



Université du Québec
à Chicoutimi

**EFFETS DES INTERACTIONS INTRA- ET INTERSPÉCIFIQUES ET DE
LA FERTILISATION SUR LE PRÉLÈVEMENT DE L'AZOTE ET
LA PRODUCTION DE BIOMASSE EN FORÊT BORÉALE**

par Lona BAUDRY

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 (Ressources biologiques)

Québec, Canada

© Lona BAUDRY, 2023

RÉSUMÉ

À l'échelle planétaire, les changements climatiques affectent les écosystèmes forestiers. Au Québec, la forêt boréale est l'un des écosystèmes les plus touchés par ces phénomènes climatiques. Le couvert forestier y est fortement dominé par l'épinette noire. La conservation de la diversité biologique du milieu forestier est une préoccupation majeure du Gouvernement du Québec qui en fait une priorité.

Afin de répondre aux impératifs du développement durable et de compenser les émissions de gaz à effet de serre (GES), il est important de comprendre les caractéristiques des espèces d'arbres à planter et d'établir des stratégies de plantation (par exemple, mono- ou plurispécifiques) cohérentes avec les politiques, les objectifs environnementaux et les particularités des terrains à boiser.

Au cours des dernières décennies, des études ont mis en évidence une relation positive entre la diversité spécifique d'une part, la productivité et la résilience des écosystèmes d'autre part. Ce type de relation pourrait être exploité dans les projets d'afforestation visant à séquestrer du carbone (C) sur le long terme, afin d'atténuer les changements climatiques. Ce projet de maîtrise s'inscrit dans ce contexte puisque nous voulons déterminer si une relation biodiversité-productivité (relation B-P) existe entre trois espèces de conifères boréales : l'épinette noire (EPN), le mélèze laricin (MEL) et le pin gris (PIG). L'objectif principal de l'étude étant d'en exploiter les résultats, afin d'adapter les stratégies d'afforestation en forêt boréale.

Cette étude a été conceptualisée, afin de répondre au manque de connaissances sur les types d'interactions qu'entretiennent ces trois essences boréales ; soit d'en apprendre plus sur les types de mécanismes (de compétition et/ou de complémentarité) qui peuvent exister entre elles. Pour ce faire, deux dispositifs expérimentaux ont été mis en place : un en milieu contrôlé et un autre en milieu naturel. Pour chaque dispositif, 324 semis ont été cultivés seuls (monocultures) ou en associations (polycultures) dans 156 pots (en serres) ou 156 placettes (Forêt d'Enseignement et de Recherche de Simoncouche). Ces dispositifs nous ont permis d'étudier différentes variables de l'EPN, du PIG et du MEL dans différents traitements : fertilisation azotée au sulfate d'ammonium ($[(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4]$), densité (nombre de semis par unité expérimentale) et diversité (nombre d'espèces par unité expérimentale). Les variables étudiées correspondent à la croissance annuelle, la biomasse totale des semis (BT), la proportion d'azote (N) dérivée du fertilisant (N_{dff}), le Rendement relatif total (RYT) et l'indice de Compétition intraspécifique (C_{intra}).

Nos résultats ont montré que l'effet de la fertilisation au $[(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4]$ sur nos semis est supérieur pour le MEL. L'effet de la densité sur les semis a réduit la croissance des semis pour l'EPN et le PIG, démontrant l'existence d'une compétition intraspécifique pour ces deux espèces. Nous avons également vu que l'assimilation de N dérivé du fertilisant augmente avec la densité de semis par pot (surtout pour le PIG). Les résultats obtenus sur le C_{intra} indiquent également que la fertilisation diminue la compétition intraspécifique pour le PIG. Enfin, nous avons montré que le RYT était significativement supérieur à 1 pour les mélanges à trois espèces, mettant en évidence un effet de complémentarité lorsque les trois espèces poussent ensemble.

Les résultats exposés dans ce mémoire doivent être vérifiés sur une plus longue échéance et en milieu naturel, ce qui sera possible grâce au dispositif installé à la Forêt de Recherche de Simoncouche. Ces résultats constituent des données qui pourraient guider les stratégies de plantation adoptées par diverses entreprises et organismes. Les forêts nouvellement boisées deviendraient ainsi des zones plus productives et elles pourraient potentiellement augmenter le taux de séquestration du C et la résilience de l'écosystème sur le long terme.

REMERCIEMENTS

Ma reconnaissance la plus sincère s'adresse dans un premier temps à Monsieur Patrick Faubert et à Monsieur Charles Marty, respectivement, mes directeur et co-directeur de recherche. Ils ont été d'un grand soutien pendant ma maîtrise : leur encadrement, le partage de leurs connaissances et leur disponibilité ont été des guides précieux au cours de chacune des étapes de réalisation de ce projet.

Mes remerciements s'adressent aussi à l'infrastructure de recherche Carbone boréal, dirigée par Monsieur Claude Villeneuve, à l'Université du Québec à Chicoutimi (UQAC), notamment le Département des sciences fondamentales, et à la Fondation de l'UQAC. Merci de m'avoir donné l'opportunité de réaliser et d'obtenir ce diplôme dans de bonnes conditions, notamment pendant la pandémie.

Je tiens également à remercier la technicienne et le responsable de laboratoire de l'UQAC, respectivement Mireille Boulianne et Pascal Tremblay, et le professionnel de recherche de Carbone boréal, Olivier Fradette, pour leur aide, leurs conseils et leurs encouragements. De même, je remercie les étudiants qui m'ont prêté main-forte dans la mise en place des dispositifs expérimentaux et dans la préparation des échantillons de sol et de tissus végétaux pour les analyses : merci à Maude Simard, Jean-Simon Boulianne, Tarek Cherni, Carl Crête et William Chiricota.

Des analyses de ces échantillons ont été effectuées au Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs (MFFP ; présentement étant le Ministère des Ressources Naturelles et des Forêts) du Québec et au GEOTOP de l'Université du Québec à Montréal (UQAM). Le MFFP a aussi contribué au financement de ce projet. Merci à eux pour leur collaboration.

Enfin, un merci tout particulier à mes précieuses amies, à mes proches et à ma famille : à ma mère pour la persévérance et la ténacité qu'elle m'a transmise pour toujours aller de l'avant, ainsi qu'à mon frère, ma grand-mère et mon conjoint pour leur fidèle soutien.

TABLE DES MATIÈRES

RÉSUMÉ.....	II
REMERCIEMENTS.....	III
TABLE DES MATIÈRES	IV
LISTE DES TABLEAUX	V
LISTE DES FIGURES.....	VII
LISTE DES ANNEXES	VIII
LISTE DES ACRONYMES.....	IX
1. INTRODUCTION	1
1.1. L'INFRASTRUCTURE DE RECHERCHE CARBONE BORÉAL.....	2
1.2. L'AUGMENTATION DU PUIT DE C DE LA FORÊT BORÉALE PAR L'AFFORESTATION DES DS.....	4
1.3. SUIVRE LE PRÉLÈVEMENT DE L'AZOTE PAR LES VÉGÉTAUX : LA MÉTHODE DU MARQUAGE AU ¹⁵ N	5
1.4. LA RELATION BIODIVERSITÉ-PRODUCTIVITÉ.....	8
1.5. OBJECTIFS ET HYPOTHÈSES DE L'ÉTUDE.....	9
2. MATÉRIEL ET MÉTHODES	12
2.1. SITES DE L'ÉTUDE.....	12
2.2. DISPOSITIFS EXPÉRIMENTAUX.....	14
2.2.1. Dispositif experimental installé en serres	14
2.2.2. Dispositif experimental installé en milieu naturel	17
2.3. MESURES DES INDICES DE PRODUCTIVITÉ.....	22
2.4. MESURE DE LA BIOMASSE TOTALE	22
2.4.1. Mesure de la biomasse aérienne.....	23
2.4.2. Mesure de la biomasse racinaire.....	23
2.5. ÉCHANTILLONNAGE ET ANALYSES DES TISSUS VÉGÉTAUX.....	23
2.5.1. Méthode du marquage au ¹⁵ N.....	24
2.5.2. Calcul du Rendement Relatif Total (RYT).....	26
2.5.3. Calcul de l'indice de Compétition intraspécifique (C_{intra}).....	27
2.6. ÉCHANTILLONNAGE ET ANALYSES DE SOL.....	28
2.7. ANALYSES STATISTIQUES	31
3. RÉSULTATS	33
3.1. EFFETS DE LA FERTILISATION ET DE L'ESPÈCE SUR LA CROISSANCE DES SEMIS	33
3.2. PRODUCTIVITÉ ET PRÉLÈVEMENT DE L'AZOTE DES ESPÈCES EN MONOCULTURES.....	36
3.2.1. Production de biomasse des cultures monospécifiques	36
3.2.2. Prélèvement du fertilisant azoté par les semis en cultures monospécifiques.....	37
3.3. PRODUCTIVITÉ ET PRÉLÈVEMENT DE L'AZOTE DES ESPÈCES EN POLYCULTURES	39
3.3.1. Production de biomasse des cultures plurispécifiques	39
3.3.2. Prélèvement du fertilisant azoté par les semis en cultures plurispécifiques.....	41
3.4. INTERACTIONS INTRA- ET INTERSPÉCIFIQUES.....	43
3.4.1. Le Rendement Relatif Total (RYT).....	43
3.4.2. L'indice de Compétition intraspécifique (C_{intra})	44
4. DISCUSSION	47
4.1. CROISSANCE ET BIOMASSE TOTALES DES SEMIS.....	47
4.2. EFFETS DE LA TEMPÉRATURE EN SERRES SUR LA PRODUCTION DE BIOMASSE	48
4.3. EFFETS DES INTERACTIONS INTRASPÉCIFIQUES DES MONOCULTURES SUR LE PRÉLÈVEMENT DE L'AZOTE ET LA PRODUCTION DE BIOMASSE.....	51
4.4. EFFETS DES INTERACTIONS INTERSPÉCIFIQUES DES POLYCULTURES SUR LE PRÉLÈVEMENT DE L'AZOTE ET LA PRODUCTION DE BIOMASSE.....	53
4.5. LIMITES ET PROBLÈMES TECHNIQUES DE L'ÉTUDE.....	56
4.6. RETOUR SUR LES HYPOTHÈSES	57
5. CONCLUSION	59
RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES	61
ANNEXES	68

LISTE DES TABLEAUX

TABLEAU 1 : Rapport des températures moyennes mensuelles (en °C) des serres du Pavillon de la Recherche Forestière de l'UQAC, pour les périodes de juin 2020 à octobre 2020 et de mai 2021 à octobre 2021 (Logiciel PRIVA)	16
TABLEAU 2 : Rapport des données météorologiques moyennes mensuelles de la station de Bagotville, pour la période de juin 2020 à octobre 2021 (Rapport de données quotidiennes, Gouvernement du Canada). <i>Légende des abréviations : température maximale moyenne ($T^{\circ}max.moy$, en °C) ; température minimale moyenne ($T^{\circ}min.moy$ - en °C) ; température moyenne ($T^{\circ}moy$, en °C) ; somme de la pluie totale tombée ($\Sigma pluie.tot$, en mm) ; somme de la neige totale tombée ($\Sigma neige.tot$, en cm) ; somme des précipitations totales ($\Sigma précip.tot$, en mm)</i>	21
TABLEAU 3 : Résultats des analyses du pH, du C_{tot} , du N_{tot} et des éléments échangeables (P, K, Ca, Mg, Mn, Cu, Zn, Al, Fe, Mo, Na, B et S) des échantillons de sol des deux dispositifs en serres et à Simoncouche.....	30
TABLEAU 4.a : Résultats de l'ANOVA testant les effets de la fertilisation azotée et des interactions sur la croissance totale de l'épinette noire, du pin gris et du mélèze laricin du dispositif en serres après deux saisons de croissances, de juin 2020 à septembre 2021	33
TABLEAU 4.b : Croissance totale (moyenne \pm SE : n = 6) de l'épinette noire (EPN), du pin gris (PIG) et du mélèze laricin (MEL) du dispositif en serres. Les différences significatives entre les niveaux de chaque traitement sont indiquées par des lettres (les différences pour les traitements ayant > 2 niveaux ont été déterminées par un test post hoc HDS de Tukey).....	34
TABLEAU 5.a : Résultats de l'ANOVA testant les effets de la fertilisation azotée et des interactions sur la croissance totale de l'épinette noire, du pin gris et du mélèze laricin du dispositif à Simoncouche après deux saisons de croissances, de juin 2020 à octobre 2021	35
TABLEAU 5.b : Croissance totale (moyenne \pm SE : n = 6) de l'épinette noire (EPN), du pin gris (PIG) et du mélèze laricin (MEL) du dispositif à Simoncouche. Les différences significatives entre les niveaux de chaque traitement sont indiquées par des lettres (les différences pour les traitements ayant > 2 niveaux ont été déterminées par un test post hoc HDS de Tukey).....	35
TABLEAU 6 : Résultats de l'ANOVA testant les effets de la fertilisation azotée, de la densité et des interactions sur la biomasse totale de l'épinette noire, du pin gris et du mélèze laricin en cultures monospécifiques du dispositif en serres après deux saisons de croissances, de juin 2020 à septembre 2021	37
TABLEAU 7.a : Résultats de l'ANOVA testant les effets de la fertilisation azotée, de la densité et des interactions sur la proportion d'azote dérivée du fertilisant (N_{dff} , %) de l'épinette noire, du pin gris et du mélèze laricin en cultures monospécifiques du dispositif en serres après deux saisons de croissances, de juin 2020 à septembre 2021	38
TABLEAU 7.b : Proportion d'azote dérivée du fertilisant (N_{dff} moyen \pm SE : n = 3) de l'épinette noire (EPN), du pin gris (PIG) et du mélèze laricin (MEL) en cultures monospécifiques du dispositif en serres. Les différences significatives entre les niveaux de chaque traitement sont indiquées par des lettres (les différences pour les traitements ayant > 2 niveaux ont été déterminées par un test post hoc de Tukey).....	38
TABLEAU 8.a : Résultats de l'ANOVA testant les effets de la fertilisation azotée, de la diversité et des interactions sur la biomasse totale de l'épinette noire, du pin gris et du mélèze laricin en cultures plurispécifiques du dispositif en serres après deux saisons de croissances, de juin 2020 à septembre 2021.....	40

TABLEAU 8.b : Biomasse totale (moyenne \pm SE : n = 3) de l'épinette noire (EPN), du pin gris (PIG) et du mélèze laricin (MEL) en cultures plurispécifiques du dispositif en serres. Les différences significatives sont indiquées par des lettres (les différences pour les traitements ayant > 2 niveaux ont été déterminées par un test post hoc HDS de Tukey)	40
TABLEAU 9.a : Résultats de l'ANOVA testant les effets de la fertilisation azotée, de la diversité et des interactions sur la proportion d'azote dérivée du fertilisant (Ndff, %) de l'épinette noire, du pin gris et du mélèze laricin en cultures plurispécifiques du dispositif en serres après deux saisons de croissances, de juin 2020 à septembre 2021	42
TABLEAU 9.b : Proportion d'azote dérivée du fertilisant (Ndff moyen \pm SE : n = 3) de l'épinette noire (EPN), du pin gris (PIG) et du mélèze laricin (MEL) en cultures plurispécifiques du dispositif en serres. Les différences significatives entre les niveaux de chaque traitement sont indiquées par des lettres (les différences pour les traitements ayant > 2 niveaux ont été déterminées par un test post hoc HDS de Tukey).....	42
TABLEAU 10 : Résultats de l'ANOVA testant les effets de la fertilisation azotée, de la diversité et des interactions sur le Rendement Relatif Total (RYT) de l'épinette noire, du pin gris et du mélèze laricin en cultures plurispécifiques du dispositif en serres après deux saisons de croissances, de juin 2020 à septembre 2021	44
TABLEAU 11.a : Résultats de l'ANOVA testant les effets de la fertilisation azotée, de la densité et des interactions sur l'indice de Compétition intraspécifique (C_{intra}) de l'épinette noire, du pin gris et du mélèze laricin en cultures monospécifiques du dispositif en serres après deux saisons de croissances, de juin 2020 à septembre 2021	45
TABLEAU 11.b : Indice de Compétition intraspécifique (C_{intra} moyen \pm SE : n = 3) des cultures monospécifiques du dispositif en serres. Les différences significatives entre les niveaux de chaque traitement sont indiquées par des lettres (les différences pour les traitements ayant > 2 niveaux ont été déterminées par un test post hoc HDS de Tukey)	46
TABLEAU 12.a : Résultats de l'ANOVA testant les effets de la fertilisation azotée, des chapelles et des interactions sur la biomasse totale de l'épinette noire, du pin gris et du mélèze laricin du dispositif en serres, après deux saisons de croissances, de juin 2020 à septembre 2021	48
TABLEAU 12.b : Biomasse totale (moyenne \pm SE : n = 3) de l'épinette noire (EPN), du pin gris (PIG) et du mélèze laricin (MEL) du dispositif en serres par chapelles. Les différences significatives entre les niveaux de chaque traitement sont indiquées par des lettres (les différences pour les traitements ayant > 2 niveaux ont été déterminées par un test post hoc HDS de Tukey).....	49
TABLEAU 13 : Biomasses racinaires (BR, en g ; moyenne \pm SE : n = 3) de l'épinette noire (EPN), du pin gris (PIG) et du mélèze laricin (MEL) en cultures monospécifiques du dispositif en serres (pots N+ et N- confondus)	52

LISTE DES FIGURES

FIGURE 1 : Carte du site de plantation du dispositif expérimental installé à la Forêt d'Enseignement et de Recherche de l'UQAC à Simoncouche	13
FIGURE 2 : Schéma du dispositif expérimental installé dans les serres du Pavillon de la Recherche Forestière de l'UQAC	15
FIGURE 3 : Schéma du dispositif expérimental installé dans la Forêt d'Enseignement et de Recherche de l'UQAC à Simoncouche	20
FIGURE 4 : Croissances totales moyennes des semis du dispositif en serres sur deux saisons de croissances	34
FIGURE 5 : Croissances totales moyennes des semis du dispositif à Simoncouche sur deux saisons de croissances	36
FIGURE 6 : Biomasses totales moyennes des semis en cultures monospécifiques du dispositif en serres	37
FIGURE 7 : Proportions moyennes d'azote dérivé du fertilisant (N _{dff} , %) des semis en cultures monospécifiques du dispositif en serres	39
FIGURE 8 : Biomasses totales moyennes des semis en cultures plurispécifiques du dispositif en serres	41
FIGURE 9 : Proportions moyennes d'azote dérivé du fertilisant (N _{dff} , %) des semis en cultures plurispécifiques du dispositif en serres	43
FIGURE 10 : Rendements relatifs totaux (RYT) moyens des semis en cultures plurispécifiques du dispositif en serres	44
FIGURE 11 : Indices de Compétition Intraspécifique (C _{intra}) moyens des semis en cultures monospécifiques du dispositif en serres	46
FIGURE 12 : Biomasses totales moyennes des semis du dispositif en serres exprimées en fonction des chapelles	50

LISTE DES ANNEXES

ANNEXE 1 : Caractéristiques du site d'étude de Simoncouche (Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs, Gouvernement du Québec).....	68
ANNEXE 2 : Photos du dispositif expérimental installé dans les serres du Pavillon de la Recherche Forestière de l'UQAC	70
ANNEXE 3 : Photos du dispositif expérimental installé à la Forêt d'Enseignement et de Recherche de l'UQAC à Simoncouche	71

LISTE DES ACRONYMES

A (%) : Abondance isotopique exprimée en pourcentage
BA : Biomasse aérienne
BR : Biomasse racinaire
BT : Biomasse totale
C : Carbone
Chap : Chapelle
 C_{intra} : Indice de Compétition intraspécifique
CO₂ : Dioxyde de carbone
Dens : Densité
ddl : Degrés de liberté
Div : Diversité
DS : Dénudé(s) sec(s)
EPN : Épinette noire
Esp : Espèces
Fert : Fertilisation
F ratio : Rapport de F
GES : Gaz à effet de serre
MEL : Mélèze laricin
MFFP : Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs
N : Azote
Nb coef : Nombre de coefficient
Ndff : Proportion de N dérivé du fertilisant
NH₄⁺ : Ammonium
[NH₄]₂SO₄ : Sulfate d'ammonium
NO₃⁻ : Nitrate
 $\delta^{15}N$ (‰) : Abondance isotopique exprimée sous forme d'écart en parties par milliers
P : Valeur de P
PIG : Pin gris
PRF : Pavillon de la Recherche Forestière
Relation B-P : Relation biodiversité-productivité
RYT : Indice du Rendement relatif total (Relative Yield Total)
UE : Unité expérimentale
UO : Unité d'observation
UQAC : Université du Québec à Chicoutimi

1. INTRODUCTION

Au Québec, le plus grand écosystème forestier correspond à la forêt boréale, se situant entre les 49 et 53° de latitude nord et entre les 57 et 79° de longitude ouest (Payette *et al.* 2000; Thiffault 2019) et couvrant près de 55 millions d'hectares du territoire québécois (Norton 1996). Actuellement, l'exploitation forestière dans la province est régie par la Loi sur l'aménagement durable du territoire forestier (Gouvernement du Québec 2023). Le Québec est une importante province productrice de bois, ressource renouvelable très prisée et utilisée à des fins commerciales dans divers domaines, comme dans les industries des pâtes et papiers, de la construction (bois d'œuvre), des bioproduits (cosmétiques, pharmaceutiques, etc.) et de la bioénergie thermique (granules de bois) (Douville *et al.* 2008). En 2017, le Québec approvisionnait la majorité des besoins des industries en fibres de bois (69%). Cette même année, la plupart des ventes de la ressource (46%) se concentraient dans la province (Gouvernement du Canada 2020). Cependant, dans le contexte actuel des changements climatiques, les enjeux du stockage du carbone deviennent de plus en plus importants. En effet, la captation du dioxyde de carbone (CO₂) et le maintien à long terme des stocks de carbone (C), notamment par l'afforestation de la forêt boréale doivent être opérationnalisés. L'afforestation est l'une des solutions basées sur la nature permettant cette opérationnalisation de la lutte contre les changements climatiques (IPCC 2022). Il est important de maintenir la productivité de cet écosystème tout en y conservant la biodiversité (Kurz *et al.* 2013; Lemprière *et al.* 2013; Price *et al.* 2013). Durant les dernières décennies, de nombreuses études ont montré que ces deux objectifs n'étaient pas antagonistes. Un haut niveau de diversité spécifique favorise en effet la production de biomasse et la résilience des écosystèmes forestiers (Paquette et Messier 2011; Messier *et al.* 2022). Néanmoins, la plupart de ces études concerne les prairies et les espèces herbacées (Loreau *et al.* 2001). À notre connaissance, peu d'études ont testé empiriquement la relation biodiversité-productivité et les mécanismes de complémentarité pour des espèces arborescentes, notamment dans la zone boréale. La mise en évidence d'une telle relation pourrait accroître le potentiel de séquestration du C des plantations et avoir des implications dans les stratégies d'afforestation et de gestion des plantations en milieu boréal.

