en 2004. Les barres d’erreur représentent l’erreur type.

ANNEXE 2

COMPARAISON DU POTENTIEL DE CROISSANCE DES PINS GRIS (*PINUS BANKSIANA* LAMB.) PLANTÉS SUR LES SITES NATURELS PLP03 ET PLP04 ÉTUDIÉS À PROXIMITÉ DE LA MINE NIOBEC

Tableau 2.1 : Résultats de l'analyse de variance à deux facteurs dont un à mesures répétées (ANOVAR) pour le volume cumulé des pins gris (*Pinus banksiana* Lamb.) plantés sur les sites naturels PLP03 et PLP04 étudiés à proximité de la mine Niobec

Source de variation	Valeur de <i>F</i> exacte	Degrés de liberté du numérateur	Degrés de liberté du dénominateur	<i>p</i> > <i>F</i> *
<i>Facteurs inter-sujets</i>				
Constante	150,4212	1	8	< 0,0001
Site	0,5269	1	8	0,4886
<i>Facteurs intra-sujets</i> [†]				
Âge cambial [‡]	187,3032	1,1259	9,0069	< 0,0001
Site × Âge cambial [‡]	0,3470	1,1259	9,0069	0,5958

* Les valeurs de *p* en gras et en rouge indiquent que les résultats du test réalisé sont significatifs par rapport au seuil de 0,05.

[†] Afin de corriger le manque de sphéricité de la matrice variance-covariance, les degrés de liberté du test *F* réalisé pour les facteurs intra-sujets et les *p* qui en résultent sont ajustés avec l' ϵ de Greenhouse-Geisser.

[‡] Dans cette ANOVAR, l'âge cambial est compris entre 1 et 14 ans.

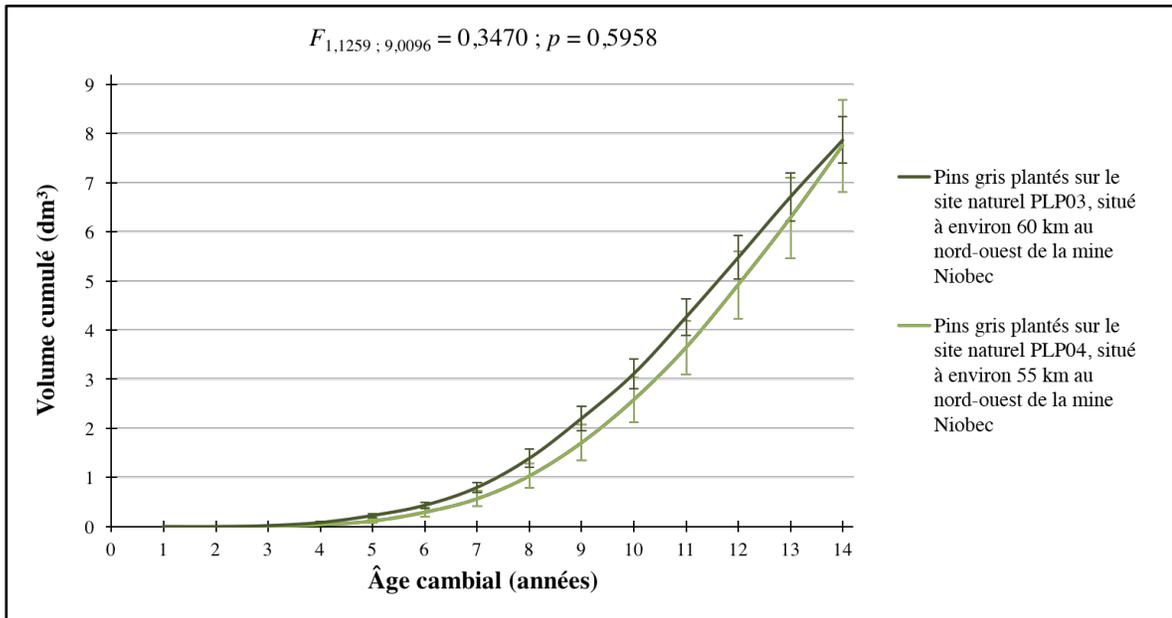


Figure 2.1 : Potentiel de croissance en volume cumulé moyen (en dm^3) des pins gris (*Pinus banksiana* Lamb.) plantés sur les sites naturels PLP03 et PLP04 étudiés à proximité de la mine Niobec. Les barres d'erreur représentent l'erreur type.

