

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC EN ABITIBI-TÉMISCAMINGUE

LES EFFETS DE DIVERS TRAITEMENTS SYLVICOLES SUR LA
MAITRISE DE *L'ALNUS INCANA SUBSP. RUGOSA* (DU ROI) R.T.
CLAUSEN) ET LA REMISE EN PRODUCTION FORESTIÈRE EN FORÊT
BORÉALE

MÉMOIRE

PRÉSENTÉ

COMME EXIGENCE PARTIELLE

DE LA MAITRISE EN ÉCOLOGIE

PAR

JONATHAN KIMBUKUSU KUSA

AOÛT 2023

REMERCIEMENTS

J'aimerais d'abord exprimer ma reconnaissance à l'endroit de Annie DesRochers et Nelson Thiffault, respectivement mes directrice et codirecteur de recherche, de m'avoir donné l'opportunité d'entreprendre une maîtrise en écologie forestière en forêt boréale. Je les remercie pour la confiance qu'ils m'ont démontrée tout au long de mes activités de recherche, ainsi que pour leur disponibilité et les précieux conseils qu'ils m'ont prodigués.

Je tiens à remercier également Benoit Lafleur, ancien directeur de recherche et professeur à l'UQAT de m'avoir recruté pour la réalisation de ce projet. Je réserve des remerciements particuliers à l'Éternel Dieu tout puissant; Par lui, j'ai pu trouver la force nécessaire pour relever les différents défis durant mon difficile cheminement de recherche. Merci également à Lucie Barbier, Toky Jeriniaina, Mialintsoa Aroniaina, Jeanny Thivierge, Janie Lavoie, Juanita Rodriguez et Macire Fofana de m'avoir aidé pour les analyses statistiques de mon projet ainsi qu'à la conception de belles diapositives dans le cadre des colloques de grande envergure.

Merci à Raphael Chavardès, Yves Dady Botula, Nathan Egande, Lievin Nkuba et Patrick Malonda pour leurs précieux conseils sur mon master dès mon arrivée à Rouyn-Noranda. Mes remerciements s'adressent au Groupe biblique universitaire (GBU) de l'UQAT, à Joanne Duquette et son époux Jeannot, à Masilas Aoudj et Abdelaziz Boujghad pour leur bienfait indéfectible durant les moments difficiles de ma vie au Canada.

Je suis également très reconnaissant à l'endroit des nombreuses personnes qui m'ont aidé sur le terrain: Victor Beudet, Marie-Claude Mayotte, Hiba Merzouki, Hugo Morin-Brassard, Béatrice Boulet-Couture, Siffrein de rosaire Koukath Sabin, Élise Berthiaume et Mathilde Joncas. Par ailleurs, je réserve des remerciements particuliers à Danielle Charron et Marie-Hélène Longpré de la Chaire AFD, à Raynald Julien et Claude-Michel Bouchard de la Forêt d'enseignement et de recherche du lac Duparquet pour le soutien logistique et administratif.

Enfin, je tiens à remercier le pasteur Daniel Auger et son équipe du Centre Chrétien d'Amos pour les services rendus pendant notre cheminement à Amos. De plus, je remercie Grace Izana, Christos Mukendi, Trésor Imama, Rina Mwayuma, Irène Mafuta, Fezia Matuka ainsi qu'aux pasteurs Onésime Mabaka, Albert Alonge et Patrick Kipalu pour leur amour et soutien permanent vis-à-vis de ma femme lors de son accouchement en mon absence.

Les organismes subventionnaires qui ont contribué à la réalisation de ce projet sont la chaire industrielle CRSNG-UQAT en sylviculture et production de bois.

Finalement, je désire exprimer toute ma reconnaissance envers ma famille. Mille fois merci à ma conjointe, Mado Mukungu Mukalengi, qui fut d'une patience inébranlable et qui est pour moi un modèle de persévérance. Mille fois merci à ma fille, Splendie-Dorcas, qui est une source de bonheur indéniable depuis sa naissance en mon absence. Enfin merci à ma famille Kimbukusu, à ma belle-famille Mukungu et à la famille Kawela de m'avoir transmis leur curiosité et leur envie d'apprendre.

A celles et à ceux qui ne verront pas leur nom sur cette page, trouvez, honnêtement, l'expression de ma gratitude!

AVANT-PROPOS

Le mémoire est présenté sous forme d'article scientifique. Ce dernier sera soumis à la revue avec révision par les pairs « *The Forestry Chronicle* » avec comme auteurs, « Jonathan K. Kimbukusu, Annie DesRochers, et Nelson Thiffault ». Je suis le principal responsable de l'étude, de la collecte des données, de leur analyse et de la rédaction de l'article. Ma direction et codirection de recherche ont contribué à la conception de l'étude et m'ont assisté dans l'interprétation des résultats. Elles ont aussi révisé de manière critique et constructive le contenu de l'article