C'est dans ce contexte de maximisation du stockage de C par l'afforestation, tout en préservant une biodiversité des espèces plantées, que la présente étude a été réalisée. Plus précisément, ce projet vise à connaître les interactions entre trois essences de conifères boréaux à différents niveaux de fertilité : l'épinette noire (*Picea mariana* Mill. ; EPN), le pin gris (*Pinus banksiana* Lamb. ; PIG) et le mélèze laricin (*Larix laricina* Du Roi ; MEL) sont nos espèces d'intérêt en raison de leur présence naturelle en forêt boréale et de leur utilisation commerciale. Les effets de ces interactions sont déterminés sur le prélèvement de l'azote (N) et la productivité des semis. Nous cherchons à évaluer lesquelles des plantations mono- ou plurispécifiques auraient une productivité plus élevée afin de maximiser la séquestration de C dans des milieux improductifs de la forêt boréale. Les résultats de ce mémoire auront aussi une portée pour des efforts d'afforestation pratiqués en forêt boréale.

1.1. L'INFRASTRUCTURE DE RECHERCHE CARBONE BORÉAL

Cette étude a été conduite au sein de l'infrastructure de recherche Carbone boréal de l'Université du Québec à Chicoutimi (UQAC). Carbone boréal a comme principale mission d'augmenter la captation du CO₂ et le maintien à long terme des stocks de C de la forêt boréale québécoise, afin de lutter contre les changements climatiques (Carbone boréal 2020). Carbone boréal a été créé en 2008 sur la base de trois hypothèses : 1) il est possible de planter des arbres dans des territoires considérés comme improductifs pour la foresterie et d'y faire croître des forêts comparables à celles de la pessière à mousse en forêt boréale ; 2) la quantité de C stocké dans ces nouveaux habitats est plus grande qu'en l'absence d'intervention ; et 3) il est possible de quantifier cette absorption additionnelle de C, de la qualifier selon la norme ISO 14064-2 et de l'offrir au public comme outil crédible de compensation des émissions de gaz à effet de serre (GES).

Suivant ces trois hypothèses, Carbone boréal réalise des projets d'afforestation dans des dénuvés secs boréaux (DS) et des friches agricoles (territoires non utilisés pour l'agriculture ; terres en friches impossibles à exploiter) (Carbone boréal 2020). Les DS sont des zones ouvertes de la forêt boréale (couvert à moins de 25 %) résultant de perturbations successives (incendies, épidémies,

etc.) qui conduisent à un échec partiel ou total de la régénération naturelle des arbres (Payette *et al.* 2000; Jasinski et Payette 2005; Girard *et al.* 2009; Payette et Delwaide 2018). Les DS sont des états stables ; ces milieux restent donc peu productifs dans le temps. L'afforestation de tels milieux pourrait donc permettre de créer de nouveaux puits de C (Gaboury *et al.* 2009; Boucher *et al.* 2012; Hebert *et al.* 2013; Mansuy *et al.* 2013; Fradette *et al.* 2021). Dans l'infrastructure de recherche Carbone boréal, les DS sont sous la responsabilité de l'UQAC et ils obtiennent le statut de « zones ou forêts protégées » pendant une période de 30 ans renouvelable (Gouvernement du Québec 2002).

Dans sa vie, un arbre peut absorber une grande quantité de CO₂ : plus la croissance d'un arbre est importante, plus il absorbe de CO₂ et séquestre du C dans sa biomasse. En effet, la moitié de la biomasse sèche d'un arbre correspond à du C (Thiffault *et al.* 2015; IPCC 2019). Une fraction de ce C est transférée dans le sol par le biais de la litière (aérienne et racinaire), le bois mort et les exsudats racinaires (Kurz *et al.* 2009).

Le potentiel de séquestration de projets d'afforestation des DS a été modélisé par le biais d'une analyse de cycle de vie (Gaboury *et al.*, 2009). Cette modélisation mène à une valeur de séquestration nette de 77 t C ha⁻¹ en 70 ans (soit 280 t CO₂ ha⁻¹) pour une densité de plantation d'environ 2 000 plants d'épinette noire par hectare. Cela correspond à une séquestration estimée d'environ 140 kg CO₂ par arbre. Pour autant, les plantations au pin gris pourraient séquestrer une quantité plus importante de C (Boucher *et al.*, 2012; Fradette *et al.*, 2021). Ainsi depuis 2008, avec un peu plus de 1.6 millions d'arbres, Carbone boréal a permis de compenser les émissions de près de 134 500 t d'équivalent CO₂ (éq-CO₂) (Carbone boréal 2020). L'augmentation de la capacité des puits terrestres de C est donc un moyen d'atténuer l'effet des changements climatiques (IPCC 2022). Nous pouvons tout de même relativiser : un québécois moyen émet environ 9 t éq CO₂ an⁻¹ (Gouvernement du Québec 2022). En 70 ans, Carbone boréal compense donc les émissions annuelles de 2 000 québécois. Pour que cela ait un impact significatif, nous devrions le développer à très grande échelle. Boucher *et al.* (2012) estiment que si nous reboisons les DS à forte intensité, cela pourrait compenser jusqu'à 8 % des émissions industrielles du Québec.

Carbone boréal planifie les plantations à partir de questions de recherche. L'une de ces questions concerne la pratique d'une afforestation destinée à maximiser la séquestration de C et d'intégrer de la biodiversité afin d'assurer la résilience de l'écosystème face aux changements climatiques. C'est dans ce contexte que cette étude a été conceptualisée.

1.2. L'AUGMENTATION DU PUIT DE C DE LA FORÊT BORÉALE PAR L'AFFORESTATION DES DS

Dans les DS, les conditions sont peu propices à la germination des graines et au développement des semis et des arbres, en raison de plusieurs perturbations successives (Payette *et al.* 2000). Ces phénomènes empêchent le processus de régénération naturelle des semis, notamment en diminuant la disponibilité des graines et la qualité du sol : appauvrissement en matière organique et en éléments nutritifs, diminution de l'humidité et de la température des sols (Payette *et al.* 2000). Ces milieux sont aussi colonisés par des espèces d'éricacées et de lichens terricoles du genre *Cladonia* qui limitent les possibilités de germination et de développement des semis. Afin d'afforester les DS, il est alors nécessaire de préparer le sol par scarifiage avant de planter de nouveaux semis. Cette technique consiste à retourner la partie superficielle du sol, soit l'horizon organique, pour améliorer les conditions d'implantation et de développement des semis plantés. Cette étape augmente le nombre de microsites propices à l'implantation et au développement des semis en leur permettant l'accès au sol minéral (Madec *et al.* 2012; Hebert *et al.* 2013). Elle améliore également la régénération de l'épinette noire par ensemencement naturel (Prévost 1996; Karlsson *et al.* 2002; Thiffault *et al.* 2004; Madec *et al.* 2012; Hebert *et al.* 2013). Les DS ainsi boisés deviennent des zones plus productives qui pourraient donc créer de nouveaux puits de C permettant de compenser une part des émissions de GES (Boucher *et al.* 2012).

La restauration des écosystèmes serait l'une des stratégies les plus efficaces pour atténuer le changement climatique. En effet, Bastin *et al.* (2019) ont montré que les terres émergées pourraient supporter 0.9 milliard d'hectares supplémentaires de forêt continue. Cela représenterait une

augmentation de plus de 25 % de la superficie forestière actuelle et plus de 200 Gt C supplémentaires pourraient être séquestrées une fois les forêts à maturité. C'est dans ce contexte que des stratégies d'afforestation commencent à voir le jour et celles-ci font partie des solutions basées sur la nature pour réduire les émissions de GES. Par exemple, l'engagement du Canada à planter 2 milliards d'arbres sur une période de 10 ans s'inscrit dans ce genre de stratégies (Gouvernement du Canada 2019).

Toutefois, des questions de recherche demeurent à être répondues. D'un côté, nous pouvons effectivement augmenter les efforts d'afforestation ; mais de l'autre côté nous devons également intégrer une biodiversité, afin que cet effort d'afforestation dure dans le temps. Par exemple, le maintien d'une biodiversité peut optimiser l'utilisation des ressources, la productivité et la résilience des écosystèmes.

Les prochaines sections introduiront et détailleront les méthodes utilisées pour étudier la relation entre la biodiversité et la productivité. D'abord, nous y présentons la capacité de prélèvement de l'azote des trois essences choisies par le biais de méthode de marquage au ^{15}N . Ce suivi est important afin de déterminer comment des espèces différentes croissant sur une même surface utilisent ce nutriment dans un cadre de complémentarité ou de compétition. Ensuite, nous traitons du suivi de la relation même entre la biodiversité et la productivité par l'utilisation d'indicateurs.

1.3. SUIVRE LE PRÉLÈVEMENT DE L'AZOTE PAR LES VÉGÉTAUX : LA MÉTHODE DU MARQUAGE AU ^{15}N

Dans la nature, l'azote (N) est un des principaux facteurs limitants pour la croissance des végétaux du fait de son importance dans le métabolisme et la structure des plantes (Lambers *et al.* 2008; Lupi *et al.* 2013). Il existe par exemple une relation positive entre la concentration en N des feuilles et le taux de photosynthèse du fait de l'importante quantité de N dans leur appareil photosynthétique (chlorophylle, enzymes et protéines de structures) (Hikosaka 2004). Il fait également partie de la structure des acides nucléiques (ADN et ARN). Le N se rencontre sous

différentes formes dans l'environnement qui sont parfois difficilement assimilables par les végétaux : sous forme minérale, comme l'ammonium (NH_4^+) et le nitrate (NO_3^-), et sous forme organique. Bien qu'il ait été démontré que le N organique puisse être prélevé par certaines espèces dans les zones boréale et arctique, le NH_4^+ reste la principale source de N pour les arbres boréaux (Jörger *et al.* 2003). Également, d'autres recherches ont indiqué que la quantité de NO_3^- est négligeable dans les sols boréaux en raison d'une forte immobilisation par les micro-organismes et un faible taux de nitrification (Ste-Marie et Houle 2006; Marty *et al.* 2020).

Plusieurs études ont montré que la limitation de la croissance des arbres boréaux par la disponibilité du N est bien réelle : les dépôts atmosphériques de N ont par exemple stimulé la productivité primaire nette dans les écosystèmes terrestres, comme la forêt boréale, et ainsi amélioré le puits de C terrestre au cours des dernières décennies (Schulte-Uebbing et de Vries 2018). Pour évaluer l'ampleur de ce puits de C induit par le N, une étude sur des données d'expériences de fertilisation forestière a démontré que les forêts boréales et tempérées ont réagi fortement à l'ajout de N et ont séquestré, respectivement, en moyenne 14 et 13 kg de C supplémentaires par kg de N dans la biomasse ligneuse aérienne (Schulte-Uebbing et de Vries 2018). Dans leur expérience, Houle *et al.* (2015) montrent également que, dans l'est de l'Amérique du Nord, en moyenne, 52 à 59 % des dépôts de N ont été interceptés par la canopée, la rétention étant plus élevée pour le NH_4^+ (60 à 67 %) que pour le NO_3^- (45 à 54 %). Leurs résultats suggèrent aussi que les interactions de N avec les couverts forestiers peuvent changer rapidement avec les changements climatiques, notamment dans les dépôts atmosphériques de N, ainsi qu'avec la composition des espèces d'arbres de l'écosystème (Houle *et al.* 2015).

Néanmoins, les conifères boréaux ont développé des stratégies pour faire face à la disponibilité réduite de N dans le sol. Les conifères, en particulier les essences à croissance lente, peuvent par exemple compter sur le cycle interne de N pour soutenir le développement de nouveaux tissus (Lupi *et al.* 2013), surtout au printemps marquant le début d'une nouvelle saison de croissance. De plus, les racines des conifères sont généralement associées à des champignons ectomycorhiziens qui augmentent le volume d'exploration du sol et l'absorption du N, en particulier là

où le N organique prédomine (Duperron 2017). Les conifères prélèvent également une proportion non négligeable des dépôts atmosphériques azotés par le biais de leur canopée (Houle *et al.* 2015).

Cependant, lorsque les dépôts de N atmosphérique sont trop importants et que les perturbations (incendies, épidémies, récoltes, etc.) sont plus fréquentes, ces phénomènes peuvent altérer le cycle de N du sol et affecter la croissance des arbres (Lupi *et al.* 2013), conduisant à une saturation en N des écosystèmes (Aber *et al.* 1998; Aber et Magill 2004; Janssens *et al.* 2010).

Aujourd'hui, le type d'interactions qu'entretiennent nos espèces d'intérêt EPN, PIG et MEL pour l'acquisition des nutriments dans le sol, et particulièrement l'assimilation de N, reste peu connu. Afin de pallier ce manque de connaissance, nous avons étudié le prélèvement du N par ces trois espèces dans différentes conditions de densité et de diversité par le biais de la méthode du marquage au ^{15}N . L'azote a deux isotopes stables : le ^{15}N (0.3663 % du N_{total}) et le ^{14}N (99.6337 % du N_{total}). L'étude de l'abondance naturelle de ces deux isotopes dans le système sol-plante constitue un outil important pour étudier le cycle de N à différentes échelles spatiales et temporelles (Högberg 1997; Templer *et al.* 2012).

Des expériences de marquage avec du N enrichi en ^{15}N ou des différences dans l'abondance naturelle des tissus végétaux en ^{15}N peuvent révéler l'utilisation de différentes formes de N (par exemple, NO_3^- , NH_4^+ , et divers pools de N organique) (McKane *et al.* 2002; Pornon *et al.* 2007; Ashton *et al.* 2010; Gundale *et al.* 2012; Von Felten *et al.* 2012). L'abondance naturelle du ^{15}N dans les différents horizons du sol varie en raison du fractionnement isotopique caractérisant les réactions biochimiques qui se produisent dans le système sol-plante (Högberg 1997). Ce mécanisme est, par exemple, impliqué dans l'augmentation communément rapportée de l'abondance naturelle en ^{15}N du sol avec la profondeur dans divers habitats (Högberg *et al.* 1996; Marty *et al.* 2011). En conséquence de cette augmentation, une différence d'abondance naturelle de ^{15}N foliaire entre les espèces peut refléter une différence de profondeur du prélèvement de N dans le profil du sol (Houle *et al.* 2014). Ainsi, le marquage au ^{15}N dans cette étude est utilisé pour suivre les prélèvements de N dans les divers compartiments (par exemple, foliaire et racinaire) des espèces croissant en cultures mono- et plurispécifiques.

1.4. LA RELATION BIODIVERSITÉ-PRODUCTIVITÉ

Dans la province du Québec, le reboisement des forêts boréales se fait essentiellement par des plantations monospécifiques d'EPN pour des raisons pratiques et logistiques, notamment pour les industries des pâtes et papiers et du bois d'œuvre : l'EPN est l'essence dominante de la forêt boréale au Québec et l'industrie de la province est calibrée pour cette espèce (Gouvernement du Québec 2002; Douville *et al.* 2008). Néanmoins, avec les changements climatiques, l'EPN ne sera peut-être plus aussi productive dans le futur (Lambert-Chan 2014; D'Orangeville *et al.* 2018) ; il est alors intéressant de se tourner vers d'autres essences, afin d'assurer la productivité et la résilience de la forêt boréale. Toutefois, le choix de ces essences doit respecter l'écosystème de la forêt boréale. Il est donc important de conserver des espèces indigènes qui poussent déjà naturellement dans la région, comme l'EPN, le PIG et le MEL (Rainville *et al.* 2003; Despôts *et al.* 2007). La présente étude traite de ces enjeux. Des expériences de plantations en DS ont récemment montré que le PIG et le MEL ont de forts taux de survie et potentiels de croissance à la suite de la plantation (Fradette *et al.* 2021; Marty *et al.* 2023). Toutefois, les interactions qu'entretiennent ces espèces pour l'acquisition et l'assimilation de N dans le sol restent peu connues.

Les résultats de Paquette et Messier (2011) suggèrent qu'il y aurait de nombreux avantages à favoriser des plantations plurispécifiques dans l'afforestation de la forêt boréale : une meilleure productivité, une meilleure résilience de l'écosystème, plus de biodiversité en faune et en flore, etc. (Messier *et al.* 2022). D'autres études sur différentes communautés d'espèces herbacées ont révélé l'existence d'une relation positive entre la biodiversité et la productivité (relation B-P) pour ces diverses communautés (Loreau *et al.* 2001; Ruijven et Berendse 2005; Cardinale *et al.* 2007) et sur des écosystèmes forestiers (Paquette et Messier 2011; Messier *et al.* 2022). La relation B-P résulte de plusieurs mécanismes qui permettent une meilleure exploitation des ressources des habitats par les végétaux.

Cependant, en forêt boréale, la relation B-P entre les différentes essences qui la composent reste peu documentée. Dans notre étude, nous visons à combler ce manque de connaissance en

déterminant les effets des interactions sur le prélèvement de N minéral de trois espèces de conifères boréales EPN, PIG et MEL (cultivées seules ou en mélange). Plus précisément, les mécanismes de compétition intra- et interspécifique et de complémentarité y sont examinés (Ruijven et Berendse 2005). Plusieurs études montrent qu'il existe une relation positive entre la diversité spécifique des arbres et la productivité des forêts, soit une relation de complémentarité (Morin *et al.* 2011; Paquette et Messier 2011). Houle *et al.* (2014) ont montré l'existence d'une complémentarité spatiale pour l'acquisition de N entre le PIG et l'EPN dans plusieurs sites boréaux. D'autres expériences ont aussi montré que ces mécanismes de complémentarité temporelle et/ou spatiale (Price 1995; Loreau et Hector 2001) entraînent une meilleure productivité des espèces, surtout dans des milieux stressants (Hulot *et al.* 2000; Loreau *et al.* 2001; Cardinale *et al.* 2002; Ruijven et Berendse 2005; Cardinale *et al.* 2007).

L'indice du Rendement relatif total (Relative Yield Total - RYT) est généralement utilisé pour déterminer la relation B-P pour des communautés de plantes herbacées (Loreau et Hector 2001). Cet indice montre s'il existe un effet positif ou négatif de la biodiversité d'une plantation : il permet de quantifier un gain ou une perte de productivité d'un mélange d'espèces (polyculture) par rapport à la productivité de ces mêmes espèces en monoculture (Loreau et Hector 2001) (voir la partie 2.5.2).

En s'inspirant du calcul du RYT, nous avons calculé un indice de Compétition intraspécifique (C_{intra}) (méthode décrite dans la partie 2.5.3) pour comparer l'intensité de la compétition intraspécifique, à différents niveaux de densité de semis plantés en monocultures, chez nos trois essences d'intérêt.

1.5. OBJECTIFS ET HYPOTHÈSES DE L'ÉTUDE

Afin de lutter contre les changements climatiques et pour compenser les émissions de GES, il est important de comprendre les caractéristiques des essences à planter, de savoir avec quelle stratégie la plantation doit être effectuée (mono- ou plurispécifiques) et de connaître les particularités du terrain à boiser. Ce projet de maîtrise s'inscrit dans ce contexte puisque nous voulons déterminer

si l'existence éventuelle d'une relation B-P positive provient d'une complémentarité du prélèvement de N entre trois espèces de conifères boréales : l'EPN, le PIG et le MEL. Cette étude apporte aussi des données qui pourront influencer les stratégies de plantation adoptées par Carbone boréal, notamment dans les DS. Dans un cadre plus large, des résultats de ce mémoire pourront aussi être utilisés dans d'autres contextes d'afforestation et de reforestation en forêt boréale.

L'objectif principal de ce projet est de déterminer les effets des interactions entre l'EPN, le PIG et le MEL sur le prélèvement de N et la productivité des semis à deux niveaux de disponibilité de N minéral et en prenant en compte deux autres facteurs :

- Le facteur Densité, correspondant au nombre de semis par unité expérimentale (UE) et donc à un niveau de compétition ;
- Le facteur Diversité spécifique, correspondant au nombre d'espèces par UE.

Les objectifs spécifiques de notre projet sont les suivants :

- 1) Déterminer et comparer la productivité des plantations mono- et plurispécifiques ;
 - L'apport de N vise à déterminer si la croissance et les interactions entre les espèces changent dans un milieu plus fertile. Pour ce faire, nous avons mesuré les effets de la densité de plantation et des associations intra- et interspécifiques sur la dynamique de croissance, la production de biomasse et le prélèvement de N de nos espèces de conifères sélectionnées en présence et en absence de fertilisation azotée ;
- 2) Déterminer la complémentarité ou la compétition entre ces espèces ;
 - Pour vérifier l'existence de tels mécanismes, nous avons calculé le RYT et le C_{intra} dans les différents traitements de densité, de diversité et de fertilisation azotée.

Afin de répondre à cette problématique, nous avons émis diverses hypothèses :

- 1) La densité de semis par UE a un effet négatif sur la production de biomasse totale des semis et sur le prélèvement de l'azote minéral : il existe un effet de compétition intraspécifique entre les semis d'une même espèce (Loreau et Hector 2001) ;

- 2) La diversité spécifique a un effet positif sur la production de biomasse totale des semis et sur le prélèvement de l'azote minéral dans une même UE : il existe un effet de complémentarité entre les espèces (Morin *et al.* 2011; Paquette et Messier 2011) ;
- 3) Le prélèvement d'azote minéral est supérieur dans les UE bi- et trispécifiques en comparaison aux UE monospécifiques en raison d'une complémentarité entre les espèces : il y a un plus grand volume racinaire par volume de sol par UE et donc une meilleure exploitation du réservoir d'azote (Morin *et al.* 2011; Paquette et Messier 2011) ;
- 4) L'apport d'azote minéral augmente la productivité pour l'EPN et le PIG (Newton et Amponsah 2006) ;
- 5) Le prélèvement d'azote minéral est supérieur pour le PIG que pour les deux autres espèces, aussi bien en monoculture qu'en polycultures (Rainville *et al.* 2003; Desponts *et al.* 2007).

2. MATÉRIEL ET MÉTHODES

2.1. SITES DE L'ÉTUDE

Afin de répondre aux objectifs et aux hypothèses de ce projet, les dispositifs expérimentaux ont été installés à l'été 2020 en serres et en milieu naturel. Les serres se situent au Pavillon de la Recherche Forestière (PRF) du campus de l'Université du Québec à Chicoutimi (UQAC).

Les traitements du dispositif en serres ont été dupliqués à la Forêt d'Enseignement et de Recherche de l'UQAC à Simoncouche, 48°11'24" N – 71°12'59"O (Figure 1), afin de vérifier les résultats sur une plus longue échéance et en milieu naturel.