ANNEXE 3

TABLES DE RENDEMENT POTENTIEL PROJETÉ DE PLANTATIONS SUR PARCS À RÉSIDUS MINIERES RESTAURÉS AU QUÉBEC

Tableau 3.1 : Table de rendement potentiel projeté – sous forme de volume marchand brut (en m³×ha⁻¹) – des éventuels pins gris (*Pinus banksiana* Lamb.) plantés, à raison de 2 000 tiges×ha⁻¹, sur le parc à résidus de la mine Niobec en fonction de leur âge (en années)

	Âge cambial (en années)																
	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100
	Volume marchand brut (en m ³ ×ha ⁻¹)																
Mine Niobec Pins gris Minimum (IQS 50 = 15,87)	25,67	51,43	80,45	113,13	148,63	170,11	189,14	206,14	220,39	233,24	244,13	253,65	262,29	269,89	275,77	281,33	286,16
Mine Niobec Pins gris Moyenne (IQS 50 = 16,88)	29,65	56,46	86,60	120,67	157,73	179,43	198,51	215,51	229,73	242,47	253,28	262,69	271,18	278,69	284,51	289,99	294,77
Mine Niobec Pins gris Maximum (IQS 50 = 17,88)	33,59	61,43	92,68	128,14	166,74	188,66	207,78	224,78	238,98	251,60	262,35	271,64	279,98	287,41	293,15	298,56	303,29

Tableau 3.2 : Table de rendement potentiel projeté – sous forme de volume marchand brut (en m³×ha⁻¹) – des éventuels pins gris (*Pinus banksiana* Lamb.) plantés, à raison de 2 000 tiges×ha⁻¹, sur le parc à résidus de l’ancienne mine du Lac Jeannine en fonction de leur âge (en années)

	Âge cambial (en années)																
	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100
	Volume marchand brut (en m ³ ×ha ⁻¹)																
Mine du Lac Jeannine Pins gris (IQS 50 = 9,03)	–	17,42	38,82	62,05	87,00	106,97	125,70	142,70	157,14	170,76	182,13	192,42	202,09	210,28	216,64	222,67	227,87

Tableau 3.3 : Table de rendement potentiel projeté – sous forme de volume marchand brut (en m³×ha⁻¹) – des éventuelles épinettes noires (*Picea mariana* (Mill.) B.S.P.) plantées, à raison de 2 000 tiges×ha⁻¹, sur le parc à résidus de l’ancienne mine du Lac Jeannine en fonction de leur âge (en années)

	Âge cambial (en années)																
	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100
	Volume marchand brut (en m ³ ×ha ⁻¹)																
Mine du Lac Jeannine Épinettes noires (IQS 50 = 7,11)	–	–	–	6,85	17,13	27,06	38,01	49,85	62,51	71,47	81,24	90,31	97,51	104,66	112,28	117,17	122,35

Tableau 3.4 : Table de rendement potentiel projeté – sous forme de volume marchand brut (en m³×ha⁻¹) – des éventuelles épinettes noires (*Picea mariana* (Mill.) B.S.P.) plantées, à raison de 2 000 tiges×ha⁻¹, sur le parc à résidus de la mine de Mont-Wright en fonction de leur âge (en années)

	Âge cambial (en années)																
	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100
	Volume marchand brut (en m ³ ×ha ⁻¹)																
Mine de Mont-Wright Épinette noire Minimum (IQS 50 ≈ 6,70)	–	–	–	3,91	10,45	17,17	24,93	33,68	43,38	50,31	58,07	65,39	71,24	77,13	83,55	87,60	91,96
Mine de Mont-Wright Épinette noire Moyenne (IQS 50 ≈ 6,89)	–	–	–	5,27	13,56	21,77	31,02	41,22	52,30	60,18	68,89	77,03	83,51	89,99	96,98	101,42	106,17
Mine de Mont-Wright Épinette noire Maximum (IQS 50 ≈ 7,08)	–	–	–	6,64	16,66	26,37	37,11	48,75	61,22	70,06	79,70	88,67	95,79	102,85	110,40	115,24	120,37

ANNEXE 4

COMPARAISON ENTRE LES RENDEMENTS DE PLANTATIONS QUÉBÉCOISES PUBLIÉS PAR LE MINISTÈRE DES RESSOURCES NATURELLES EN 2000, CEUX MODÉLISÉS PAR AUGER ET WARD EN 2021 ET CEUX PROJETÉS À PARTIR DES MODÈLES CONSTRUITS DANS LA PRÉSENTE ÉTUDE