TABLE DE MATIÈRES

| | |
|--|------|
| AVANT-PROPOS | iv |
| LISTE DES FIGURES..... | vii |
| LISTE DES TABLEAUX..... | viii |
| RÉSUMÉ | ix |
| CHAPITRE I INTRODUCTION GÉNÉRALE..... | 1 |
| 1.1 Contexte et problématique | 1 |
| 1.2 État des connaissances | 6 |
| 1.2.1 Forêt boréale mixte | 6 |
| 1.2.2 Conséquences de l’envahissement de l’aulne rugueux sur la croissance de l’épinette noire..... | 8 |
| 1.2.3 Les différentes méthodes de coupe en forêt boréale mixte et leurs impacts sur la régénération de l’épinette noire. | 12 |
| 1.3 Les traitements de préparation de terrain en forêt boréale mixte | 13 |
| 1.3.1 Hersage et scarifiage | 16 |
| 1.3.2 Décapage..... | 17 |
| 1.3.3 Inversion | 19 |
| 1.3.4 Déchiquetage | 20 |
| 1.4 Objectifs et hypothèses | 21 |
| 1.4.1 Objectifs général et spécifiques | 21 |
| 1.4.2 Hypothèses..... | 22 |
| CHAPITRE II LES EFFETS DE DIVERS TRAITEMENTS SYLVICOLES SUR LA MAITRISE DE L’AULNE RUGUEUX ET LA REMISE EN PRODUCTION FORESTIÈRE EN FORÊT BORÉALE..... | 23 |
| 2.1 Résumé | 24 |
| 2.2 Introduction..... | 26 |
| 2.3 Matériel et méthodes..... | 29 |
| 2.3.1 Site d’étude | 29 |
| 2.3.2 Plan expérimental et échantillonnage | 30 |
| 2.3.3 Prise des données sur terrain..... | 32 |
| 2.3.4 Analyses de laboratoire..... | 35 |
| 2.3.5 Analyses statistiques | 36 |

| | | |
|--|---|----|
| 2.4 | Résultats..... | 37 |
| 2.4.1 | Hauteur, diamètre et pousse annuelle | 37 |
| 2.4.2 | Végétation concurrente | 38 |
| 2.4.3 | Concentrations en éléments nutritifs dans le sol et dans les aiguilles | 40 |
| 2.4.4 | Relations entre les variables nutritionnelles des traitements au sol et foliaires et les variables hauteur, diamètre et pousse annuelle de l'épinette noire. | 43 |
| 2.4.5 | Réponses des variables environnementales (Température du sol, humidité du sol et lumière incidente) en fonction des traitements de préparation de terrain. | 45 |
| 2.5 | Discussion..... | 47 |
| CHAPITRE III CONCLUSION GÉNÉRALE | | 51 |
| 3.1 | Limites de l'étude | 52 |
| 3.2 | Futures études | 53 |
| 3.3 | Implications sylvicoles | 54 |
| ANNEXE A | | 56 |
| REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES | | 58 |

LISTE DES FIGURES

| Figure | Page |
|--------|---|
| 1.1 | Schéma illustratif des effets de divers traitements de préparation de terrain sur la remise en production d'un site forestier post-récolte envahi par l'aulne rugueux 15 |
| 2.1 | Site d'étude 30 |
| 2.2 | Structure des blocs et traitements 31 |
| 2.3 | Description de la méthode de collecte des données sur terrain dans les unités expérimentales. La partie supérieure de la figure (a) illustre les traitements de décapage et d'inversion (avec placeaux). La partie inférieure de la figure (b) illustre les traitements de déchiquetage et témoin (sans placeaux)..... 33 |
| 2.4 | Hauteur (a), longueur de la pousse annuelle (b) et diamètre au niveau du sol (c) des plants d'épinette noire en fonction des traitements de préparation de terrain..... 38 |
| 2.5 | Taux de recouvrement par groupes fonctionnels de plante par traitement de préparation de terrain. Les barres surmontées de lettres différentes sont significativement différentes au seuil de $p \leq 0.05$. Les données sont présentées sous la forme de moyenne \pm erreur type..... 39 |
| 2.6 | Analyse en composantes principales représentant les relations entre les variables explicatives dans les traitements de préparation de terrain. Les paramètres physico-chimiques du sol, les concentrations foliaires ont été incluses dans l'analyse en tant que variables explicatives..... 44 |
| A.1 | Changement d'humidité du sol en fonction du temps par traitement de préparation de terrain (année 2021)..... 56 |
| A.2 | Changement de température du sol en fonction du temps par traitement de préparation de terrain (année 2021)..... 57 |

LISTE DES TABLEAUX

| Tableau | | Page |
|---------|--|------|
| 2.1 | Concentration en éléments nutritifs (en g/kg ⁻¹) et pH du sol (moyenne ± erreur standard) par traitement de préparation de terrain..... | 41 |
| 2.2 | Concentrations foliaires en éléments nutritifs des épinettes noires (en g /kg ⁻¹) moyenne ± erreur standard) par traitement de préparation de terrain..... | 42 |
| 2.3 | Moyennes mensuelles pour la période de juin-septembre 2021 de la température et de l'humidité du sol par traitement de préparation..... | 45 |
| 2.4 | Pourcentage moyen de lumière incidente à 1 m de hauteur des traitements..... | 46 |
| A.1 | Variables hauteur, pousse annuelle, diamètre des plants d'épinette noire en fonction des traitements de préparation de terrain après 1 an de reboisement (2021)..... | 56 |