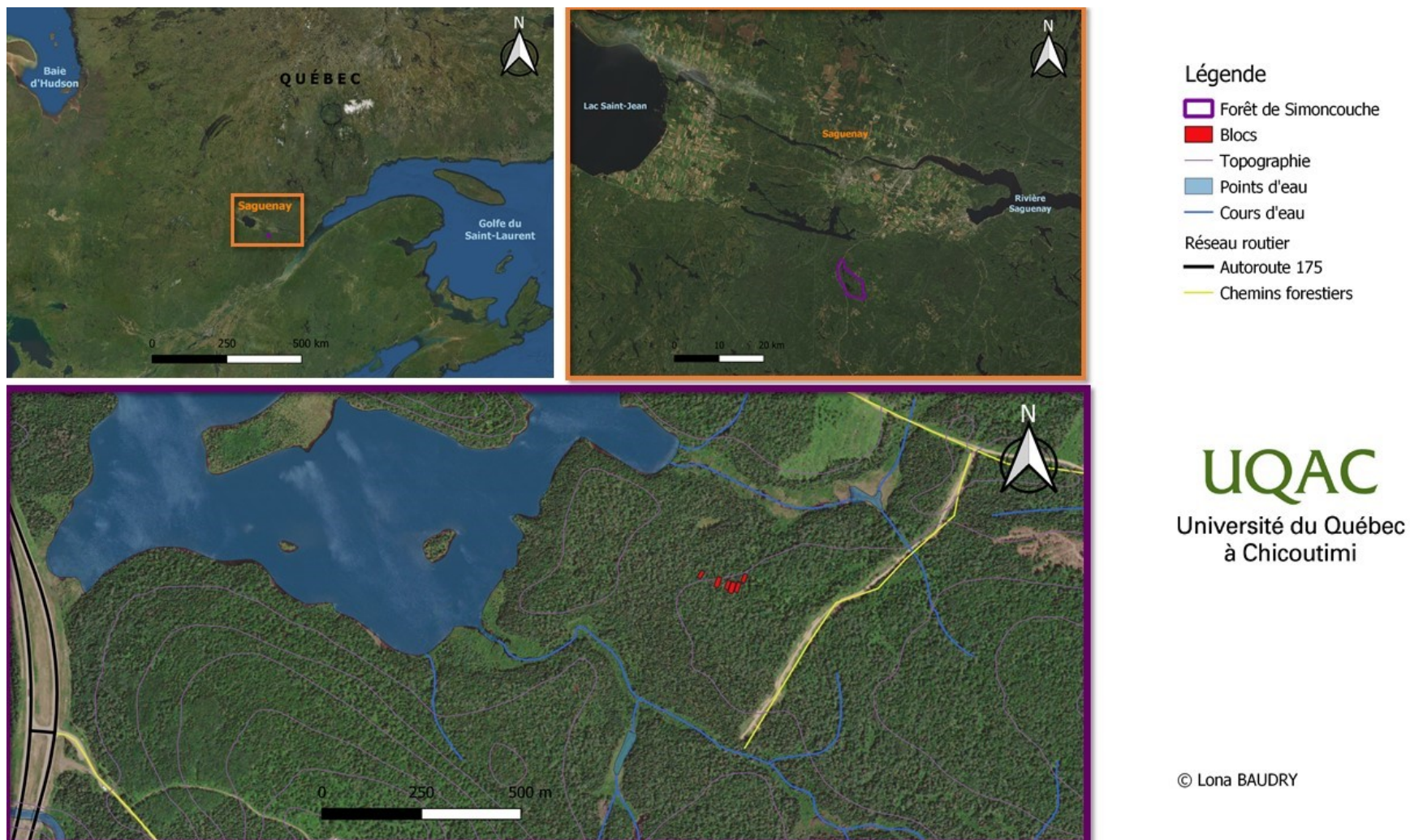


FIGURE 1 : Carte du site de plantation du dispositif expérimental installé à la Forêt d'Enseignement et de Recherche de l'UQAC à Simoncouche.

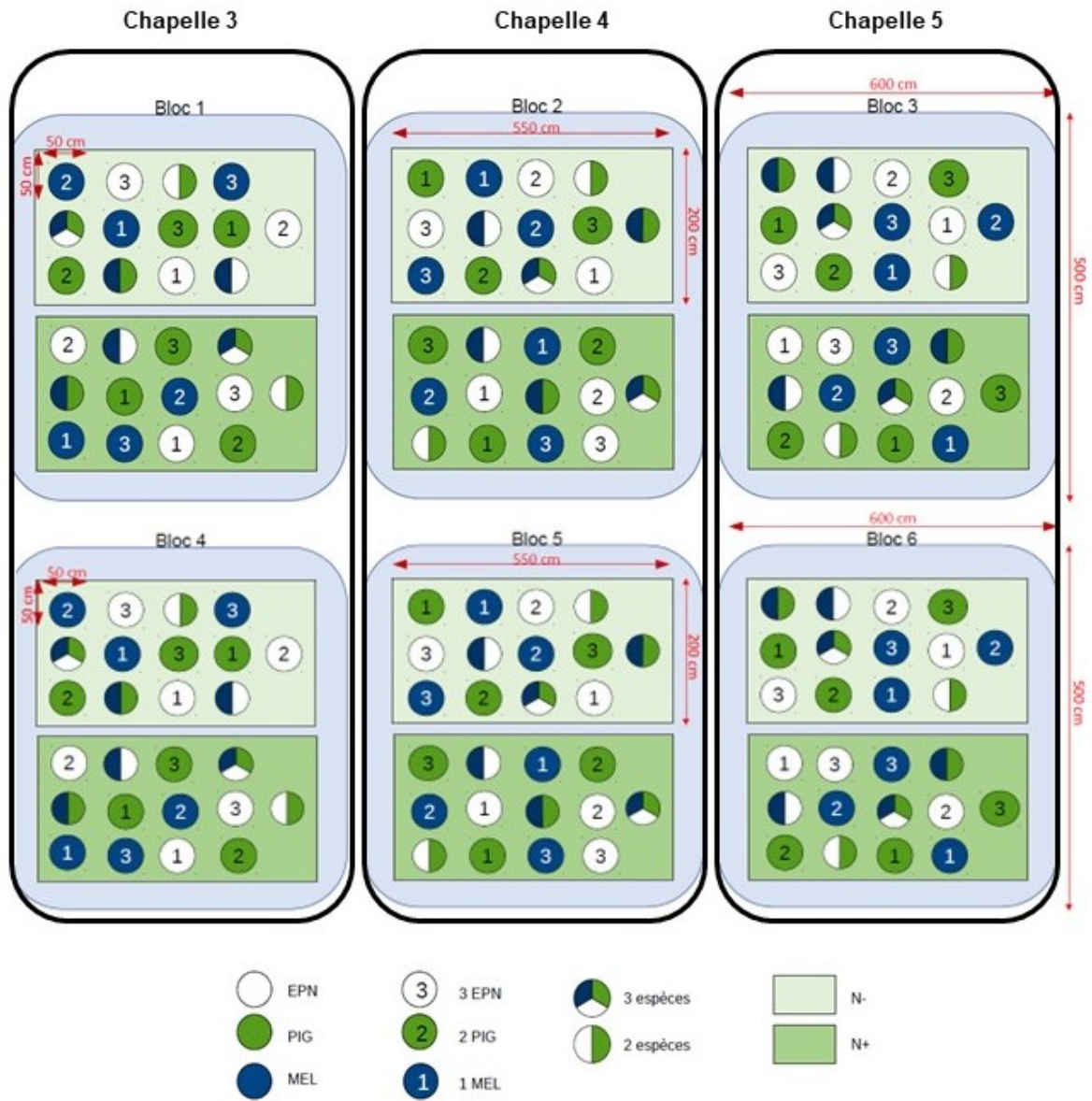
2.2. DISPOSITIFS EXPÉRIMENTAUX

2.2.1. DISPOSITIF EXPERIMENTAL INSTALLÉ EN SERRES

Les dispositifs mentionnés précédemment visent à étudier les interactions entre EPN, PIG et MEL à différents niveaux de fertilité. Pour ce faire, la dynamique de croissance, la production de biomasse et le prélèvement de N des trois espèces ont été mesurés à différents niveaux de disponibilité de N dans le sol. Dans les serres du PRF de l'UQAC, 324 semis ont été cultivés seuls (monocultures) ou en associations (polycultures) dans 156 pots (Figure 2).

Ce dispositif a été organisé en tiroirs (split-plot) comprenant six blocs (Figure 2). Chaque bloc de 26 pots a été divisé en deux sous-blocs correspondant à deux niveaux de traitements de fertilisation azotée : fertilisés (13 pots N+) vs non fertilisés (13 pots N-). À l'intérieur de ces deux sous-blocs, deux traitements de densité et de diversité ont été appliqués (Figure 2). La densité correspond au nombre de semis par pot : un, deux ou trois semis par pot. La promiscuité entre les semis a pour but de détecter des interactions dans le cadre d'une étude de 2 ans. La diversité correspond au nombre d'espèces par pot : monospécifiques à un, deux ou trois semis ; et plurispécifiques à deux essences (bispécifiques) ou à trois essences (trispécifiques) (Figure 2). Les pots utilisés avaient un diamètre de 27 cm et une profondeur de 24 cm. Ils ont été randomisés à l'intérieur des blocs et espacés de 30 cm les uns par rapport aux autres pour que les mesures effectuées dans un pot n'influencent pas celles prises dans un autre pot.

Les semis ont été cultivés pendant un an et demi : de l'été 2020 à l'automne 2021 (soit deux saisons de croissance et un hiver). La température des chapelles 3, 4 et 5 des serres (numéros attribués par l'UQAC) était contrôlée à l'aide du logiciel PRIVA à un maximum de 21 °C (± 2 °C) le jour et à un minimum de 9 °C (± 2 °C) la nuit. Le rapport des températures moyennes mensuelles (en °C) des serres du PRF de l'UQAC est présenté pour les périodes de juin 2020 à octobre 2020 et de mai 2021 à octobre 2021 (Tableau 1). Les semis passaient l'hiver à l'extérieur des serres entre novembre 2020 et avril 2021, afin d'effectuer leur période de dormance.



© Lona Baudry 2023

FIGURE 2 : Schéma du dispositif expérimental installé dans les serres du Pavillon de la Recherche Forestière de l'UQAC.

TABLEAU 1 : Rapport des températures moyennes mensuelles (en °C) des serres du Pavillon de la Recherche Forestière de l'UQAC, pour les périodes de juin 2020 à octobre 2020 et de mai 2021 à octobre 2021 (Logiciel PRIVA).

Année	2020					2021					
Mois	Juin	Juil.	Août	Sept.	Oct.	Mai	Juin	Juil.	Août	Sept.	Oct.
Chap_3	22.16	23.91	20.83	16.18	12.59	19.69	21.41	22.61	24.92	19.84	17.14
Chap_4	20.10	21.28	18.98	14.22	7.71	15.70	19.51	20.47	21.76	17.79	13.67
Chap_5	18.28	21.51	18.89	13.83	9.02	13.40	17.64	19.83	22.16	16.62	14.78

Les semis utilisés pour cette expérience avaient 2 ans en 2020, au jour de leur plantation. Ils ont été plantés entre le 15 et le 17 juin 2020. Les PIG et les MEL et une partie des EPN (blocs 1 à 3) provenaient de la Pépinière Boucher, de la municipalité de Saint-Amboise. Les autres EPN complétant le dispositif (blocs 4 à 6) provenaient de la Pépinière Laterrière du Groupe Forestra (Coopérative forestière). Ces deux pépinières suivent les normes du Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs (MFFP) et elles sont membres de l'Office des producteurs de plants forestiers du Québec. Les semis fournis par ces deux entreprises ont été cultivés dans des récipients 45 – 110 (45 cavités de 110 cm³).

À l'été 2020, les pots des demi-blocs N+ du dispositif ont été fertilisés avec du sulfate d'ammonium [NH₄]₂SO₄ à quatre reprises au début de la saison de croissance 2020. Pour préparer la solution fertilisante, 23.58 g de [NH₄]₂SO₄ ont été ajoutés à 20 L d'eau déminéralisée. Puis, 500 mL de cette solution ont été apportés par pot en humidifiant toute la surface du sol, correspondant à un total de 87 kg N ha⁻¹, soit 0.5 g N pot⁻¹. Le reste du temps, l'arrosage consistait à apporter 500 mL ou 250 mL d'eau déminéralisée, 2 à 3 fois par semaine en fonction de la météo à l'extérieur des serres pour éviter un stress hydrique.

Le nombre de semis plantés a été calculé pour tenir compte de la mortalité qui pouvait survenir durant l'hiver et ainsi assurer au moins trois réplicas valides pour le marquage au ¹⁵N. En 2020, les plants N+ ont reçu une fertilisation azotée non marquée au ¹⁵N puisqu'ils avaient besoin d'une période d'acclimatation à ce traitement. À partir du printemps 2021, les semis dans les pots N+ ont été fertilisés selon la méthode décrite précédemment, avec du sulfate d'ammonium enrichi en ¹⁵N à 10 % ([¹⁵NH₄]₂SO₄). Le marquage au ¹⁵N a été effectué en deux fois : le 19 et le 25 mai 2021.

2.2.2. DISPOSITIF EXPERIMENTAL INSTALLÉ EN MILIEU NATUREL

Le dispositif expérimental, décrit précédemment, a été reproduit dans la Forêt d'enseignement et de recherche de Simoncouche (Figure 1), afin d'étudier les mêmes effets en conditions naturelles et à plus long terme (5 - 10 ans). Le dispositif a été implanté sur une zone de

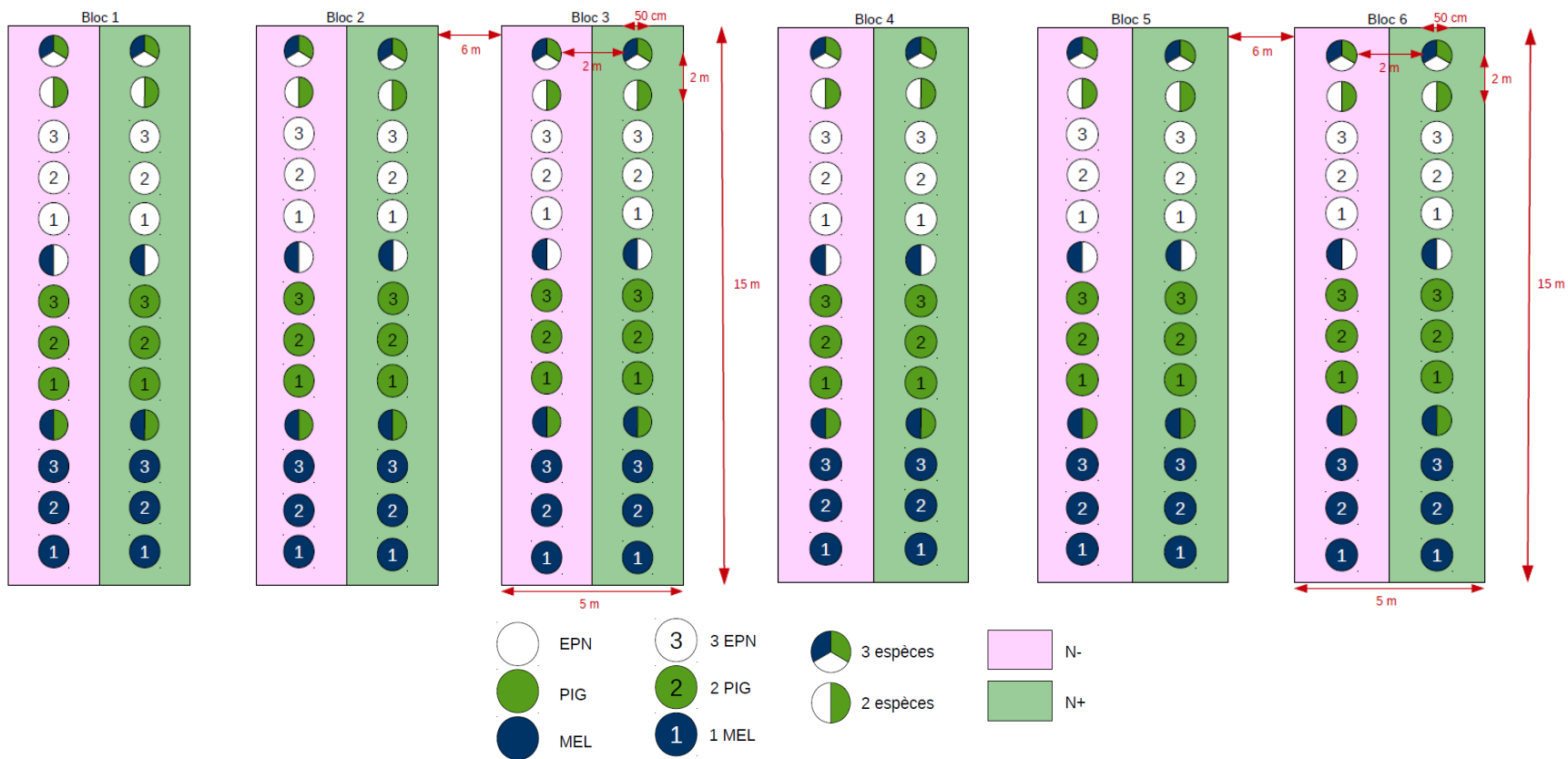
coupe avec protection de la régénération et des sols (CPRS) effectuée en 2019. Le site a ensuite été scarifié avec un scarificateur à disques juste avant la plantation des semis en 2020. La sélection du site d'étude a été faite de manière à privilégier les microsites les plus adéquats et les plus homogènes possibles (même type de sol, libre de débris, microsites homogènes, sillons de largeurs similaires et aucun gradient de pente à l'intérieur de chacun des blocs). Les principales caractéristiques du peuplement d'origine et du sol de cette zone d'étude sont répertoriées dans l'Annexe 1 de ce mémoire.

Un total de 324 semis sont cultivés sur le terrain dans 156 placettes (Figure 3), organisées en tiroir et comprenant six blocs (Figures 1 et 3). Les traitements de ce dispositif étaient les mêmes que pour celui installé dans les serres du PRF (Figures 2 et 3). La distance entre les placettes n'étaient pas homogènes en raison de l'hétérogénéité du site. La distance entre chaque bloc était d'environ quatre sillons (minimum de 6 m entre les blocs) et la distance entre deux sillons était d'un minimum de 2 m (Figure 3).

Les semis utilisés pour cette expérience avaient 2 ans en 2020, au jour de leur plantation. Ils ont été plantés entre le 22 et 24 juin 2020. Les PIG, les MEL et une partie des EPN (blocs 5 et 6) provenaient de la Pépinière Boucher. Les autres EPN complétant le dispositif (blocs 1 à 4) provenaient de la Pépinière Laterrière. Les semis N+ ont ensuite été fertilisés avec du $[\text{NH}_4]_2\text{SO}_4$ à deux reprises : le 30 juin 2020 et le 31 juillet 2020. Pour préparer la solution fertilisante, 92.60 g de $[\text{NH}_4]_2\text{SO}_4$ sont ajoutés à 20 L d'eau déminéralisée et 87.97 g de $[\text{NH}_4]_2\text{SO}_4$ sont ajoutés à 19 L d'eau déminéralisée. Puis, 500 mL de cette solution sont ajoutés par placette sur un diamètre de 50 cm autour du semis ou des semis présents sur la placette. Cela équivaut à un total d'environ 50 kg N ha^{-1} , soit $1 \text{ g N placette}^{-1}$.

La station météorologique la plus proche du site d'étude est celle de Bagotville (Environnement Canada 2021), située à 159.10 m d'altitude, $48^\circ 20' 00'' \text{ N} - 71^\circ 00' 00'' \text{ O}$. La normale climatique pour la période 1981 à 2010 indique une température moyenne de $2.8 \text{ }^\circ\text{C}$ et des précipitations totales annuelles de 930.6 mm, dont 321.7 mm sous forme de neige (Environnement Canada 2021). Le rapport des données météorologiques moyennes mensuelles de la station de Bagotville pour la période de juin 2020 à octobre 2021 est présenté ci-dessous (Tableau 2).

Le nombre de semis plantés a été planifié pour tenir compte de la mortalité qui pourrait survenir durant l'hiver ou en cours d'expérience à cause de ravageurs ou de brouteurs, par exemple. De plus, l'été et l'automne 2020 correspondent à la première période de croissance de nos semis sur le site. Les semis des placettes N+ ont reçu une fertilisation azotée en 2020 puisqu'ils avaient besoin d'une période d'acclimatation. À partir du printemps 2021, les semis N+ ont été fertilisés à nouveau deux fois avec du sulfate d'ammonium enrichi au ^{15}N selon la méthode décrite précédemment (le 27 mai 2021 et le 08 juin 2021).



© Lona Baudry 2023

FIGURE 3 : Schéma du dispositif expérimental installé dans la Forêt d'Enseignement et de Recherche de l'UQAC à Simoncouche.

TABLEAU 2 : Rapport des données météorologiques moyennes mensuelles de la station de Bagotville, pour la période de juin 2020 à octobre 2021 (Rapport de données quotidiennes, Gouvernement du Canada). *Légende des abréviations :* température maximale moyenne ($T^{\circ}\text{max.moy}$, en °C) ; température minimale moyenne ($T^{\circ}\text{min.moy}$ - en °C) ; température moyenne ($T^{\circ}\text{moy}$, en °C) ; somme de la pluie totale tombée ($\Sigma\text{pluie.tot}$, en mm) ; somme de la neige totale tombée ($\Sigma\text{neige.tot}$, en cm) ; somme des précipitations totales ($\Sigma\text{précip.tot}$, en mm).

Année	2020						
Mois	Juin	Juil.	Août	Sept.	Oct.	Nov	Déc
T°max.moy (°C)	23.5	26	23.6	16.9	8.1	3.9	-3
T°min.moy (°C)	9.1	14	11.3	5.4	-0.4	-3.8	-11.1
T°moy (°C)	16.3	20	17.4	11.2	3.9	0.1	-7.1
$\Sigma\text{pluie.tot}$ (mm)	58.3	109.6	118.4	129.4	99.9	8.8	8.4
$\Sigma\text{neige.tot}$ (cm)	0	0	0	0	7	37.9	67.5
$\Sigma\text{précip.tot}$ (mm)	58.3	109.6	118.4	129.4	106	34.6	56.7

Année	2021									
Mois	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil.	Août	Sept.	Oct.
T°max.moy (°C)	-7.1	-6.5	1.3	10.8	16.8	23.4	24.3	27.5	19.1	13.9
T°min.moy (°C)	-13.7	-16.5	-10.9	-1.2	3.2	10.2	10	13	8.8	3.7
T°moy (°C)	-10.4	-11.5	-4.8	4.8	10	16.7	17.2	20.3	14	8.8
$\Sigma\text{pluie.tot}$ (mm)	0	0	37.2	17.6	84.1	95.5	66.6	29	87.2	65.4
$\Sigma\text{neige.tot}$ (cm)	34.6	42.6	33.2	32.7	0	0	0	0	0	0
$\Sigma\text{précip.tot}$ (mm)	20.1	32.9	70	46.1	84.6	95.5	66.6	29	87.2	65.4

2.3. MESURES DES INDICES DE PRODUCTIVITÉ

Les mesures des indices de croissance ont été réalisées sur les 324 semis du dispositif en serres et les 324 semis du dispositif à Simoncouche. Sur l'ensemble des deux périodes de croissance, les indices de croissance mesurés sur les semis des deux dispositifs correspondent à la hauteur totale et à la croissance apicale, à l'aide d'un ruban à mesurer.