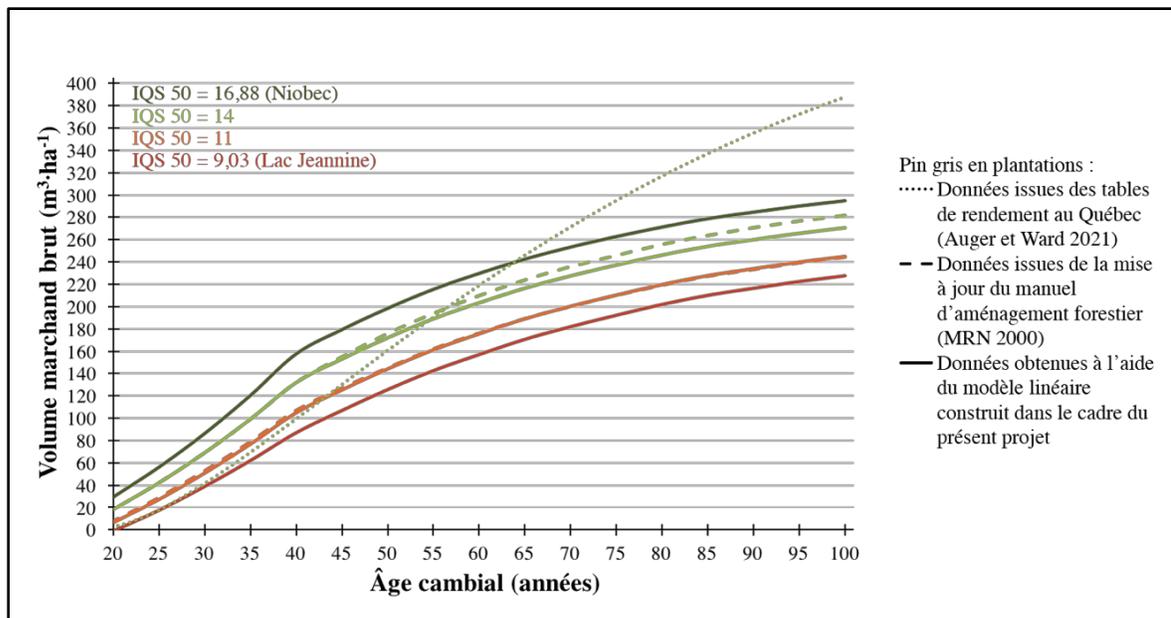


Figure 4.1 : Comparaison du rendement potentiel – sous forme de volume marchand brut (en $m^3 \times ha^{-1}$) en fonction de l'âge cambial (en années) – des éventuels pins gris (*Pinus banksiana* Lamb.) en plantations, à raison de 2 000 tiges $\times ha^{-1}$, projeté par la mise à jour du manuel d'aménagement forestier (MRN 2000), par les modèles construits par Auger et Ward (2021) et par les modèles construits dans le présent projet.

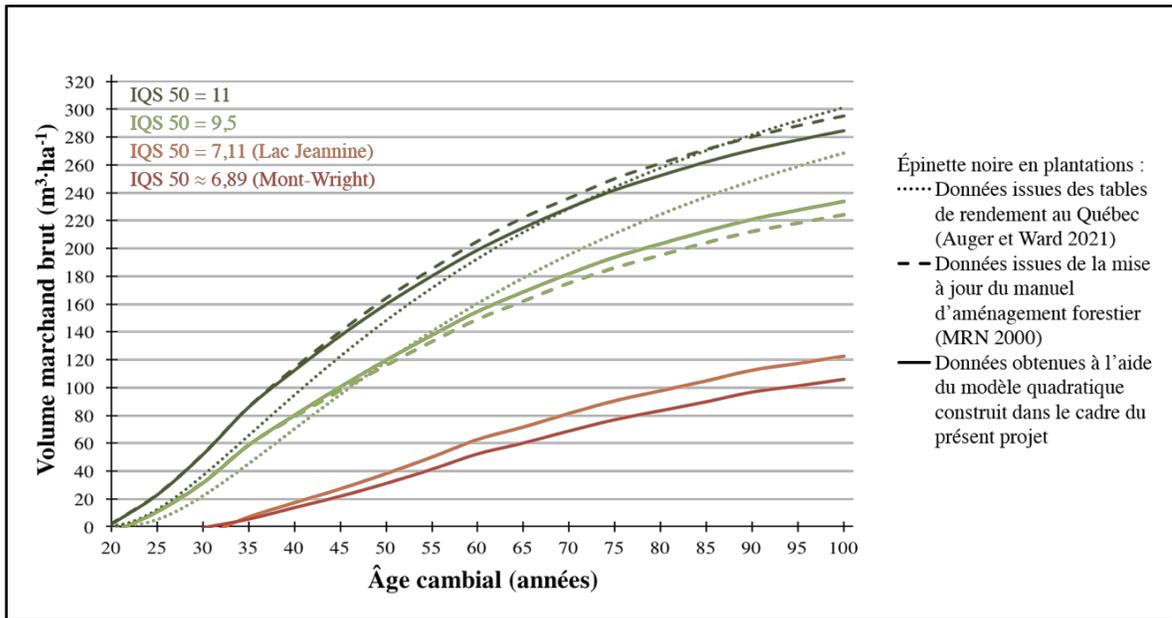


Figure 4.2 : Comparaison du rendement potentiel – sous forme de volume marchand brut (en $\text{m}^3 \times \text{ha}^{-1}$) en fonction de l'âge cambial (en années) – des éventuelles épinettes noires (*Picea mariana* (Mill.) B.S.P.) en plantations, à raison de 2 000 tiges $\times \text{ha}^{-1}$, projeté par la mise à jour du manuel d'aménagement forestier (MRN 2000), par les modèles construits par Auger et Ward (2021) et par les modèles construits dans le présent projet.