Les mesures de la hauteur et de la croissance apicale des semis du dispositif à Simoncouche ont été effectuées à plusieurs reprises durant la période de croissance du jour de leur plantation (t_{initial} : 24 juin 2020) jusqu'à la fin du projet (t_{final} : 01 octobre 2021). Sur le dispositif en serres, ces mêmes mesures ont été prises entre le jour de leur plantation (t_{initial} : 17 juin 2020) jusqu'à l'arrivée de l'hiver 2020, puis au début et à la fin de la période de croissance 2021 (t_{final} : 09 septembre 2021). Les mesures présentées sont celles du t_{initial} le 17 juin 2020 et du t_{final} le 09 septembre 2021. Une fois les dernières mesures réalisées, le sol et les semis des blocs 1, 2 et 3 de ce dispositif ont été récoltés séparément, afin de déterminer les concentrations en éléments échangeables (P, K, Ca, Mg, Mn, Cu, Zn, Al, Fe, Mo, Na, B et S) présents dans le sol utilisé, ainsi que la biomasse aérienne et racinaire de chaque semis. Des analyses subséquentes en laboratoire sur le sol et sur les tissus végétaux ont été effectuées et décrites dans les parties suivantes (2.4, 2.5, 2.6).

2.4. MESURE DE LA BIOMASSE TOTALE

La biomasse totale (BT, en g) d'un semis est représentée par l'équation suivante :

$$(1) \quad BT \text{ (g)} = BA + BR$$

Où BT est la biomasse totale (en g) et BA et BR sont respectivement les biomasses aérienne et racinaire (en g). La méthodologie pour obtenir la BA est décrite dans la partie suivante, 2.4.1, et celle pour obtenir la BR est présentée dans la partie 2.4.2. La BT ainsi que les autres variables décrites ci-dessous (N_{dff} , RYT et C_{intra}) ont été mesurées sur les blocs 1, 2 et 3 du dispositif en serres uniquement. Les blocs 4, 5 et 6 ont été conservés pour suivre l'étude sur un plus long terme.

2.4.1. MESURE DE LA BIOMASSE AÉRIENNE

La biomasse aérienne a été mesurée sur 162 semis du dispositif en serres (ceux des blocs 1, 2 et 3, soit la moitié du dispositif expérimental) au mois de novembre 2021. Pour ce faire, les semis ont été retirés de leur pot et ceux des UE à deux ou trois semis ont été séparés. Ensuite, pour chaque semis, nous avons séparé les racines de la tige principale au niveau du collet à l'aide d'un sécateur. Les branches et les aiguilles de l'année 2021 ont été séparées pour des analyses isotopiques. Enfin, nous avons coupé les autres branches de la tige principale et séparé les branches des aiguilles. Chaque compartiment ainsi séparé a été identifié et séché à l'étuve pendant 48 h à 65 °C, puis pesé pour chacun des semis. Ainsi, pour un semis, la somme de tous ces compartiments est égale à la biomasse aérienne totale en base sèche.

2.4.2. MESURE DE LA BIOMASSE RACINAIRE

Cette évaluation a été effectuée sur les racines des semis dépotés à l'étape précédente (162 semis du dispositif en serres). Une fois les racines séparées et récupérées individuellement, elles ont été rincées dans deux bains d'eau distillée, afin de bien retirer le sol résiduel. Après les avoir égouttées, nous les avons faites sécher à l'étuve pendant 48 h à 65 °C, puis nous les avons pesées.

2.5. ÉCHANTILLONNAGE ET ANALYSES DES TISSUS VÉGÉTAUX

Des échantillons de tissus végétaux ont été préparés à l'automne 2021, afin d'analyser la concentration en azote foliaire et racinaire, ainsi que la signature isotopique de l'azote foliaire et racinaire ($\delta^{15}\text{N}$) pour chacun de nos semis des blocs 1, 2 et 3 du dispositif en serres. Une fois les différents compartiments des biomasses aérienne et racinaire pesés, un sous-échantillon composite de l'ensemble des aiguilles et un autre sous-échantillon de racines des 81 semis ayant reçu le marquage au ^{15}N ont été séchées à 65 °C pendant 48 h, puis broyées à < 300 μm à l'aide d'un broyeur à billes. Avec la même méthodologie, des sous-échantillons d'aiguilles et de racines

de 9 semis témoins (non fertilisés au ^{15}N) ont été produits. Ce qui équivaut à un total de 180 sous-échantillons. Toute cette préparation était précédée de l'étape destructive présentée à la section 2.4.

2.5.1. MÉTHODE DU MARQUAGE AU ^{15}N

Dans les blocs 1, 2 et 3 du dispositif en serres de notre étude, la méthode du marquage au ^{15}N permet d'estimer la capacité de prélèvement de N dérivé du fertilisant de chaque espèce en fonction des facteurs densité (nombre de semis par UE) et de diversité (nombre d'espèce par UE). Les analyses d'abondance en ^{15}N des aiguilles et des racines ont été effectuées au GEOTOP de l'Université du Québec à Montréal (UQAM) par spectrométrie de masse.

Au GEOTOP, les sous-échantillons d'aiguilles et de racines, indiqués dans la partie 2.5, ont été pesés dans des nacelles en étain et ont ensuite été analysés à l'aide d'un spectromètre de masse à ratio isotopique (IRMS) de marque Micromass modèle Isoprime 100 qui a été couplé à un analyseur élémentaire de marque Elementar modèle Vario MicroCube en mode « flux continu ». Les rapports d'isotopes stables sont généralement mesurés via la technique IRMS (Sulzman 2007). Tous les éléments de l'environnement ont des isotopes qui varient entre eux seulement par le nombre de neutrons contenus dans leur noyau, leur donnant des masses atomiques différentes. Le spectromètre de masse est un instrument qui sépare les atomes (ou les molécules) chargés sur la base de leur rapport, exprimé de la façon suivante : $\frac{\text{masse}}{\text{charge}}$ (en m z^{-1}) (Sulzman 2007).

Deux matériaux de références internes ($\delta^{15}\text{N} = -0.08 \pm 0.11\text{‰}$ et $14.78 \pm 0.07\text{‰}$) ont été utilisés dans le spectromètre de masse du GEOTOP pour normaliser les résultats sur l'échelle AIR (IAEA-N1, IAEA-N2 et IAEA-N3). Les résultats d'abondance en ^{15}N obtenus pour nos sous-échantillons sont exprimés en $\delta^{15}\text{N}$ (‰) et en abondance isotopique (A en %) comme décrits ci-dessous.

Les variations d'abondance isotopique entre les différents compartiments de l'environnement sont généralement très faibles. De ce fait, l'abondance isotopique est exprimée sous forme d'écarts en parties par milliers ($\delta^{15}\text{N}$, ‰) par rapport à l'abondance naturelle d'un standard (le N_2 de l'air), selon l'équation suivante (Hobbie et Högberg 2012) :

$$(2) \quad \delta^{15}\text{N} (\text{‰}) = \left(\frac{R_{\text{éch}} - R_{\text{std}}}{R_{\text{std}}} \right) * 1000$$

Où $R_{\text{éch}}$ et R_{std} étant les ratios $\frac{^{15}\text{N}}{^{14}\text{N}}$ de l'échantillon et du standard (air), respectivement. Le R_{std} de l'air est égal 0,0036765 (Mariotti 1983; Hoefs 1997). Par convention, le $\delta^{15}\text{N}$ air est donc égal 0 ‰.

L'abondance isotopique (A) d'un échantillon correspond à la proportion de ^{15}N , exprimée en %, dans le réservoir total de N qu'il contient. Celle-ci peut être obtenue à partir des ratios isotopiques, selon l'équation suivante (Hobbie et Högberg 2012) :

$$(3) \quad A (\%) = \left(\frac{R_{\text{éch}}}{1 + R_{\text{éch}}} \right) * 100$$

Où $R_{\text{éch}}$ étant le ratio $\frac{^{15}\text{N}}{^{14}\text{N}}$ de l'échantillon.

Lorsque nous mesurons l'abondance isotopique (A) d'un échantillon, nous pouvons aussi en déduire son excès isotopique. Il correspond à l'excès de ^{15}N dans un échantillon enrichi en ^{15}N par rapport à un contrôle. Nous avons mesuré l'excès isotopique dans la biomasse des semis fertilisés par rapport aux semis contrôles (non fertilisés) de la façon suivante :

$$(4) \quad \text{Excès isotopique}_{\text{éch}} (\%) = A_{\text{éch}} - A_{\text{cont}}$$

Où $A_{\text{éch}}$ et A_{cont} étant les abondances isotopiques d'un échantillon de semis fertilisé et d'un contrôle (semis non fertilisé), respectivement.

L'excès isotopique du fertilisant au sulfate d'ammonium utilisé dans notre expérience a également été déterminé par rapport à l'abondance naturelle du ^{15}N dans l'air :

$$(5) \quad \text{Excès isotopique}_{\text{fert}} (\%) = A_{\text{fert}} - A_{\text{std}}$$

$$(6) \quad \text{Excès isotopique}_{\text{fert}} (\%) = 10 - 0.3663$$

Où A_{fert} étant la concentration en ^{15}N présente dans le fertilisant ($A = 10 \%$).

À partir de ces calculs d'excès isotopiques, nous pouvons obtenir la proportion de N dérivé du fertilisant (Ndff) contenu dans les aiguilles et les racines des semis fertilisés, exprimée en % de la manière suivante (Chalk 2018) :

$$(7) \quad \text{Ndff (\%)} = \frac{\text{excès isotopique éch}}{\text{excès isotopique fert}} * 100$$

2.5.2. CALCUL DU RENDEMENT RELATIF TOTAL (RYT)

Dans notre étude, l'indice du Rendement relatif total (Relative Yield Total - RYT) permet de quantifier un gain ou une perte de productivité d'un mélange d'espèces par rapport à la productivité de ces mêmes espèces en monoculture. Il se calcule de la manière suivante :

$$(8) \quad \text{RYT} = \frac{\sum Y_{i\text{Mix}}}{\sum Y_{i\text{Mo}}}$$

Où $Y_{i\text{Mix}}$ est la productivité de l'espèce i en culture plurispécifique (Mix) ; et $Y_{i\text{Mo}}$ est la productivité de l'espèce i en monoculture (Mo).

Le RYT a d'abord été appliqué à des espèces herbacées à partir de mesures de la productivité par unité de surface (Loreau et Hector 2001). Le calcul de la productivité d'un mélange d'espèces herbacées nécessite la mesure de la surface de recouvrement de chacune des espèces qui constitue le mélange. Cependant, le calcul de recouvrement est difficile lorsque nous travaillons avec des semis. Cet indice a donc été adapté pour répondre au besoin du projet. Nous avons calculé le RYT sur la base de la BT et du nombre de semis de chaque espèce plutôt que sur la base du recouvrement : est-ce que les semis cultivés en mélange produisent plus de biomasse que ceux plantés en monocultures ? Nous l'avons mesuré de la manière suivante :

$$(9) \quad \text{RYT} = \frac{Y_{\text{totalMix}}}{Y_{\text{totalMo}}}$$

Où Y_{totalMix} est la productivité du mélange d'espèces en culture plurispécifique (Mix) et Y_{totalMo} est la productivité de l'espèce en monoculture (Mo).

$$(10) \quad Y_{\text{totalMix}} = \sum Y_i$$

Où $\sum Y_i$ est la somme de la productivité des espèces i (EPN, PIG et/ou MEL), présents dans le pot ou la placette plurispécifique ; et Y_{totalMo} est la productivité des espèces en culture monospécifique (Mo).

$$(11) \quad Y_{\text{totalMo}} = \sum_x \frac{1}{x} Y_i$$

Où Y_i est la productivité de x semis de l'espèce i en monoculture ; et $\sum_x \frac{1}{x} Y_i$ est la somme de la productivité du nombre de semis x de l'espèce i (EPN, PIG et/ou MEL), présents dans le pot ou la placette monospécifique ($x = 2$ ou 3).

Par exemple, pour étudier cette relation B-P et les interactions interspécifiques dans le cas d'un mélange à trois espèces :

$$(12) \quad Y_{\text{totalMix}} = Y_{\text{EPN(Mix)}} + Y_{\text{PIG(Mix)}} + Y_{\text{MEL(Mix)}}$$

$$(13) \quad Y_{\text{totalMo}} = \frac{1}{3} Y_{\text{EPN(Mo)}} + \frac{1}{3} Y_{\text{PIG(Mo)}} + \frac{1}{3} Y_{\text{MEL(Mo)}}$$

$$(14) \quad \text{RYT} = \frac{Y_{\text{EPN(Mix)}} + Y_{\text{PIG(Mix)}} + Y_{\text{MEL(Mix)}}}{\frac{1}{3} Y_{\text{EPN(Mo)}} + \frac{1}{3} Y_{\text{PIG(Mo)}} + \frac{1}{3} Y_{\text{MEL(Mo)}}$$

Où $Y_{\text{EPN(Mo)}}$, $Y_{\text{PIG(Mo)}}$ et $Y_{\text{MEL(Mo)}}$ sont respectivement la productivité de pots monospécifiques de EPN, PIG et MEL contenant 3 semis. Par conséquent, si $\text{RYT} < 1$, cela signifie qu'il existe un effet négatif de la biodiversité : le mélange des espèces entraîne une perte de productivité par rapport aux monocultures. Au contraire, si $\text{RYT} > 1$, alors il existe un effet positif de la biodiversité : le mélange des espèces entraîne un gain de productivité par rapport aux monocultures.

2.5.3. CALCUL DE L'INDICE DE COMPÉTITION INTRASPÉCIFIQUE (C_{INTRA})

Nous cherchons également à évaluer l'intensité de compétition intraspécifique pour chaque espèce étudiée, soit de savoir si un semis seul (pot à un semis) produit plus de biomasse que des densités plus élevées (pots à deux et trois semis monospécifiques). Ainsi, un indice de Compétition intraspécifique (C_{intra}) a été calculé à partir de la BT des semis pour comparer l'intensité de la compétition intraspécifique chez les trois espèces d'intérêt :

$$(15) \quad C_{\text{intra}} = \frac{Z_i}{\sum_x \frac{1}{x} Y_i}$$

Où Z_i est la productivité d'un semis cultivé seul de l'espèce i (EPN, PIG ou MEL) et $\sum_x \frac{1}{x} Y_i$ est la somme de la productivité du nombre de semis x de l'espèce i , présents dans le pot monospécifique ($x = 2$ ou 3).

Si $C_{intra} > 1$, cela montre qu'il existe un effet de compétition intraspécifique : pour une espèce donnée, les semis cultivés seuls, soit à densité 1, sont plus productifs que les semis cultivés à densité 2 et 3 en monocultures. Au contraire, si $C_{intra} < 1$, cela signifie qu'il n'existe pas d'effet de compétition intraspécifique pour nos espèces d'intérêt : pour une espèce donnée, les semis cultivés à densité 2 et 3 en monocultures sont plus productifs que les semis cultivés seuls, soit à densité 1.

2.6. ÉCHANTILLONNAGE ET ANALYSES DE SOL

Dans un premier temps, afin de déterminer les caractéristiques des sols du dispositif à Simoncouche avant l'application de traitements, des échantillons ont été prélevés dans les sillons de scarifiage par carottage, à l'aide d'une sonde Eijkelkamp de 8 cm de diamètre par 15 cm de long, le jour de la plantation des semis : nous avons alors obtenu 6 échantillons, soit un échantillon de sol par bloc. Ces échantillons ont été séchés à l'air libre jusqu'à l'obtention d'une masse constante, puis ils ont été tamisés au tamis de maille de 2 mm pour l'obtention de la fraction fine. Cette fraction de < 2 mm a été utilisée pour les analyses du pH (mesuré en mélange avec de l'eau) et des éléments échangeables (P, K, Ca, Mg, Mn, Cu, Zn, Al, Fe, Mo, Na, B et S), selon la méthode MehlichIII, au laboratoire de chimie organique et inorganique de la Direction de la Recherche Forestière (DRF) du Ministère de la Forêt, de la Faune et des Parcs (MFFP) de Québec. Le C_{tot} et le N_{tot} ont été analysés par combustion sèche au laboratoire de la DRF sur une fraction broyée à < 250 μm (avec un broyeur à billes).

Pour le dispositif en serres, la concentration en matière organique du sol a été déterminée avant l'application des traitements. Un échantillon de ce sol, utilisé pour tous les pots du dispositif, a été prélevé le jour de la plantation des semis. Il a ensuite été tamisé au tamis de maille de 2 mm pour l'obtention de la fraction fine. Les fractions supérieures et inférieures à 2 mm ont été pesées

séparément. Un sous-échantillon d'environ 200 g de chacune des fractions fines a été séché à 105 °C pendant 24 h pour déterminer le taux d'humidité et en déduire la masse sèche de sol sec dans tous les pots. Avant la formation de l'échantillon composite, une portion d'environ 10 g de la fraction fine de chaque sous-échantillon a été broyée à < 250 µm. Ces sous-échantillons ont ensuite été utilisés pour déterminer la concentration en matière organique par perte au feu. La fraction restante broyée à < 2 mm (et non à < 250 µm) a été utilisée pour la caractérisation du pH et des éléments échangeables.

Les résultats des analyses du pH, du C_{tot} , du N_{tot} et des éléments échangeables (P, K, Ca, Mg, Mn, Cu, Zn, Al, Fe, Mo, Na, B et S) sont présentés dans le tableau ci-dessous pour les échantillons de sol des deux dispositifs en serres et à Simoncouche (Tableau 3). Tous les résultats sont rapportés sur une base de masse sèche à 105 °C.

TABLEAU 3 : Résultats des analyses du pH, du C_{tot}, du N_{tot} et des éléments échangeables (P, K, Ca, Mg, Mn, Cu, Zn, Al, Fe, Mo, Na, B et S) des sols utilisés pour les deux dispositifs en serres et à Simoncouche.

Dispositif	M.O. (g/kg)	Humidité (%)	C tot (g/kg)	N tot (g/kg)	pH	P (mg/kg)	K (mg/kg)	Ca (mg/kg)	Mg (mg/kg)
Serres	108	< 0.5	77	2.3	7.75	92	436	24400	739
Simoncouche	42	< 0.5	17	0.8	5.24	45	30	152	24

Dispositif	Mn (mg/kg)	Cu (mg/kg)	Zn (mg/kg)	Al (mg/kg)	Fe (mg/kg)	Mo (mg/kg)	Na (mg/kg)	B (mg/kg)	S (mg/kg)
Serres	78	6	14	2580	678	< 1	107	3	121
Simoncouche	30	< 1	2	2090	473	< 1	10	< 1	22

2.7. ANALYSES STATISTIQUES

Pour les deux dispositifs expérimentaux, la population statistique correspond aux trois essences de conifères : l'épinette noire (EPN), le pin gris (PIN) et le mélèze laricin (MEL). L'unité d'observation (UO), unité à laquelle une mesure est prise, correspond à un semis. Tandis que l'unité expérimentale (UE), unité à laquelle un traitement est appliqué, correspond à un pot ou à une placette. Le nombre de réplicas correspond au nombre de blocs pour chacun des dispositifs. Tout d'abord, nous avons retenu les blocs 1, 2 et 3 du dispositif en serres, puisque nous conservons les blocs 4, 5 et 6 pour perpétuer cette expérience sur une plus longue durée. Une ANOVA en modèle mixte a été effectuée, afin de tester l'effet des traitements sur les variables dépendantes. Ces dernières correspondent à l'ensemble des mesures effectuées : biomasse totale (BT), Ndff, RYT et C_{intra}. Les facteurs fixes sont la fertilisation, la densité et la diversité. Le facteur aléatoire correspond au bloc. Les mesures sur la BT, le Ndff, le RYT et le C_{intra} impliquent tout le pot, nous obligeant à traiter les monocultures et les polycultures séparément, pour réaliser les analyses statistiques.

Plus particulièrement, la variable « croissance totale » a été calculée sur les six blocs du dispositif en serres et sur les six blocs du dispositif à Simoncouche. Pour les analyses statistiques, les facteurs aléatoires correspondent ainsi aux blocs, et aux chapelles pour le dispositif en serres exclusivement. Concernant les facteurs fixes, nous retrouvons la fertilisation, la densité (Dens) et la diversité (Div). Pour rappel, le traitement Dens correspond au nombre de semis par UE et il contient trois niveaux : cultures monospécifiques à 1, 2 ou 3 semis par UE (Partie 2.2.1). Quant au traitement Div, il correspond au nombre d'espèces présentes dans l'UE. Il est aussi de trois niveaux : culture monospécifique à 1 espèce, cultures plurispécifiques à 2 ou 3 espèces par UE (Partie 2.2.1). Pour tenir compte des différentes combinaisons possibles entre ces deux facteurs, nous en avons créé un nouveau, le facteur Dens-Div, qui contient 5 niveaux de traitement :

- Dens = 1 – Div = 1 (UE à un semis) ;
- Dens = 2 – Div = 1 (UE à 2 semis d'une même espèce) ;
- Dens = 2 – Div = 2 (UE à 2 semis de 2 espèces différentes) ;

- Dens = 3 – Div = 1 (UE à 3 semis d'une même espèce) ;
- Dens = 3 – Div = 3 (UE à 3 semis de 3 espèces différentes).

Le facteur Dens-Div représente ainsi l'effet combiné des facteurs densité et diversité de chaque UE pour la variable « croissance totale » seulement. En effet, nous souhaitons essentiellement faire ressortir l'effet de la fertilisation et l'effet de l'espèce sur la croissance totale des semis. De plus, pour la variable RYT, nous avons créé le facteur Esp-Div : cet indice a été déterminé seulement pour les semis en mélanges, soit les semis en cultures plurispécifiques à diversité 2 et 3.

Afin de réaliser les analyses statistiques sur les données du dispositif en serres, le facteur « pot » est imbriqué dans le facteur aléatoire « bloc » pour la BT, le Ndff, le RYT et le C_{intra} . Le facteur « pot » est imbriqué dans les facteurs aléatoires « bloc » et « chapelle » pour la croissance totale. Quant au dispositif à Simoncouche, le facteur « placette » est imbriqué seulement dans le facteur aléatoire « bloc ». Au sujet de ce dispositif à Simoncouche, seuls les effets de la fertilisation sur la croissance totale des semis ont été évalués. Aucune mesure destructive n'a été réalisée dans le but de conserver cette expérience en milieu naturel, et ainsi d'avoir des résultats sur plusieurs années. Les parties 3.2, 3.3 et 3.4 des résultats ne vont traiter que des analyses statistiques effectuées sur les semis des blocs 1, 2 et 3 du dispositif en serres.

Les résultats des ANOVA donnaient le nombre de coefficient (Nb coef), les degrés de liberté (ddl), le rapport de F (*F ratio*) et la valeur de *P* (*P*) en fonction des facteurs sur la variable analysée. La condition d'homogénéité des variances était respectée et les valeurs n'ont pas été transformées. Les analyses statistiques ont été réalisées avec le logiciel JMP selon la procédure des moindres carrés. Le seuil de signification a été fixé à $\alpha = 0.05$. Lorsqu'un traitement avait un effet significatif, un test post hoc HSD de Tukey a été effectué pour toutes les variables. De plus, pour les variables RYT et C_{intra} , un test non paramétrique des rangs de Wilcoxon a été réalisé si des différences significatives entre les niveaux de chaque traitement étaient observées.

3. RÉSULTATS

3.1. EFFETS DE LA FERTILISATION ET DE L'ESPÈCE SUR LA CROISSANCE DES SEMIS

Les résultats de l'ANOVA de l'ensemble des cultures montrent que les facteurs fertilisation et espèces ont eu un effet significatif sur la croissance totale des semis du dispositif en serres (Tableau 4.a). La croissance totale était en moyenne significativement supérieure pour le MEL (22.5 cm) que pour le l'EPN (13.3 cm) que pour le PIG (10.6 cm). La croissance totale était presque deux fois plus importante dans les pots fertilisés (N+) que dans les pots non-fertilisés (N-) (Tableau 4.b). L'ANOVA indique également une interaction significative entre les facteurs espèce et fertilisation (Tableau 4.a), traduisant un effet de la fertilisation azotée supérieur pour le MEL que pour les autres espèces (Tableau 4.b & Figure 4).

TABLEAU 4.a : Résultats de l'ANOVA testant les effets de la fertilisation azotée et des interactions sur la croissance totale de l'épinette noire, du pin gris et du mélèze laricin du dispositif en serres après deux saisons de croissances, de juin 2020 à septembre 2021.

Facteurs	Nb coef	Croissance totale (cm)		
		ddl	<i>F ratio</i>	<i>P</i>
Esp	2	2	73.6684	< 0.0001
Fert	1	1	42.2787	0.0005
Dens-Div	4	4	1.2598	0.2907
Fert*Dens-Div	4	4	1.1287	0.3472
Esp*Fert	2	2	29.8162	< 0.0001

Les valeurs statistiquement significatives sont distinguées en gras.

Le facteur Dens-Div représente l'effet combiné des facteurs Densité et Diversité de chaque pot.

TABLEAU 4.b : Croissance totale (moyenne \pm SE : n = 6) de l'épinette noire (EPN), du pin gris (PIG) et du mélèze laricin (MEL) du dispositif en serres. Les différences significatives entre les niveaux de chaque traitement sont indiquées par des lettres (les différences pour les traitements ayant > 2 niveaux ont été déterminées par un test post hoc HDS de Tukey).

Facteurs	Différence	Croissance totale (cm)
Espèces		
MEL	A	22.5 (0.8)
EPN	B	13.3 (0.8)
PIG	C	10.6 (0.8)
Fertilisation		
N+	A	19.2 (0.8)
N-	B	11.8 (0.8)
Esp*Fert		
MEL *N+	A	30.4 (1.2)
EPN*N+	B	15.5 (1.2)
MEL *N-	BC	14.6 (1.2)
PIG*N+	CD	11.1 (1.2)
EPN*N-	BCD	11.3 (1.2)
PIG*N-	D	10.2 (1.2)

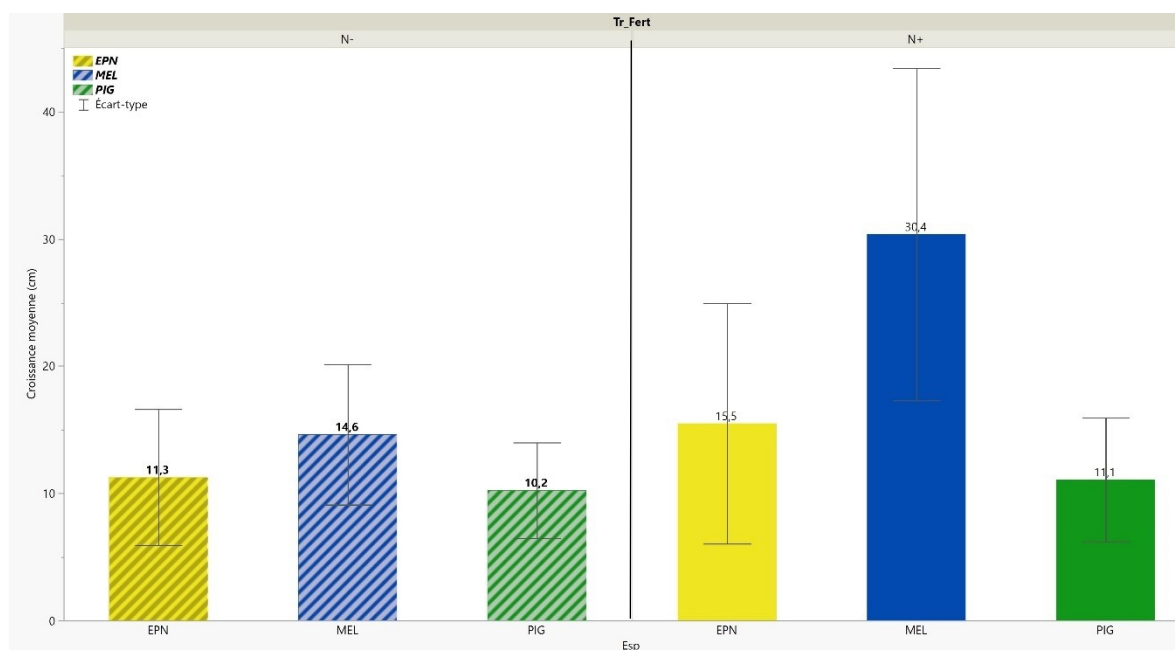


FIGURE 4 : Croissances totales moyennes des semis du dispositif en serres sur deux saisons de croissances.

Les facteurs fertilisation et espèces ont également eu un effet significatif sur la croissance totale des semis du dispositif à Simoncouche (Tableau 5.a). L'effet de la fertilisation semble bénéfique pour la croissance du MEL, puisqu'il a une croissance moyenne (50.4 cm) supérieure à celle de l'EPN (27.7 cm) et du PIG (28.1 cm). Ce résultat est aussi bien observé en milieu fertilisé que non fertilisé (Tableau 5.b & Figure 5). Contrairement au dispositif en serres, l'interaction Esp*Fert n'est pas significative (Tableau 5.a). Cela signifie que tous les semis ont bénéficié du même effet positif de la fertilisation (Tableau 5.b & Figure 5).

TABLEAU 5.a : Résultats de l'ANOVA testant les effets de la fertilisation azotée et des interactions sur la croissance totale de l'épinette noire, du pin gris et du mélèze laricin du dispositif à Simoncouche après deux saisons de croissances, de juin 2020 à octobre 2021.

Facteurs	Nb coef	Croissance totale (cm)		
		ddl	F ratio	P
Esp	2	2	65.2008	< 0.0001
Fert	1	1	23.7468	0.0022
Dens-Div	4	4	0.1396	0.9673
Fert*Dens-Div	4	4	1.3858	0.2405
Esp*Fert	2	2	0.248	0.7806

Les valeurs statistiquement significatives sont distinguées en gras.

Le facteur Dens-Div représente l'effet combiné des facteurs Densité et Diversité de chaque placette.

TABLEAU 5.b : Croissance totale (moyenne \pm SE : n = 6) de l'épinette noire (EPN), du pin gris (PIG) et du mélèze laricin (MEL) du dispositif à Simoncouche. Les différences significatives entre les niveaux de chaque traitement sont indiquées par des lettres (les différences pour les traitements ayant > 2 niveaux ont été déterminées par un test post hoc HDS de Tukey).

Facteurs	Différence	Croissance totale (cm)
Espèces		
MEL	A	50.4 (2.3)
PIG	B	28.1 (3.3)
EPN	B	27.7 (2.3)
Fertilisation		
N+	A	39.0 (2.0)
N-	B	31.8 (2.1)

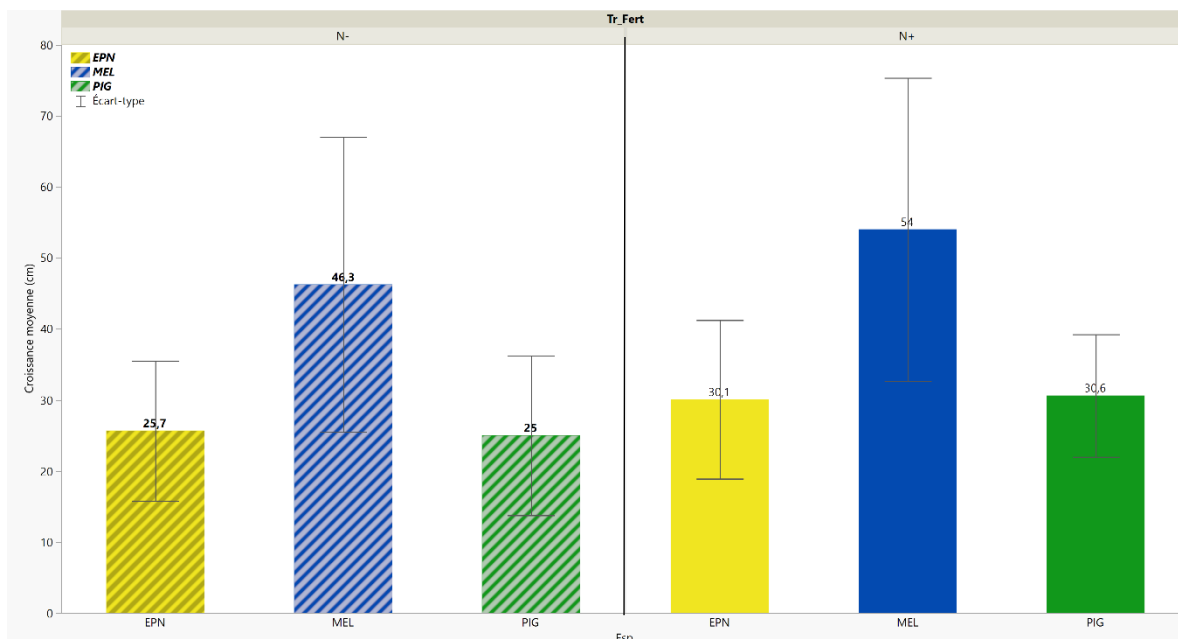


FIGURE 5 : Croissances totales moyennes des semis du dispositif à Simoncouche sur deux saisons de croissances.

3.2. PRODUCTIVITÉ ET PRÉLÈVEMENT DE L'AZOTE DES ESPÈCES EN MONOCULTURES

3.2.1. PRODUCTION DE BIOMASSE DES CULTURES MONOSPÉCIFIQUES

Les résultats de l'ANOVA montrent qu'après deux ans et deux campagnes de fertilisation, il n'existe pas d'effet significatif de la densité et de l'espèce sur la production de biomasse totale des semis des cultures monospécifiques du dispositif en serres, aussi bien en N- qu'en N+ (Tableau 6). Cette absence d'effet significatif est probablement dû à la grande variabilité de production de biomasse d'une chapelle à l'autre, surtout dans le traitement N+ (Figure 6). Ce point est discuté dans la partie 4.2. Cependant, même si sa valeur n'est pas significative ($\alpha = 0.05$), la fertilisation a tout de même tendance à augmenter la biomasse totale moyenne des trois espèces aux différents niveaux de densité (Tableau 6 & Figure 6). Nous remarquons également que l'interaction Esp*Fert n'a aucun effet significatif (Tableau 6).

TABLEAU 6 : Résultats de l'ANOVA testant les effets de la fertilisation azotée, de la densité et des interactions sur la biomasse totale de l'épinette noire, du pin gris et du mélèze laricin en cultures monospécifiques du dispositif en serres après deux saisons de croissances, de juin 2020 à septembre 2021.

Facteurs	Biomasse totale (en g)			
	Nb coef	ddl	F ratio	P
Esp	2	2	1.2898	0.2877
Fert	1	1	11.4134	0.0767
Dens	2	2	1.0134	0.3726
Esp*Dens	4	4	1.7326	0.1648
Esp*Fert	2	2	1.3235	0.2788

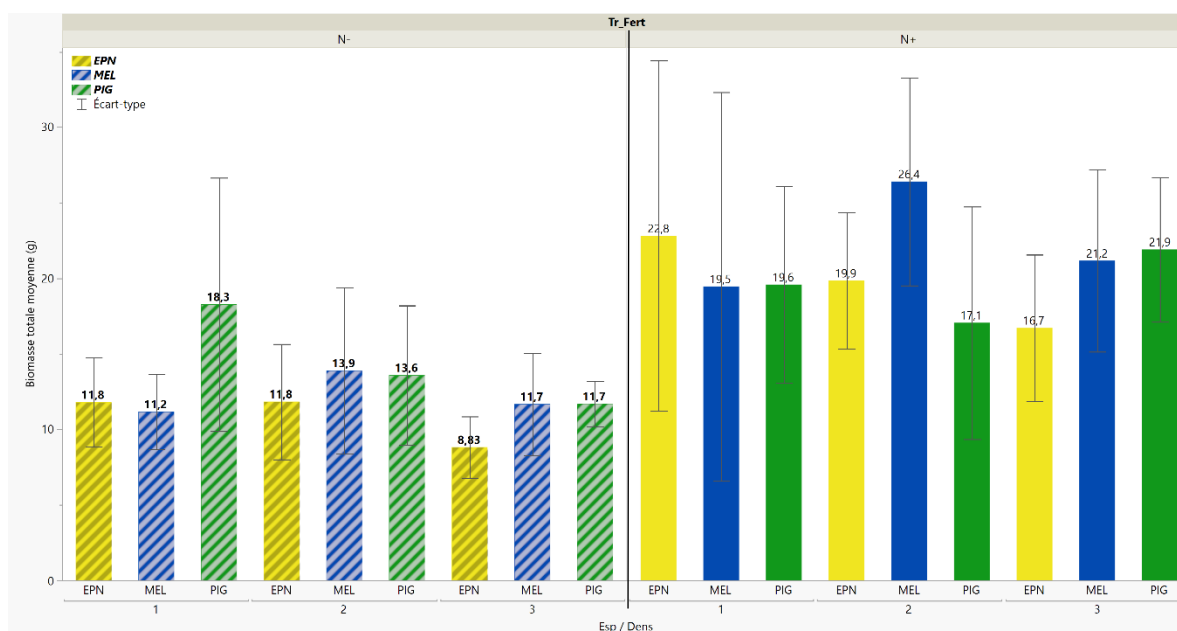


FIGURE 6 : Biomasses totales moyennes des semis en cultures monospécifiques du dispositif en serres.

3.2.2. PRÉLÈVEMENT DU FERTILISANT AZOTÉ PAR LES SEMIS EN CULTURES MONOSPÉCIFIQUES

Les résultats de l'ANOVA démontrent qu'il existe un effet significatif de la densité et de l'espèce sur le Ndff des semis fertilisés en cultures monospécifiques du dispositif en serres (Tableau 7.a). Le MEL (26.7 %) bénéficie davantage du fertilisant azoté que l'EPN (21.1 %) et le PIG (19.1 %), et l'augmentation de la densité semble augmenter la dépendance des semis au fertilisant

(Figure 7 & Tableau 7.b). Nous notons que l'effet du facteur densité est particulièrement important pour le PIG dont le Ndff a augmenté de 14% pour une densité de 1 à près de 25% pour une densité de 3 (Figure 7).

TABLEAU 7.a : Résultats de l'ANOVA testant les effets de la fertilisation azotée, de la densité et des interactions sur la proportion d'azote dérivée du fertilisant (Ndff, %) de l'épinette noire, du pin gris et du mélèze laricin en cultures monospécifiques du dispositif en serres après deux saisons de croissances, de juin 2020 à septembre 2021.

Facteurs	Ndff (en %)			
	Nb coef	ddl	F ratio	P
Esp	2	2	10.0357	0.0013
Dens	2	2	4.3936	0.0299
Esp*Dens	4	4	2.9417	0.0528

Les valeurs statistiquement significatives sont distinguées en gras.

TABLEAU 7.b : Proportion d'azote dérivée du fertilisant (Ndff moyen \pm SE : n = 3) de l'épinette noire (EPN), du pin gris (PIG) et du mélèze laricin (MEL) en cultures monospécifiques du dispositif en serres. Les différences significatives entre les niveaux de chaque traitement sont indiquées par des lettres (les différences pour les traitements > 2 niveaux ont été déterminées par un test post hoc de Tukey).

Facteurs	Différence	Ndff (en %)
Espèces		
MEL	A	26.7 (1.5)
EPN	B	21.1 (1.4)
PIG	B	19.1 (1.4)
Densité		
Dens = 3	A	24.1 (1.3)
Dens = 2	AB	23.6 (1.4)
Dens = 1	B	19.1 (1.6)
Esp*Dens		
MEL*Dens = 3	A	28.3 (2.0)
MEL*Dens = 2	A	28.2 (2.1)
PIG*Dens = 3	AB	24.9 (2.0)
EPN*Dens = 2	ABC	24.2 (2.1)
MEL*Dens = 1	ABC	23.9 (2.9)
EPN*Dens = 1	ABC	19.8 (2.4)
EPN*Dens = 3	ABC	19.4 (2.0)
PIG*Dens = 2	BC	18.4 (2.1)
PIG*Dens = 1	C	14.0 (2.4)

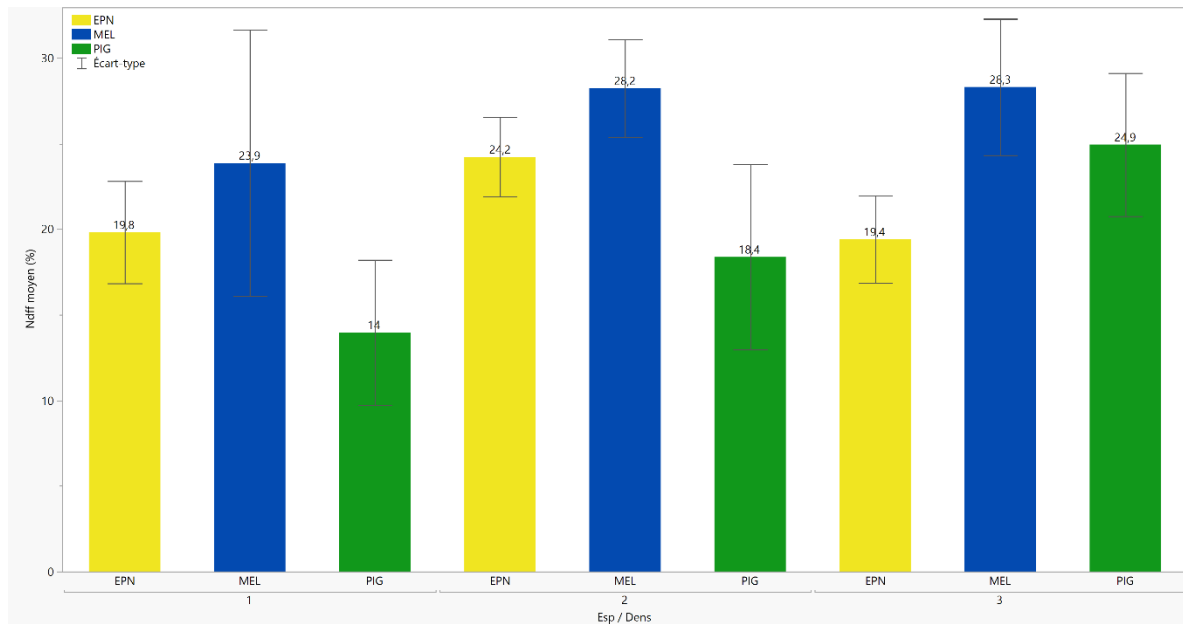


FIGURE 7 : Proportions moyennes d'azote dérivé du fertilisant (Ndff, %) des semis en cultures monospécifiques du dispositif en serres.

3.3. PRODUCTIVITÉ ET PRÉLÈVEMENT DE L'AZOTE DES ESPÈCES EN POLYCULTURES

3.3.1. PRODUCTION DE BIOMASSE DES CULTURES PLURISPÉCIFIQUES

Les résultats de l'ANOVA montrent qu'après deux ans et deux campagnes de fertilisation, il existe un effet significatif de l'espèce sur la production de biomasse totale des semis des cultures plurispécifiques du dispositif en serres (Tableau 8.a). Le test HSD de Tukey indique que la production de biomasse du PIG (20.4 g) est supérieure à celle de l'EPN (15.4 g) et du MEL (16.3 g) aussi bien en N- qu'en N+, quels que soient le niveau de diversité et l'espèce associée (Tableau 8.b & Figure 8). De plus, même si sa valeur n'est pas significative ($\alpha = 0.05$), l'effet de la fertilisation a tendance à augmenter la BT des trois espèces (Tableau 8.a & Figure 8).

TABLEAU 8.a. : Résultats de l'ANOVA testant les effets de la fertilisation azotée, de la diversité et des interactions sur la biomasse totale de l'épinette noire, du pin gris et du mélèze laricin en cultures plurispécifiques du dispositif en serres après deux saisons de croissances, de juin 2020 à septembre 2021.

Facteurs	Biomasse totale (en g)			
	Nb coef	ddl	F ratio	P
Esp	2	2	7.2477	0.0017
Fert	1	1	7.239	0.1084
Div	2	2	0.0301	0.9704
Esp*Div	4	4	0.8887	0.4795
Esp*Fert	2	2	0.2262	0.7987

Les valeurs statistiquement significatives sont distinguées en gras.

TABLEAU 8.b : Biomasse totale (moyenne \pm SE : n = 3) de l'épinette noire (EPN), du pin gris (PIG) et du mélèze laricin (MEL) en cultures plurispécifiques du dispositif en serres. Les différences significatives sont indiquées par des lettres (les différences pour les traitements ayant > 2 niveaux ont été déterminées par un test post hoc HDS de Tukey).

Facteur	Différence	Biomasse totale (en g)
Espèces		
PIG	A	20.4 (2.5)
MEL	B	16.3 (2.5)
EPN	B	15.4 (2.5)

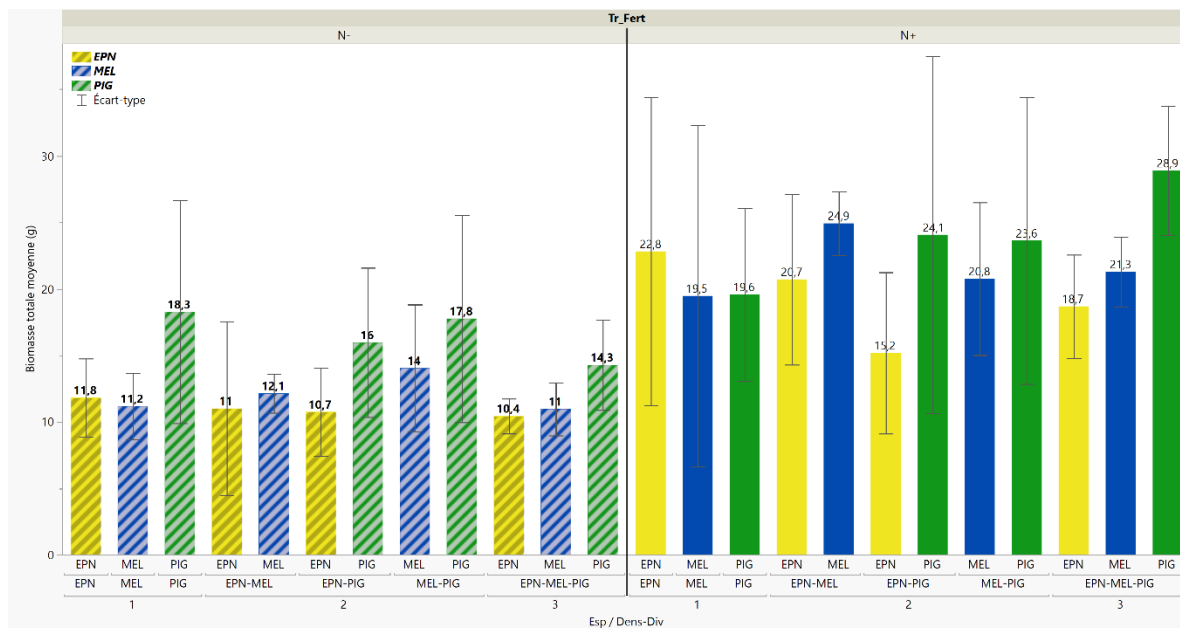


FIGURE 8 : Biomasses totales moyennes des semis en cultures plurispécifiques du dispositif en serres.

3.3.2. PRÉLÈVEMENT DU FERTILISANT AZOTÉ PAR LES SEMIS EN CULTURES PLURISPÉCIFIQUES

Les résultats de l'ANOVA démontrent qu'il existe un effet significatif de la diversité et de l'espèce sur le Ndff en cultures plurispécifiques du dispositif en serres (Tableau 9.a). L'interaction Esp*Div est également significative. Celle-ci reflète notamment l'augmentation du Ndff avec la diversité pour le PIG (Tableau 9.b & Figure 9). Comme pour les cultures monospécifiques, le MEL (27.3 %) semble dépendre plus du fertilisant que les autres espèces et ce dans tous les mélanges (Figure 9 & Tableua 9.b). Le Ndff est aussi supérieur dans le mélange à deux espèces EPN-MEL et dans le mélange à trois espèces EPN-MEL-PIG (Figure 9).

TABLEAU 9.a : Résultats de l'ANOVA testant les effets de la fertilisation azotée, de la diversité et des interactions sur la proportion d'azote dérivée du fertilisant (Ndff, %) de l'épinette noire, du pin gris et du mélèze laricin en cultures plurispécifiques du dispositif en serres après deux saisons de croissances, de juin 2020 à septembre 2021.

Facteurs	Ndff (en %)			
	Nb coef	ddl	F ratio	P
Esp	2	2	10.3302	0.0011
Div	2	2	11.1161	0.0016
Esp*Div	2	2	5.0371	0.008

Les valeurs statistiquement significatives sont distinguées en gras.

TABLEAU 9.b : Proportion d'azote dérivée du fertilisant (Ndff moyen \pm SE : n = 3) de l'épinette noire (EPN), du pin gris (PIG) et du mélèze laricin (MEL) en cultures plurispécifiques du dispositif en serres. Les différences significatives entre les niveaux de chaque traitement sont indiquées par des lettres (les différences pour les traitements ayant > 2 niveaux ont été déterminées par un test post hoc HDS de Tukey).

Facteurs	Différence	Ndff (en %)
Espèces		
MEL	A	27.3 (2.1)
EPN	B	22.9 (2.0)
PIG	B	22.6 (2.0)
Diversité		
Div = 3	A	29.1 (2.6)
Div = 2	A	24.8 (2.1)
Div = 1	B	19.0 (2.2)
Esp*Div		
MEL*Div = 3	AB	31.3 (2.2)
PIG*Div = 3	AB	30.2 (2.2)
MEL*Div = 2	AC	28.6 (2.1)
EPN*Div = 3	CD	25.8 (2.2)
PIG*Div = 2	BD	21.4 (2.1)
MEL*Div = 1	ABCDE	23.9 (3.1)
EPN*Div = 2	BD	23.4 (2.1)
EPN*Div = 1	CDE	19.8 (2.6)
PIG*Div = 1	E	14.0 (2.6)

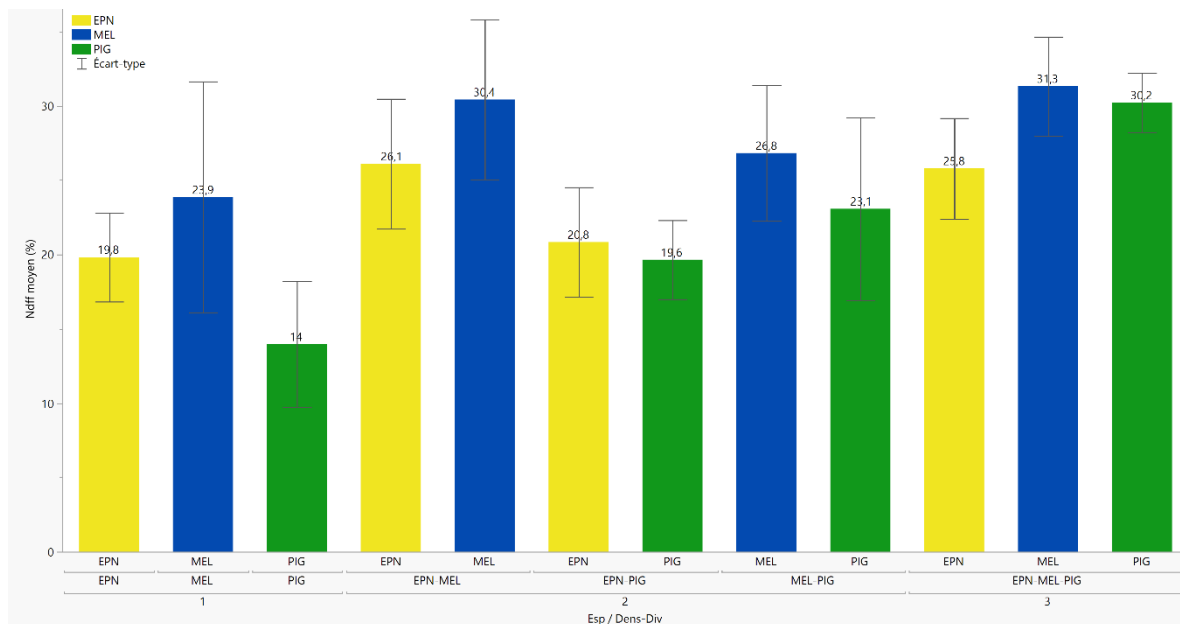


FIGURE 9 : Proportions moyennes d'azote dérivé du fertilisant (Ndff, %) des semis en cultures plurispécifiques du dispositif en serres.

3.4. INTERACTIONS INTRA- ET INTERSPÉCIFIQUES

3.4.1. LE RENDEMENT RELATIF TOTAL (RYT)

Le RYT était supérieur ou égal à 1 pour l'ensemble des mélanges testés à l'exception du mélange EPN-MEL en N- (Figure 10). Les résultats de l'ANOVA montrent qu'il n'existe aucun effet significatif du facteur Esp-Div et de la fertilisation sur le RYT (Tableau 10). Cependant, les résultats du test non paramétrique des rangs de Wilcoxon montrent que le RYT est significativement supérieur à 1 pour le mélange à trois espèces EPN-MEL-PIG (Figure 10). En moyenne, il existe un gain de productivité relatif de 14 % (17% en N+ et 11% en N-) pour chaque espèce par rapport aux cultures monospécifiques à Dens = 3. Cela signifie, qu'en moyenne, les espèces poussent mieux en cultures plurispécifiques qu'en cultures monospécifiques.

TABEAU 10 : Résultats de l'ANOVA testant les effets de la fertilisation azotée, de la diversité et des interactions sur le Rendement Relatif Total (RYT) de l'épinette noire, du pin gris et du mélèze laricin en cultures plurispécifiques du dispositif en serres après deux saisons de croissances, de juin 2020 à septembre 2021.

Facteurs	RYT			
	Nb coef	ddl	F ratio	P
Esp-Div	3	3	0.2155	0.884
Fert	1	1	0.0735	0.7903
Esp-Div*Fert	3	3	0.1734	0.9126

Le facteur Esp-Div représente l'effet combiné des facteurs Espèces et Diversité de chaque pot.

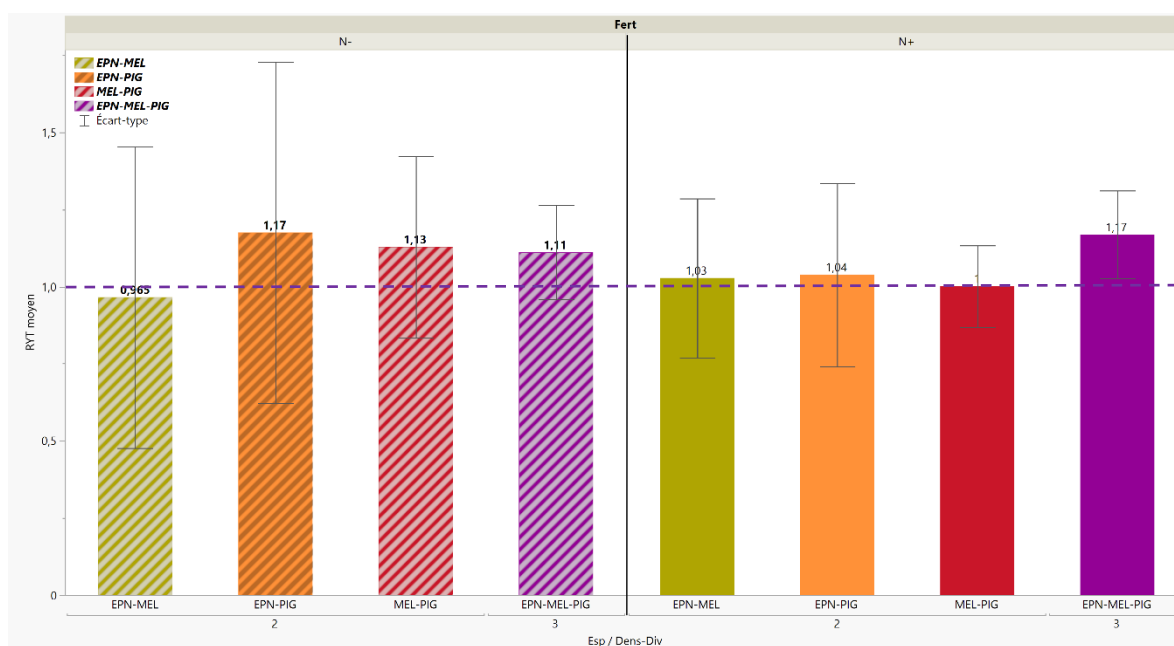


FIGURE 10 : Rendements relatifs totaux (RYT) moyens des semis en cultures plurispécifiques du dispositif en serres.

3.4.2. L'INDICE DE COMPÉTITION INTRASPÉCIFIQUE (C_{INTRA})

Les résultats de l'ANOVA montrent qu'il existe un effet significatif de l'espèce sur la variable C_{intra} (Tableau 11.a). Le test HSD de Tukey indique un niveau de compétition intraspécifique supérieur pour l'EPN et le PIG que pour le MEL, que ce soit en N- ou en N+ (Tableau 11.b & Figure 11). Aucune compétition intraspécifique n'a été détectée pour ce dernier ($C_{intra} < 1$).

Également, l'interaction Esp*Fert, même si elle n'est pas significative, montre que l'apport de N semble diminuer la compétition intraspécifique pour PIG surtout à Dens = 3 (Tableau 11.b & Figure 11). En revanche, cet effet n'est pas démontré dû à la grande variabilité sur les moyennes (Figure 11).

De plus, le test non paramétrique de Wilcoxon indique que le C_{intra} n'est jamais différent de 1 pour le MEL et l'EPN. Cependant pour le PIG, nous observons les résultats suivants :

- C_{intra} est significativement supérieur à 1 lorsque tous les pots sont inclus dans l'analyse (Dens = 2 & 3 et Fert = N+ & N-) ($F ratio = 64$; $P = 0.05$) ;
- C_{intra} est significativement supérieur à 1 dans les pots N- ($F ratio = 21$; $P = 0.03$) ;
- C_{intra} n'est pas significativement différent de 1 dans les pots N+ ($F ratio = 11$; $P = 1$).

Les deux derniers points révèlent que la fertilisation a diminué la compétition intraspécifique pour le PIG et que le N est un facteur limitant dans la croissance du PIG dans les pots à 2 et 3 semis. De plus, lorsque nous comparons le C_{intra} dans les pots N+ et dans les pots N-, le résultat montre aussi une différence significative ($F ratio = 5$; $P = 0.041$), ce qui montre que la fertilisation diminue la compétition intraspécifique.

TABLEAU 11.a : Résultats de l'ANOVA testant les effets de la fertilisation azotée, de la densité et des interactions sur l'indice de Compétition intraspécifique (C_{intra}) de l'épinette noire, du pin gris et du mélèze laricin en cultures monospécifiques du dispositif en serres après deux saisons de croissances, de juin 2020 à septembre 2021.

Facteurs	C_{intra}			
	Nb coef	ddl	$F ratio$	P
Esp	2	2	4.4878	0.0232
Fert	1	1	1.7375	0.3182
Dens	1	1	1.0055	0.3269
Esp*Fert	2	2	1.2858	0.2964
Esp*Dens	4	4	0.5906	0.5626
Fert*Dens	1	1	0.8833	0.3575

Les valeurs statistiquement significatives sont distinguées en gras.

TABLEAU 11.b : Indice de Compétition intraspécifique (C_{intra} moyen \pm SE : n = 3) des cultures monospécifiques du dispositif en serres. Les différences significatives entre les niveaux de chaque traitement sont indiquées par des lettres (les différences pour les traitements ayant > 2 niveaux ont été déterminées par un test post hoc HDS de Tukey).

Facteur	Différence	C_{intra}
Espèces		
PIG	A	1.2 (0.1)
EPN	A	1.2 (0.1)
MEL	B	0.8 (0.1)

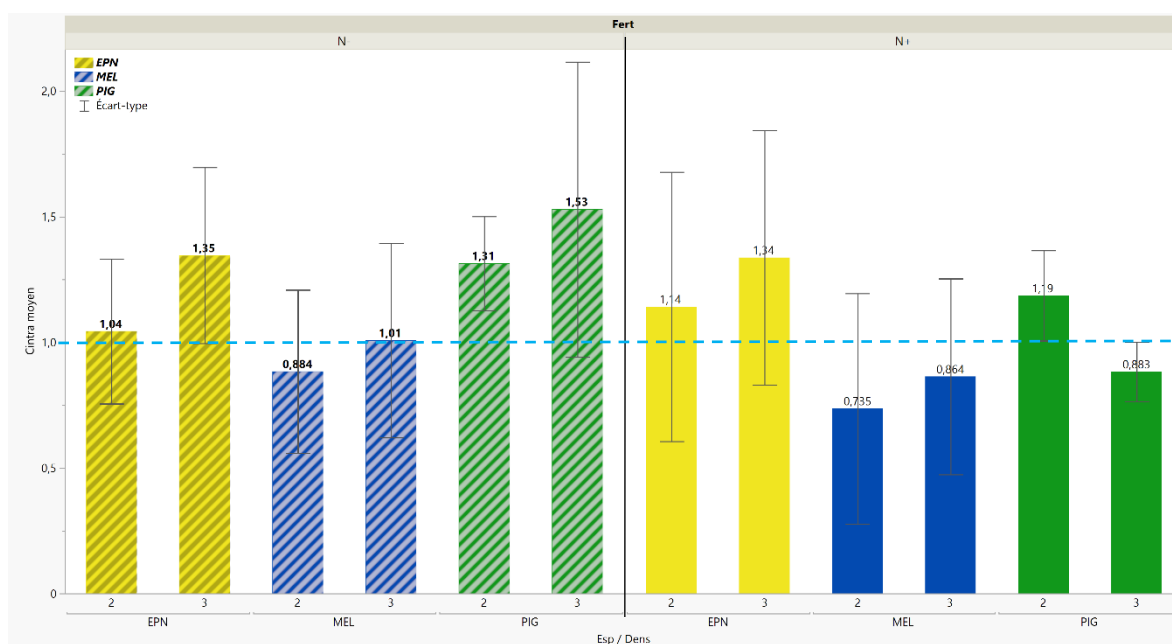


FIGURE 11 : Indices de Compétition Intraspcifique (C_{intra}) moyens des semis en cultures monospécifiques du dispositif en serres.

4. DISCUSSION

4.1. CROISSANCE ET BIOMASSE TOTALES DES SEMIS

Nos résultats montrent que les facteurs fertilisation et espèces ont eu un effet significatif sur la croissance totale des semis du dispositif en serres et du dispositif à Simoncouche (Tableaux 4.a & 5.a). Cependant, la fertilisation n'a pas eu le même effet sur toutes les espèces de l'étude. En effet, que ce soit en milieu contrôlé ou en milieu naturel, il semblerait que le MEL ait le plus bénéficié de la fertilisation azotée, puisqu'il a une croissance moyenne supérieure à celle de l'EPN et du PIG (Figures 4 & 5). Ces résultats semblent indiquer que le MEL a une meilleure capacité de prélèvement du fertilisant azoté que l'EPN et le PIG. Également, pour le dispositif en serres, l'interaction Esp*Fert sur la croissance des semis était significative (Tableau 4.a), traduisant un effet de la fertilisation azotée supérieur pour le MEL que pour les autres espèces (Tableau 4.b). Quant à Simoncouche, cette interaction n'est pas significative (Tableau 5.a) : tous les semis ont bénéficié du même effet positif de la fertilisation (Tableau 5.b & Figure 5).

Cependant, nos résultats obtenus sur la biomasse totale (BT) indiquent qu'il n'existe pas de différences significatives de BT entre les espèces des cultures monospécifiques du dispositif en serres, aussi bien en N- qu'en N+ (Tableau 6). En revanche, la production de biomasse du PIG est supérieure à celle de l'EPN et du MEL dans les cultures plurispécifiques, aussi bien en N- qu'en N+, quel que soit le niveau de diversité et l'espèce associée (Tableau 8.b & Figure 8). Nous pouvons formuler quelques hypothèses pour expliquer ces différences de tendances entre la croissance en hauteur des semis et la production de BT. Comme le démontre Islam et Macdonald (2009), nous avons aussi constaté que le MEL bénéficie plus de la fertilisation azotée en terme de production de biomasse que le EPN (Figures 6 & 8). Également, comme l'ont mis en évidence Islam et Macdonald (2009), la fertilisation aurait eu un effet bénéfique sur l'utilisation de l'eau chez le MEL, mais surtout pendant sa première année de croissance.

En milieu contrôlé, nous nous attendions à ce que l'effet de la fertilisation soit significatif pour chaque espèce, le N étant un facteur limitant de la croissance des semis (Hopkins 2003; Hikosaka 2004). Or, les résultats des ANOVA montrent que la fertilisation n'est pas significative pour les cultures mono- et plurispécifiques. Mais la fertilisation azotée a tout de même tendance à augmenter la BT des trois espèces à différents niveaux de densité (Figures 6), ce qui est en cohérence avec les résultats de Newton et Amponsah (2006). Cette absence d'effet significatif est probablement due à la grande variabilité entre les blocs, notamment pour les pots N+ sur la production de biomasse. Nous avons alors effectué d'autres analyses statistiques pour en trouver l'origine : cette variabilité est provoquée par un effet de chapelle, exposé dans la partie suivante.

4.2. EFFETS DE LA TEMPÉRATURE EN SERRES SUR LA PRODUCTION DE BIOMASSE

Après deux ans d'expérience, les résultats de l'ANOVA montrent qu'il existe un effet significatif des chapelles, en plus de l'effet de la fertilisation et de l'espèce, sur la production de biomasse totale moyenne des semis en cultures mono- et plurispécifiques du dispositif en serres (Tableau 12.a, 12.b & Figure 12). Bien que nous ayons planifié des températures de jour et de nuit égales dans les trois chapelles des serres avec le logiciel PRIVA, la température dans la chapelle 3 était en moyenne supérieure de 3.2°C par rapport à la chapelle 5 (Tableau 1).

TABLEAU 12.a : Résultats de l'ANOVA testant les effets de la fertilisation azotée, des chapelles et des interactions sur la biomasse totale de l'épinette noire, du pin gris et du mélèze laricin du dispositif en serres, après deux saisons de croissances, de juin 2020 à septembre 2021.

Facteurs	Biomasse totale par chapelles			
	Nb coef	ddl	F ratio	P
Fert	1	1	136.0468	< 0.0001
Esp	2	2	8.6722	0.0003
Chap	2	2	23.8353	< 0.0001
Esp*Fert	2	2	1.2139	0.2999
Chap*Fert	2	2	8.9132	0.0002

Les valeurs statistiquement significatives sont distinguées en gras.

TABLEAU 12.b : Biomasse totale (moyenne \pm SE : n = 3) de l'épinette noire (EPN), du pin gris (PIG) et du mélèze laricin (MEL) du dispositif en serres par chapelles. Les différences significatives entre les niveaux de chaque traitement sont indiquées par des lettres (les différences pour les traitements ayant > 2 niveaux ont été déterminées par un test post hoc HDS de Tukey).

Facteurs	Différence	Biomasse totale par chapelles
Espèces		
PIG	A	18.0 (0.6)
MEL	A	17.4 (0.6)
EPN	B	14.5 (0.6)
Chapelles		
5	A	19.5 (0.6)
4	B	17.1 (0.6)
3	C	13.3 (0.6)
Fertilisation		
N+	A	20.9 (0.5)
N-	B	12.3 (0.5)
Chap*Fert		
5*N+	A	25.9 (0.9)
4*N+	B	21.1 (0.9)
3*N+	C	15.9 (0.9)
5*N-	CD	13.2 (0.9)
4*N-	CD	13.2 (0.9)
3*N-	D	10.8 (0.9)

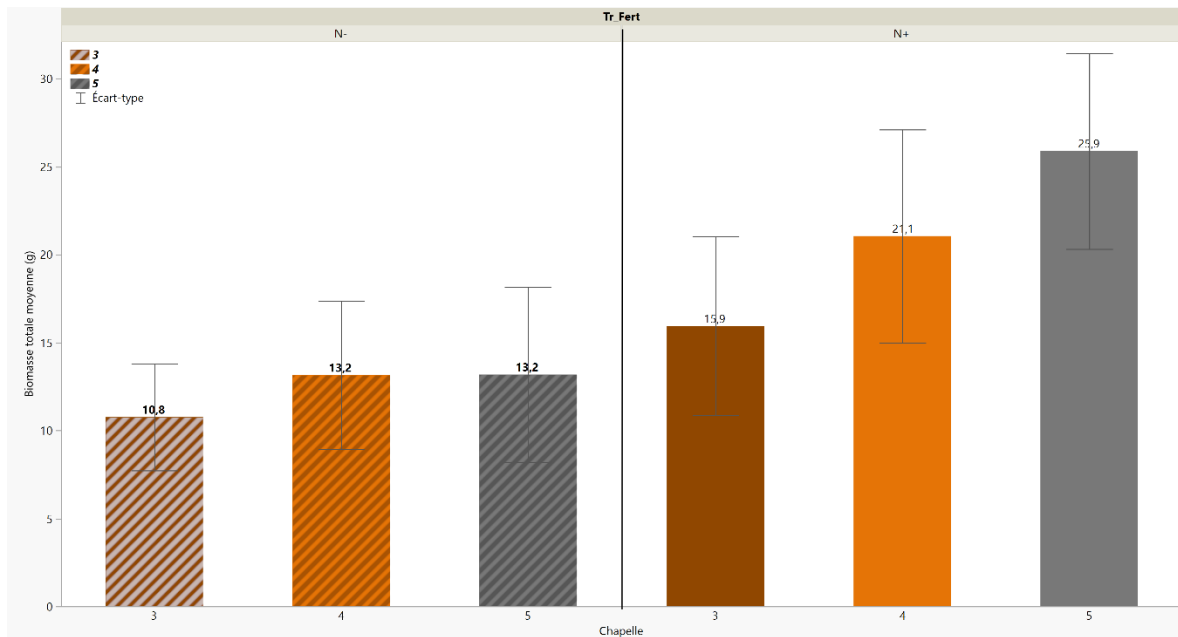


FIGURE 12 : Biomasses totales moyennes des semis du dispositif en serres exprimées en fonction des chapelles.

Ainsi, la plus faible production de BT (d'environ 25 %) observée dans la chapelle 3 résulte très probablement d'un stress lié à la chaleur (Tableau 12.b & Figure 12). Également, nous avons remarqué que l'effet de la fertilisation est nettement moins important dans la chapelle 3, probablement en raison d'une plus haute température (Figure 12), ce qui explique l'effet significatif de l'interaction Chap*Fert.

Le réchauffement climatique, que nous constatons depuis ces dernières décennies, va augmenter la fréquence et l'intensité des événements caniculaires et le stress hydrique dans les écosystèmes terrestres. Cela pourrait diminuer l'effet de la fertilisation azotée, par exemple par les dépôts atmosphériques. Ainsi, sous un climat plus chaud, si le taux de précipitation n'augmente pas et quel que soit le niveau de fertilité des sols, la croissance des conifères boréaux pourrait être alors limitée par la température de l'environnement (D'Orangeville *et al.* 2018; Doucet 1985). Au-delà d'une certaine température les écosystèmes commencent à perdre du C car la photosynthèse est plus sensible aux fortes températures que la respiration hétérotrophe (Duffy *et al.* 2021). Également, sous un climat plus chaud et plus sec, la forêt boréale pourrait être sujette à de plus fréquents feux de forêts à l'avenir.

Potentiellement, la combinaison de ces phénomènes pourrait engendrer une réduction, voire une perte, de biodiversité et de productivité, ainsi qu'une perte de résilience des écosystèmes terrestres. Mais des espèces pourraient éventuellement mieux s'y développer : des études ont notamment montré que le PIG se régénère mieux après feux (Splawinski 2015).

4.3. EFFETS DES INTERACTIONS INTRASPÉCIFIQUES DES MONOCULTURES SUR LE PRÉLÈVEMENT DE L'AZOTE ET LA PRODUCTION DE BIOMASSE

Tel que mentionné précédemment, nos résultats indiquent qu'il n'existe pas de différences significatives de BT entre les espèces dans les cultures monospécifiques du dispositif en serres, aussi bien en N- qu'en N+ (Tableau 6). Cette absence d'effet significatif est probablement due à la grande variabilité de production de biomasse d'une chapelle à l'autre, surtout dans le traitement N+ (Figure 6), comme discuté dans la partie 4.2. Nous avons tout de même remarqué que seul le MEL a eu une croissance apicale nettement supérieure aux autres espèces en serres et à Simoncouche (Figures 4 & 5), surtout en N+.

Dans notre expérience, nous avons aussi observé que le MEL bénéficie davantage du fertilisant azoté face à l'EPN et au PIG (Tableau 7.b & Figure 7). Ce résultat corrobore ceux d'Islam et Macdonald (2009). Or, l'augmentation de la densité semble augmenter la dépendance des semis au fertilisant (Tableau 7.b & Figure 7). En effet, lorsque la densité des semis augmente dans les pots monospécifiques, le PIG semble dépendre plus du fertilisant pour sa nutrition azotée : son Ndff a augmenté de 14% pour une densité de 1 à près de 25% pour une densité de 3 (Tableau 7.a, Tableau 7.b & Figure 7). Cela traduirait une meilleure exploitation du fertilisant par les semis dans les pots, notamment à Dens = 3, résultant d'un plus gros volume racinaire (partie 3.2.2). En effet, bien que la masse racinaire de chaque semis ait tendance à diminuer avec la densité de semis par pot, la masse racinaire totale était supérieure dans les pots à Dens > 1 (Tableau 13).

TABLEAU 13 : Biomasses racinaires (BR, en g ; moyenne \pm SE : n = 3) de l'épinette noire (EPN), du pin gris (PIG) et du mélèze laricin (MEL) en cultures monospécifiques du dispositif en serres (pots N+ et N- confondus).

Espèce	Densité	BR moyennes (en g)
EPN	1	7.0 (4.3)
	2	4.1 (2.8)
	3	4.0 (2.7)
MEL	1	6.2 (2.5)
	2	5.8 (3.7)
	3	5.5 (3)
PIG	1	7.2 (2.8)
	2	3.9 (3.1)
	3	4.8 (2.9)

Afin d'évaluer l'intensité de compétition intraspécifique pour chacune des espèces étudiées, nous avons calculé l'indice de Compétition intraspécifique (C_{intra}) à partir de la BT des espèces en cultures monospécifiques. Nous voulons savoir si un semis seul (UE à un semis) produit plus de biomasse qu'un semis planté en association avec des semis de la même espèce (UE à deux et trois semis monospécifiques). Nos résultats statistiques montrent que C_{intra} est supérieur à 1 pour l'EPN et le PIG, que ce soit en N- ou en N+ (Tableau 11.b & Figure 11). Cela signifie que la densité de semis par UE a un effet négatif sur la production de biomasse totale des semis et sur le prélèvement de l'azote minéral pour l'EPN et le PIG en monocultures, résultant d'un effet de compétition intraspécifique chez ces deux espèces. Le MEL avait un C_{intra} inférieur à 1 quel que soit le traitement de fertilisation : aucune compétition intraspécifique n'a ainsi été détectée pour cette espèce (Tableau 11.b & Figure 11).

Sur l'ensemble de l'expérience (pots N+ et N- confondus), le test non paramétrique de Wilcoxon indique que le C_{intra} n'est jamais significativement différent de 1 pour le MEL et l'EPN. Cependant pour le PIG, le C_{intra} est significativement supérieur à 1 ($F\ ratio = 64$; $P = 0.05$). Plus en détail, le C_{intra} est significativement supérieur à 1 dans les pots N- ($F\ ratio = 21$; $P = 0.03$) et il n'est pas significativement différent de 1 dans les pots N+ ($F\ ratio = 11$; $P = 1$) : cela révèle que la fertilisation a diminué la compétition intraspécifique pour le PIG. Nous avons réalisé un test

supplémentaire, afin de comparer le C_{intra} dans les traitements N+ et N- plus précisément pour le PIG. Le résultat obtenu est aussi significatif ($F_{ratio} = 5$, $P = 0.041$), appuyant l'effet de la fertilisation. Nous constatons une diminution d'environ 45 % du C_{intra} pour le PIG à Dens = 3 entre les pots N- et N+, traduisant que l'apport de N a diminué la compétition intraspécifique. Donc le N semble être une ressource limitante pour le PIG dans les pots à Dens > 1. Ce qui n'est pas le cas pour les autres espèces.

4.4. EFFETS DES INTERACTIONS INTERSPÉCIFIQUES DES POLYCULTURES SUR LE PRÉLÈVEMENT DE L'AZOTE ET LA PRODUCTION DE BIOMASSE

Les résultats de notre expérience montrent que le PIG a produit plus de biomasse que les deux autres espèces en cultures plurispécifiques, mais non dans les cultures monospécifiques (partie 3.3.1). Cette tendance est observée quels que soient le traitement de fertilisation, le niveau de diversité et l'espèce associée (Tableau 8.b & Figure 8). Ceci illustre la plus forte compétitivité du PIG pour l'acquisition des ressources (eau, nutriments et lumière). Cet aspect est à vérifier sur long terme et milieu naturel avec le dispositif à Simoncouche.

Nos analyses statistiques démontrent aussi qu'il existe un effet significatif de la diversité et de l'espèce sur le N_{dff} en cultures plurispécifiques du dispositif en serres (Tableau 9.a). Comme pour les cultures monospécifiques, le MEL semble dépendre plus du fertilisant que les autres espèces et ce dans tous les mélanges (Figure 9.b & Figure 9). Le N_{dff} est aussi supérieur dans le mélange à deux espèces EPN-MEL et dans le mélange à trois espèces EPN-MEL-PIG (Figure 9). Ces données suggèrent une meilleure exploitation de la ressource en N provenant du fertilisant par l'EPN et le MEL ou par les trois espèces dans un même pot : il existerait un effet de complémentarité entre nos trois espèces de conifères boréaux. Ce résultat pourrait être expliqué par une meilleure exploitation du réservoir de N en lien avec des mécanismes de complémentarité spatiale ou temporelle (Morin *et al.* 2011; Paquette et Messier 2011).

En nous inspirant des travaux de Loreau et Hector (2001) visant à déterminer la relation B-P pour des communautés de plantes herbacées, nous avons adapté leur calcul du Rendement relatif total (Relative Yield Total - RYT) à des espèces ligneuses boréales. Nous voulions observer s'il existait un effet positif ou négatif de la biodiversité d'une plantation. Le RYT permet de quantifier un gain ou une perte de productivité d'un mélange d'espèces (polyculture) par rapport à la productivité de ces mêmes espèces en monoculture (Loreau et Hector 2001). Nos résultats ont montré que le RYT était supérieur ou égal à 1 pour tous les mélanges, indiquant que la diversité spécifique a tendance à améliorer la productivité des semis (Tableau 10 & Figure 10). Ceci est particulièrement vrai pour les mélanges à trois espèces dans lesquels le RYT est significativement supérieur à 1, notamment pour les pots fertilisés (Tableau 10 & Figure 10). Ce résultat traduit un gain relatif moyen de productivité de 14 % pour chaque essence par rapport à leurs cultures monospécifiques respectives. Cet effet bénéfique de la biodiversité suggère qu'il existe un effet de complémentarité entre nos trois espèces de conifères boréaux, particulièrement en milieu fertilisé au sulfate d'ammonium. Ce résultat, bien qu'il doive être vérifié en conditions naturelles et sur le long terme (avec le dispositif à Simoncouche), semble aller dans le sens des études qui montrent l'effet bénéfique de la diversité spécifique des semis sur la production de biomasse (Morin *et al.* 2011; Paquette et Messier 2011).

Notre étude montre qu'il n'y aurait pas de contre-indication à réaliser des plantations plurispécifiques (Morin *et al.* 2011; Paquette et Messier 2011), notamment dans le cadre de Carbone boréal. En effet, ces forêts nouvellement plantées ne sont pas destinées à l'exploitation forestière (Carbone boréal 2020) : il n'y aurait donc pas d'enjeux de récolte monospécifiques à considérer. Également, implanter plusieurs espèces en mélange augmenterait l'effet de complémentarité entre elles. Le mécanisme de complémentarité temporelle et/ou spatiale entre espèces permet d'augmenter la productivité des communautés végétales en raison d'une meilleure utilisation des ressources (Loreau *et al.* 2001; Cardinale *et al.* 2007).

De plus, « l'hypothèse d'assurance » (Yachi et Loreau 1999) et les hypothèses associées (McNaughton 1977; Tilman 1996; Doak *et al.* 1998; Tilman 1999; Ives *et al.* 2000; Lehman et Tilman 2000) proposent que la biodiversité fournisse une « assurance » ou un tampon contre les fluctuations environnementales, car différentes espèces réagissent différemment aux perturbations. À mesure que la diversité augmente, la variabilité des propriétés de l'écosystème diminue en raison de la stabilisation des espèces asynchrones aux fluctuations intrinsèques ou extrinsèques de l'environnement (Tilman 1996; Doak *et al.* 1998; Tilman 1999; Ives *et al.* 2000; Lehman et Tilman 2000). Cependant, ce qui reste incertain est de savoir si cet effet stabilisant sature à une diversité faible ou élevée en espèces, ce qui dépend des conditions du milieu (Tilman 1999; Yachi et Loreau 1999; Lehman et Tilman 2000; Cottingham *et al.* 2001). Dans leur modèle, Loreau *et al.* (2001) ont montré que la biomasse diminue lorsque le nombre d'espèces augmente, mais plus il y a d'espèces, plus la variabilité de production de biomasse est faible d'une année sur l'autre. Il existe alors une constance, un équilibre et une **résilience** de l'écosystème (Loreau *et al.* 2001). La résilience est la capacité à maintenir un équilibre ou d'être capable de revenir à un équilibre après une perturbation. Elle est supérieure pour les polycultures que pour les monocultures en raison de complémentarités temporelles et/ou spatiales entre les espèces qui permettent de maintenir la productivité de la plantation : un nombre d'espèces élevé dans une communauté permet une grande stabilité car elles répondent différemment aux fluctuations de l'environnement (Loreau *et al.* 2001).

Dans un contexte de changement climatique, la résilience et « l'hypothèse d'assurance » d'un écosystème sont des caractéristiques importantes à conserver. En effet, les changements climatiques risquent d'augmenter la fréquence de diverses perturbations. Entre autres, le réchauffement pourrait augmenter le taux de minéralisation du N organique du sol (Bai *et al.* 2013) ce qui pourrait modifier l'équilibre des écosystèmes forestiers. Malgré l'adaptation des espèces boréales à la faible disponibilité de N dans le sol, des études ont montré que les forêts boréales ont réagi fortement à l'ajout de N et ont séquestré en moyenne 14 et 13 kg de C supplémentaires par kg de N dans la biomasse ligneuse aérienne, respectivement (Schulte-Uebbing et de Vries 2018). De plus, Houle *et al.* 2015 montrent également que, dans l'est de l'Amérique du Nord, en moyenne, 52 à 59 % des dépôts de N ont été interceptés par la canopée, la rétention étant plus élevée pour NH₄⁺

(60 à 67 %) que pour NO_3^- (45 à 54 %). Leurs données suggèrent aussi que les interactions de N avec les couverts forestiers peuvent changer rapidement avec les changements climatiques, notamment dans les dépôts atmosphériques de N, ainsi qu'avec la composition des espèces d'arbres de l'écosystème.

Potentiellement, la combinaison de diverses perturbations et l'augmentation de leur fréquence pourraient engendrer une réduction, voire une perte, de biodiversité et de productivité, ainsi que d'une perte de résilience des écosystèmes terrestres à l'avenir. Néanmoins, des espèces pourraient éventuellement mieux s'y développer. Des études ont notamment montré que le PIG est une espèce pionnière qui se régénère très bien après des feux de forêt (Splawinski 2015), et qui est caractérisée par une croissance rapide durant ses premières années de vie (Asselin *et al.* 2003). Cette stratégie leur donne un avantage au niveau de la disponibilité de la lumière : cet aspect se reflète dans leur croissance, notamment dans un contexte de changements climatiques où les risques de feux de forêts pourraient devenir plus élevés.

4.5. LIMITES ET PROBLÈMES TECHNIQUES DE L'ÉTUDE

Les études effectuées en serres peuvent imposer certaines limites et c'est ce qui a été constaté ici. Dans nos résultats, les écarts types que nous avons obtenus sont relativement importants en raison d'une forte différence de température dans les chapelles des serres du PRF de l'UQAC (partie 4.2).

La biomasse totale (BT) à t_0 (jour de la plantation) des semis n'a pas été mesurée : ce qui nous empêche d'évaluer la production de biomasse réelle des semis au cours de la période d'étude. Il pourrait être intéressant d'aborder ce point dans une étude similaire et/ou avec les données du dispositif à Simoncouche par l'utilisation d'indicateur (par exemple, des équations allométriques) car une telle mesure est destructive.

La profondeur et la surface des pots constituent aussi une limite pour la surface de croissance des conifères, pour le développement de leur système racinaire, induisant parfois une restriction du

développement de leur canopée. Les arbres auront tendance à prélever leurs nutriments sur des périodes et/ou de profondeur du sol différentes : nous parlons de complémentarité temporelle et/ou spatiale (Price 1995; Loreau et Hector 2001). La complémentarité spatiale ne pouvait pas être évaluée adéquatement en raison de la faible taille des pots ; et la complémentarité temporelle ne pouvait pas être testée dans la présente étude, puisqu'elle devait durer deux saisons en raison d'impératifs académiques.

Deux saisons de croissances représentent une période assez courte pour observer ces phénomènes de complémentarité ou de compétition qui pourraient être changeantes sur le long terme entre nos espèces, c'est la raison pour laquelle nous avons conservé les blocs 4, 5 et 6 en serres et à Simoncouche. En milieu naturel, le développement des racines n'est pas limité dans l'espace et les arbres ne prélèvent pas forcément leurs nutriments aux mêmes profondeurs de sol : nous parlons de complémentarité spatiale (Price 1995; Loreau et Hector 2001; Houle *et al.* 2014). Cependant en milieu naturel, les semis de notre expérience sont plus sujets à subir des perturbations comme de fortes précipitations et l'effet de ravageurs (insectes ou mammifères).

Tous ces phénomènes et toutes ces tendances sont à vérifier sur le long terme grâce aux données obtenues avec le dispositif à Simoncouche, tout en prenant en compte le taux de mortalité des semis, s'il y a lieu.

4.6. RETOUR SUR LES HYPOTHÈSES

Certains de nos résultats confirment nos hypothèses émises en introduction :

- 1) La densité des semis par UE a un effet négatif sur la production de biomasse totale des semis. L'effet de la densité sur les semis a bien montré qu'il existe un effet de compétition intraspécifique pour l'EPN et le PIG ;
- 2) La diversité spécifique a un effet positif sur la production de biomasse totale des semis et sur le prélèvement de l'azote minéral dans une même UE (il existe un effet de complémentarité entre les espèces). Notre expérience a révélé que le RYT était supérieur ou égal à 1 pour tous les mélanges. Le RYT était significativement supérieur à 1 uniquement pour le mélange

à trois espèces, signifiant qu'il existe bien un effet de complémentarité entre nos espèces. Celui-ci devra néanmoins être vérifié sur un plus long terme et en milieu naturel ;

- 3) Le prélèvement d'azote minéral est supérieur dans les UE bi- et trispécifiques en comparaison aux UE monospécifiques en raison d'une complémentarité entre les espèces. Cette hypothèse a bien été vérifiée pour le PIG dont le Ndff augmente avec la diversité. Le PIG produit également plus de biomasse que les deux autres espèces en cultures plurispécifiques ;
- 4) L'apport d'azote minéral a augmenté la croissance apicale et la productivité surtout pour le MEL. Nous avons remarqué que l'assimilation de N par ces conifères augmente avec la densité de semis par pot, mais elle s'est confirmée surtout pour le PIG.

Au contraire, d'autres résultats infirment nos hypothèses :

- 5) Nos résultats ont démontré que l'effet de la fertilisation au $[\text{NH}_4]_2\text{SO}_4$ sur nos semis est supérieur pour le MEL que pour l'EPN et le PIG. Cependant, le fait que le PIG ait une plus grande biomasse que les deux autres espèces en polyculture suggère qu'il prélève aussi plus de N, lequel ne provenant pas forcément du fertilisant (le N étant présent aussi naturellement dans le sol utilisé pour l'expérience). Pour le PIG, nous avons également remarqué une augmentation du Ndff avec le niveau de diversité. Cette hypothèse pourra être vérifiée et rediscutée puisque l'expérience continue avec la conservation des blocs 4, 5 et 6 du dispositif en serres et des six blocs du dispositif à Simoncouche.

5. CONCLUSION

Cette étude a permis de déterminer les effets des interactions entre trois espèces de conifères boréales, l'épinette noire (EPN), le mélèze laricin (MEL) et le pin gris (PIG), sur le prélèvement de l'azote (N) et la productivité des semis à deux niveaux de disponibilité de N minéral. L'objectif était de déterminer et de comparer leur productivité en plantations monospécifique et plurispécifique, ainsi que déterminer si un effet de complémentarité ou un effet de compétition existait entre ces espèces. Cette étude peut contribuer à répondre à des enjeux du développement durable et de compensation d'émissions de gaz à effets de serre (GES) : il est important de comprendre les caractéristiques des essences à planter, de savoir avec quelle stratégie la plantation doit être effectuée (mono- ou plurispécifique) et de connaître les particularités du terrain à boiser.

Notre étude apporte de nouvelles informations scientifiques et elle s'inscrit dans la recherche de moyens pour augmenter l'absorption du dioxyde de carbone (CO₂) pour assurer la résilience, la biodiversité et la productivité des écosystèmes. L'étude des mécanismes de compétition et de complémentarité, ainsi que l'étude de la fertilisation azotée en forêt boréale permet de répondre au manque de connaissances sur les types d'interactions qu'entretiennent l'EPN, le MEL et le PIG, notamment pour le prélèvement de N minéral du sol. Pour résumer, nos résultats montrent qu'il n'y aurait pas de contre-indication à effectuer des plantations plurispécifiques, puisque le mélange d'espèce ne semble pas affecter la production de biomasse individuelle des semis plantés. Les résultats de notre expérience peuvent alors contribuer à guider l'infrastructure de recherche Carbone boréal pour ses futures plantations dans des DS. Tous ces résultats seront à vérifier et à comparer avec les données récoltées sur le dispositif à Simoncouche dans le futur, afin de confirmer le choix des espèces et de la stratégie de plantations à adopter pour l'afforestation de milieux improductifs en forêt boréale, comme dans les dénudés secs (DS).

Le futur sera plus sec, plus chaud et cela entraînera probablement une baisse de productivité des écosystèmes forestiers (D'Orangeville *et al.* 2018). À l'avenir, il faudra donc peut-être changer les pratiques d'aménagement forestier, les essences ou les provenances plantées pour conserver

un bon niveau de productivité (par exemple, se tourner vers la migration assistée). L'Accord de Paris se veut également durable dans le temps et avec des ambitions révisables à la hausse périodiquement. Cependant, une meilleure gestion des terres est nécessaire pour atteindre cet objectif. Pour résoudre ce problème, Griscom *et al.* (2017) identifient et quantifient des solutions basées sur la nature pour réduire les émissions de GES : ils évoquent 20 actions de conservation, de restauration et d'amélioration de la gestion des terres permettant d'augmenter le stockage du C et/ou d'éviter les émissions de GES dans les forêts, les zones humides, les prairies et les terres agricoles du monde. Ces solutions pourraient fournir 37 % du coût d'atténuation efficace du CO₂ nécessaire jusqu'en 2030 pour une probabilité d'environ 66 % de maintien du réchauffement en dessous de 2°C d'ici 2100 (Griscom *et al.* 2017).

Réaliser l'afforestation de forêts boréales avec des plantations plurispécifiques pourrait avoir un avantage dans l'enjeu de la captation du CO₂ et le maintien à long terme des stocks de C et de la biodiversité. Ultiment, les forêts nouvellement boisées deviendraient des zones plus productives et elles pourraient potentiellement augmenter le taux de séquestration du C, ainsi que la résilience de l'écosystème. Cette démarche pourrait être transposée à d'autres efforts d'afforestation en forêt boréale après que des questions sur la complémentarité temporelle entre les espèces ont été répondues.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Aber J, McDowell W, Nadelhoffer K, Magill A, Berntson G, Kamakea M, McNulty S, Currie W, Rustad L et Fernandez I. 1998. Nitrogen saturation in temperate forest ecosystems : hypotheses revisited. *BioScience*, 48 : 921-934.
- Aber J et Magill A. 2004. Chronic nitrogen additions at the Harvard Forest (USA) : the first 15 years of a nitrogen saturation experiment. *Forest Ecology and Management*, p. 1-5.
- Ashton I, Miller A, Bowman W et Suding K. 2010. Niche complementarity due to plasticity in resource use: plant partitioning of chemical N forms. *Ecology*, 91 : 3252-3260.
- Asselin H, Payette S, Fortin MJ et Vallée S. 2003. The northern limit of *Pinus banksiana* Lamb. in Canada: explaining the difference between the eastern and western distributions. *Journal of biogeography*, 30 : 1709-1718.
- Bai E, Li S, Xu W, Li W, Dai W et Jiang P. 2013. A meta-analysis of experimental warming effects on terrestrial nitrogen pools and dynamics. *The New phytologist*, 199 : 431-440.
- Bastin J, Finegold YG, Mallicone C, Rezende D, Routh M, Zohner D et Crowther C. 2019. The global tree restoration potential. *Science*, p 76-79.
- Bond-Lamberty B, Wang C et Gower S. 2002. Aboveground and belowground biomass and sapwood area allometric equations for six boreal tree species of northern Manitoba. *Canadian journal of forest research*, 32 : 1441-1450.
- Boucher JF, 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.
- Carbone boréal. 2020 (mis à jour en 2023). Carbone boréal. Consulté le 18 mars 2023, <https://carboneboreal.uqac.ca/>
- Cardinale BJ, Palmer MA et Collins SL. 2002. Species diversity enhances ecosystem functioning through interspecific facilitation. *Nature*, 415 : 426.
- Cardinale BJ, Wright JP, Cadotte MW, Carroll IT, Hector A, Srivastava DS, Loreau M et Weis JJ. 2007. Impacts of plant diversity on biomass production increase through time because of species complementarity. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 104 : 18123-18128.
- Cottingham K, Brown B et Lennon J. 2001. Biodiversity may regulate the temporal variability of ecological systems. *Ecology Letters*, 4 : 72-85.
- D'Orangeville L, Houle D, Duchesne L, Phillips RP, Bergeron Y et Kneeshaw D. 2018. Beneficial effects of climate warming on boreal tree growth may be transitory. *Nature Communications*, 9 : 3213.

Despouts M, Prigent G, Mottet M-J, Perron M, Rainville A et Ménérier J. 2007. La génétique au service du reboisement : c'est le temps d'en profiter ! Direction de la recherche forestière, Ministère des Ressources Naturelles et de la Faune, Québec, 2 p.

Doak DF, Bigger D, Harding E, Marvier M, O'Malley R et Thomson D. 1998. The statistical inevitability of stability-diversity relationships in community ecology. *The American Naturalist*, 151 : 264-276.

Doucet R. 1985. Croissance quinquennale de l'épinette noire, du mélèze laricin et du pin gris plantés dans un secteur de coupe totale près de La Tuque. Ministère de l'Énergie et des Ressources (secteur Forêts), Gouvernement du Québec, Québec, 14 p.

Douville G, Fillion S, Boudreault A, Bouchard M, Brulotte F, Fortin F et Rouleau F. 2008. Profil des produits forestiers - première transformation - *granules et bûches de bois densifié*. Ministère des Ressources naturelles et de la Faune (MRNF), Gouvernement du Québec, Québec, 90 p.

Duchesneau R, Yamasaki S et Doyon F. 2006. L'influence des changements climatiques sur la productivité forestière. Institut québécois d'Aménagement de la Forêt feuillue, IQAFF, Québec, 2 p.

Duperron S. 2017. Les symbioses microbiennes : associations au coeur du vivant. ISTE Group, Londres, 133 p.

Environnement Canada. 2021 (mis à jour le 29 mars 2023). Rapport de données quotidiennes, station de Bagotville. Gouvernement du Canada. Consulté le 21 janvier 2022, https://climat.meteo.gc.ca/climate_data/daily_data_f.html?hlyRange=1953-01-01%7C2022-02-16&dlyRange=1942-09-01%7C2022-02-16&mlyRange=1942-01-01%7C2017-12-01&StationID=5889&Prov=QC&urlExtension=f.html&searchType=stnName&optLimit=yearRange&StartYear=2020&EndYear=2022&selRowPerPage=25&Line=0&searchMethod=contains&txtStationName=bagotville&timeframe=2&Day=16&Year=2020&Month=6#

Fradette O, Marty C, Tremblay P, Lord D et Boucher J-F. 2021. Allometric equations for estimating biomass and carbon stocks in afforested open woodlands with black spruce and jack pine, in the eastern canadian boreal forest. *Forests*, 12 : 59.

Gaboury S, Boucher J-F, Villeneuve C, Lord D et Gagnon R. 2009. Estimating the net carbon balance of boreal open woodland afforestation : a case-study in Québec's closed-crown boreal forest. *Forest Ecology and Management*, p. 483-494.

Girard F, Payette S et Gagnon R. 2009. Origin of the lichen–spruce woodland in the closed-crown forest zone of eastern Canada. *Global Ecology and Biogeography*, 18 : 291-303.

Gouvernement du Canada. 2019 (mis à jour en 2019). L'engagement de 2 milliards d'arbres. Consulté le 21 janvier 2022, <https://www.canada.ca/fr/campagne/2-milliards-arbres/collaborer.html>

Gouvernement du Canada. 2020. Transformation secondaire de produits en bois massif au Québec en 2017 : Structure et contribution économique. Ministère des Ressources naturelles, Gouvernement du Canada, Victoria, Colombie-Britannique, 42 p.

Gouvernement du Québec. 2010 (mis à jour en 2023). Loi sur l'aménagement durable du territoire forestier. Consulté le 27 juillet 2023 <https://www.legisquebec.gouv.qc.ca/fr/document/lc/A-18.1>

Gouvernement du Québec. 2022. GES 1990-2020 Inventaire québécois des émissions de gaz à effet de serre en 2020 et leur évolution depuis 1990. Ministère de l'Environnement, de la Lutte contre les Changements Climatiques, de la Faune et des Parcs, Gouvernement du Québec, Québec, 56 p.

Griscom BW, Adams J, Ellis PW, Houghton RA, Lomax G, Miteva DA, Schlesinger WH, Shoch D, Siikamäki JV et Smith P. 2017. Natural climate solutions. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 114 : 11645-11650.

Gundale MJ, Nilsson M, Bansal S et Jäderlund A. 2012. The interactive effects of temperature and light on biological nitrogen fixation in boreal forests. *New Phytologist*, 194 : 453-463.

Hebert F, Boucher JF, Walsh D, Tremblay P, Cote D et Lord D. 2013. Black spruce growth and survival in boreal open woodlands 10 years following mechanical site preparation and planting. *Forestry*, 87 : 277-286.

Hikosaka K. 2004. Interspecific difference in the photosynthesis-nitrogen relationship: patterns, physiological causes, and ecological importance. *Journal of plant research*, 117 : 481-494.

Hobbie EA et Högberg P. 2012. Nitrogen isotopes link mycorrhizal fungi and plants to nitrogen dynamics. *New Phytologist*, 196 : 367-382.

Hoefs J. 1997. *Stable isotope geochemistry*. Springer Nature, Suisse, 504 p.

Högberg P. 1997. Tansley review no. 95 15N natural abundance in soil–plant systems. *The New phytologist*, 137 : 179-203.

Högberg P, Högbom L, Schinkel H, Högberg M, Johannisson C et Wallmark H. 1996. 15N abundance of surface soils, roots and mycorrhizas in profiles of European forest soils. *Oecologia* 108 : 207-214.

Hopkins WG. 2003. *Physiologie végétale*. De Boeck Supérieur, Bruxelles, 532 p.

Houle D, Marty C et Duchesne L. 2015. Response of nitrogen canopy uptake to a rapid decrease in bulk nitrate deposition in two eastern Canadian boreal forests. *Oecologia*, 177 : 29-37.

Houle D, Moore JD, Ouimet R et Marty C. 2014. Tree species partition N uptake by soil depth in boreal forests. *Ecology*, 95 : 1127-1133.

Hulot FD, Lacroix G, Lescher-Moutoué F et Loreau M. 2000. Functional diversity governs ecosystem response to nutrient enrichment. *Nature*, 405 : 340-344.

IPCC. 2019 (mis à jour en 2023). 2019 Refinement to the 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories. Consulté le 14 octobre 2022, <https://www.ipcc.ch/report/2019-refinement-to-the-2006-ipcc-guidelines-for-national-greenhouse-gas-inventories/>

IPCC. 2022. *Climate change 2022 : Mitigation of climate change*. Working group III Contribution to the sixth assessment report of the intergovernmental panel on climate change. Consulté le 14 octobre 2022, <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg3/>

Islam MA et Macdonald SE. 2009. Current uptake of ¹⁵N-labeled ammonium and nitrate in flooded and non-flooded black spruce and tamarack seedlings. *Annals of Forest Science*, 66 : 1 p.

Ives AR, Klug JL et Gross K. 2000. Stability and species richness in complex communities. *Ecology Letters*, 3 : 399-411.

Janssens I, Dieleman W, Luysaert S, Subke J-A, Reichstein M, Ceulemans R, Ciais P, Dolman AJ, Grace J et Matteucci G. 2010. Reduction of forest soil respiration in response to nitrogen deposition. *Nature geoscience*, 3 : 315-322.

Jasinski JP et Payette S. 2005. The creation of alternative stable states in the southern boreal forest, Quebec, Canada. *Ecological Monographs*, 75 : 561-583.

Jörgen P, Högberg P, Ekblad A, Högberg MN, Nordgren A et Näsholm T. 2003. Nitrogen acquisition from inorganic and organic sources by boreal forest plants in the field. *Oecologia*, 137 : 252-257.

Karlsson M, Nilsson U et Örlander G. 2002. Natural regeneration in clear-cuts: effects of scarification, slash removal and clear-cut age. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 17 : 131-138.

Kurz W, Dymond C, White T, Stinson G, Shaw C, Rampley G, Smyth C, Simpson B, Neilson E et Trofymow J. 2009. CBM-CFS3 : a model of carbon-dynamics in forestry and land-use change implementing IPCC standards. *Ecological modelling*, 220 : 480-504.

Kurz WA, Shaw CH, Boisvenue C, Stinson G, Metsaranta J, Leckie D, Dyk A, Smyth C et Neilson ET. 2013. Carbon in Canada's boreal forest — A synthesis. *Environmental Reviews*, 21 : 260-292.

Lambers H, Chapin FS et Pons TL. 2008. *Plant physiological ecology*. Springer, New-York, 736 p.

Lambert-Chan M. 2014. Le défi boréal - Les changements climatiques frappent durement la forêt boréale. La solution ? Créer de nouveaux écosystèmes pour stimuler la résilience forestière. *Inter*, magazine de l'Université du Québec à Montréal, 12.

Lehman CL et Tilman D. 2000. Biodiversity, stability and productivity in competitive communities. *The American Naturalist*, 156 : 534-552.

Lemprière TC, Kurz WA, Hogg EH, Schmoll C, Rampley GJ, Yemshanov D, McKenney DW, Gilsenan R, Beatch A, Blain D, Bhatti JS et Krčmar E. 2013. Canadian boreal forests and climate change mitigation. *Environmental Reviews*, 21 : 293-321.

Loreau M et Hector A. 2001. Partitioning selection and complementarity in biodiversity experiments. *Nature*, 412 : 72-76.

Loreau M, Naeem S, Inchausti P, Bengtsson J, Grime JP, Hector A, Hooper DU, Huston MA, Raffaelli D, Schmid B, Tilman D et Wardle DA. 2001. Biodiversity and ecosystem functioning: current knowledge and future challenges. *Science*, 294 : 804-808.

Lupi C, Morin H, Deslauriers A, Rossi S et Houle D. 2013. Role of soil nitrogen for the conifers of the boreal forest: a critical review. *International Journal of Plant and Soil Science*, 2 : 155-189.

Madec C, Walsh D, Lord D, Tremblay P, Boucher J-F et Bouchard S. 2012. Afforestation of black spruce lichen woodlands by natural seeding. *Northern Journal of Applied Forestry*, 29 : 191-196.

Mansuy N, Gauthier S et Bergeron Y. 2013. Afforestation opportunities when stand productivity is driven by a high risk of natural disturbance: a review of the open lichen woodland in the eastern boreal forest of Canada. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 18 : 245-264.

Mariotti A. 1983. Atmospheric nitrogen is a reliable standard for natural ^{15}N abundance measurements. *Nature*, 303 : 685-687.

Marty B, Chaussidon M, Wiens R, Jurewicz A et Burnett D. 2011. A ^{15}N -poor isotopic composition for the solar system as shown by Genesis solar wind samples. *Science*, 332 : 1533-1536.

Marty C, Piquette J, Dussault-Chouinard É, Morin H, Thiffault N, Houle D, Bradley RL, Ouimet R, Simpson MJ et Paré MC. 2020. Canopy nitrogen addition and soil warming affect conifer seedlings' phenology but have limited impact on growth and soil N mineralization in boreal forests of eastern Canada. *Frontiers in Forests and Global Change*, 3.

McKane RB, Johnson LC, Shaver GR, Nadelhoffer KJ, Rastetter EB, Fry B, Giblin AE, Kielland K, Kwiatkowski BL et Laundre JA. 2002. Resource-based niches provide a basis for plant species diversity and dominance in arctic tundra. *Nature*, 415 : 68-71.

McNaughton SJ. 1977. Diversity and stability of ecological communities : a comment on the role of empiricism in ecology. *The American Naturalist*, 111 : 515-525.

Messier C., Bauhus J., Sousa-Silva R., Auge H., Baeten L., Barsoum N., Bruelheide H., Caldwell B., Cavender-Bares J., Dhiedt E., Eisenhauer N., Ganade G., Gravel D., Guillemot J., Hall J.S., Hector A., Hérault B., Jactel H., Koricheva J., Kreft H., Mereu S., Muys B., Nock C.A., Paquette A., Parker J.D., Perring M.P., Ponette Q., Potvin C., Reich P.B., Scherer-Lorenzen M., Schnabel F., Verheyen K., Weih M., Wollni M., and Zemp D.C. 2022. For the sake of resilience and multifunctionality, let's diversify planted forests! *Conservation Letters* 15(1) : 1–8. doi:10.1111/conl.12829.

Morin X, Fahse L, Scherer-Lorenzen M et Bugmann H. 2011. Tree species richness promotes productivity in temperate forests through strong complementarity between species. *Ecology Letters*, 14 : 1211-1219.

Nations Unies. 2015. Accord de Paris. Paris, 28 p.

Newton PF et Amponsah IG. 2006. Systematic review of short-term growth responses of semi-mature black spruce and jack pine stands to nitrogen-based fertilization treatments. *Forest Ecology and Management*, 237 : 1-14.

Norton TW. 1996. Conservation of biological diversity in temperate and boreal forest ecosystems. *Forest Ecology and Management*, 85 : 1-7.

Paquette A et Messier C. 2011. The effect of biodiversity on tree productivity: from temperate to boreal forests. *Global Ecology and Biogeography*, 20 : 170-180.

Payette S et Delwaide A. 2018. Tamm review : the North-American lichen woodland. *Forest Ecology and Management*, 417 : 167-183.

Payette S, Bhiry N, Delwaide A et Simard M. 2000. Origin of the lichen woodland at its southern range limit in eastern Canada: the catastrophic impact of insect defoliators and fire on the spruce-moss forest. *Canadian journal of forest research*, 30 : 288-305.

Pornon A, Escaravage N et Lamaze T. 2007. Complementarity in mineral nitrogen use among dominant plant species in a subalpine community. *American journal of botany*, 94 : 1778-1785.

Prévost M. 1996. Effets du scarifiage sur les propriétés du sol et l'ensemencement naturel dans une pessière noire à mousses de la forêt boréale québécoise. *Canadian journal of forest research*, 26 : 72-86.

Price DT, Alfaro R, Brown K, Flannigan M, Fleming RA, Hogg E, Girardin M, Lakusta T, Johnston M et McKenney D. 2013. Anticipating the consequences of climate change for Canada's boreal forest ecosystems. *Environmental Reviews*, 21 : 322-365.

Price GR. 1995. The nature of selection. *Journal of theoretical biology*, 175 : 389-396.

Rainville A, Despons M, Beaudoin R, Périnet P, Mottet M-J et Perron M. 2003. L'amélioration des arbres au Québec : un outil de performance industrielle et environnementale. Note de recherche forestière n°127. Direction de la recherche forestière, Ministère des Ressources Naturelles, de la Faune et des Parcs, Québec, 8 p.

Ruijven vJ et Berendse F. 2005. Diversity-productivity relationships: initial effects, long-term patterns, and underlying mechanisms. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 102 : 695-700.

Schulte-Uebbing L et de Vries W. 2018. Global-scale impacts of nitrogen deposition on tree carbon sequestration in tropical, temperate, and boreal forests: a meta-analysis. *Global Change Biology*, 24 : e416-e431.

Splawinski TB. 2015. Dynamique de la régénération de l'épinette noire et du pin gris après feu, coupe de récupération, et éclaircie précommerciale. Thèse de doctorat en sciences de l'environnement, Université du Québec à Montréal, Montréal, 196 p.

Ste-Marie C et Houle D. 2006. Forest floor gross and net nitrogen mineralization in three forest types in Quebec, Canada. *Soil Biology and Biochemistry*, 38 : 2135-2143.

Sulzman EW. 2007. Stable isotope chemistry and measurement : a primer. *Stable isotopes in ecology and environmental science*, 2 : 1-21.

Templer P, Mack M, Chapin F, Christenson L, Compton J, Crook H, Currie W, Curtis C, Dail D et D'Antonio C. 2012. Sinks for nitrogen inputs in terrestrial ecosystems: a meta-analysis of ¹⁵N tracer field studies. *Ecology*, 93 : 1816-1829.

Thiffault E. 2019. Chapter 5 - Boreal forests and soils. *Developments in Soil Science*, 36 : 59-82.

Thiffault E, Samuel AS-L et Serra R. 2015. La récolte de biomasse forestière: saines pratiques et enjeux écologiques dans la forêt boréale canadienne. Ministère des Ressources naturelles, Canada, 93 p.

Thiffault N, Cyr G, Prigent G, Jobidon R et Charette L. 2004. Régénération artificielle des pessières noires à éricacées: effets du scarifiage, de la fertilisation et du type de plants après 10 ans. *The Forestry Chronicle*, 80 : 141-149.

Tilman D. 1996. Biodiversity : population versus ecosystem stability. *Ecology*, 77 : 350-363.

Tilman D. 1999. The ecological consequences of changes in biodiversity : a search for general principles. *Ecology*, 80 : 1455-1474.

Von Felten S, Niklaus PA, Scherer-Lorenzen M, Hector A et Buchmann N. 2012. Do grassland plant communities profit from N partitioning by soil depth? *Ecology*, 93 : 2386-2396.

Yachi S et Loreau M. 1999. Biodiversity and ecosystem productivity in a fluctuating environment : The insurance hypothesis. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 96 : 1463-1468.

ANNEXES

ANNEXE 1 : Caractéristiques du site d'étude de Simoncouche (Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs, Gouvernement du Québec).

Caractéristiques forestières par classes Norme d'inventaire 3^e ou 4^e initiale

Contenu	Code	Descriptif
Type de couvert	F	Feuillu
Composition en essences	PEPE	Peupleraie à peupliers indistincts
Classe densité	B	Plus grand ou égal à 60% et plus petit que 80%
Classe hauteur	1	Les tiges codominantes mesurent 21,5 m et plus
Classe d'âge	70	Peuplement équienné : classe d'age de 70 ans

Description générale

Contenu	Code	Descriptif
Numéro d'inventaire	4	Norme 3^e inventaire Norme 4^e inventaire (initiale ou AIPF) Norme 5^e inventaire
Version d'inventaire	INITIALE	--
Année cartographie	2009	--
Année photo	2006	--
Perturb. d'origine		
Année perturb. d'origine		--
Perturb. partielle		
Année perturb. partielle		--
Dépôt de surface	1A	Dépôt glaciaire, sans morphologie particulière, till indifférencié
Classe de drainage	30	Modéré avec aucun modificateur

Contenu	Code	Descriptif
Type écologique	MS12	Sapinière à bouleau jaune sur dépôt de mince à épais, de texture moyenne et de drainage mésique
Catégorie terrain		
Superficie (ha)	22.3	--

Notes :

Pour connaître les détails concernant la confection de la carte, consultez le document [Cartographie du 5e inventaire écoforestier du Québec méridional — Méthodes et données associées](#).

Téléchargement gratuit à partir de la couche « Téléchargement des données écoforestières » du catalogue Données écoforestières.

ANNEXE 2 : Photos du dispositif expérimental installé dans les serres du Pavillon de la Recherche de Forestière de l'UQAC.



Bloc 1 - Chapelle 3



UE monospécifique
à une EPN



UE monospécifique
à deux MEL



UE plurispécifique
à trois espèces
(EPN, MEL et PIG)

© Lona BAUDRY, 2020 - 2021

ANNEXE 3 : Photos du dispositif expérimental installé à la Forêt d'Enseignement et de Recherche de l'UQAC à Simoncouche.



Site de plantation du dispositif à Simoncouche



UE monospécifique
à un PIG



UE plurispécifique
à deux espèces
(PIG et MEL)



UE monospécifique
à trois EPN

© Lona BAUDRY, 2020 - 2021