RÉSUMÉ

Des couverts denses d'aulnes rugueux (*Alnus incana subsp. rugosa* (Du Roi) R.T. Clausen) suite à la récolte peuvent résulter de l'augmentation de la disponibilité de la lumière et de la remontée de la nappe phréatique, empêchant l'établissement et la régénération de l'épinette noire dans les peuplements aménagés. Afin d'étudier le potentiel de restauration de la productivité de sites forestiers humides dominés par l'aulne rugueux, nous avons mis en place, à l'automne 2019, un dispositif expérimental dans lequel nous avons testé quatre méthodes de préparation de terrain (décapage, inversion, déchiquetage et témoin non traité) à la Forêt d'enseignement et de recherche du lac Duparquet, au Québec, Canada. À l'été 2020, nous avons mis en terre des plants d'épinette noire (*Picea mariana* (Mill.) BSP) dans chacun des traitements, et ensuite avons mesuré leur croissance ainsi que des variables environnementales (lumière, humidité du sol, température du sol, végétation concurrente) à l'été 2021 dans cinq parcelles de 100 m² par unité expérimentale. Nos résultats ont révélé que les traitements de préparation de terrain présentent des effets bénéfiques sur la croissance et la taille des plants qui, en moyenne, ont doublé sur les sites traités (50% supérieurs aux sites non traités). Les plants reboisés dans le traitement de déchiquetage ont eu une meilleure hauteur et ont eu une plus longue pousse annuelle 2021 que ceux du traitement d'inversion, alors que tous les plants des traitements de décapage, de déchiquetage et d'inversion ont eu un diamètre statistiquement similaire. Le décapage, le déchiquetage et l'inversion ont permis de maîtriser la régénération des espèces concurrentes, à savoir les arbres, les arbustes, les aulnes et les fougères, tout en augmentant la présence des graminées, en particulier dans les traitements de décapage et d'inversion. Les conditions de température, d'humidité, de lumière et de pH du sol par les traitements de décapage, de déchiquetage et d'inversion n'ont pas favorisé une concentration significative des nutriments au sol et dans les aiguilles des semis reboisés par rapport au témoin. Nous avons constaté que les traitements de décapage et d'inversion ont influencé de façon similaire les propriétés physico-chimiques du sol des microsites créés, ainsi que des parcelles hors-placeaux. La diversité des conditions environnementales créées par le traitement d'inversion et l'amélioration significative du pH dans les sols de décapage et les sols hors-placeaux de l'inversion, ainsi que l'augmentation significative de K dans les sols hors-placeaux décapage, devraient être prises en compte par les sylviculteurs lors de la planification de projets de restauration forestière sur des sites humides. Un suivi à plus long terme est nécessaire pour mieux comprendre la contribution de l'aulne à l'apport de N dans les sites traités et évaluer la contribution économique des traitements dans les peuplements.

Mots clés : Préparation mécanique de terrain, décapage, déchiquetage, inversion, *Alnus rugosa*, *Picea mariana*, sylviculture, aménagement forestier

CHAPITRE I

INTRODUCTION GÉNÉRALE

1.1 Contexte et problématique

Les forêts occupent 30,7 % de la surface terrestre de la planète (FAO, 2016). La forêt boréale est le deuxième plus grand biome terrestre du monde (Teodoru *et al.*, 2009), couvrant 14 millions de km² répartis sur une ceinture forestière circumpolaire (Burton *et al.*, 2003) et représentant environ 25 % de la forêt mondiale (Dunn *et al.*, 2007). Depuis le début du 20^e siècle, la foresterie canadienne est soumise à de multiples défis écologiques, sociaux et économiques visant à répondre aux demandes de la société (Gauthier *et al.*, 2008; Girona *et al.*, 2023). Les peuplements aménagés dont la régénération ou l'établissement n'est pas rapide après la récolte peuvent être vite envahis par l'aulne rugueux (*Alnus incana subsp. rugosa* (Du Roi) R.T. Clausen) (Buse, 1992; Grondin *et al.* 2014), surtout dans les sites humides où il était présent dans la communauté arbustive du sous-étage avant la récolte (Harvey & Bergeron, 1989; Grondin *et al.* 2014).

La densité des peuplements d'aulnes est souvent le résultat de l'augmentation de la disponibilité de la lumière et de la remontée de la nappe phréatique après l'exploitation forestière (Jobidon, 1995). L'invasion de l'aulne se produit principalement par propagation végétative (Johnston, 1968). De plus, la récolte de l'épinette noire (*Picea mariana* (Mill.) BSP) ou du sapin baumier (*Abies balsamea* (L.) Mill.) sur sites humides peut être bénéfique à l'expansion de l'aulne (Healy & Gill, 1974; Vincent, 1964; Grondin *et al.* 2014). Dans les stations humides du Québec, l'aulne rugueux est généralement présent sous le couvert forestier (Buse, 1992; Chen & Popadiouk, 2002). Sur ces sites, l'ouverture du couvert pour la récolte de bois peut créer des conditions favorables à son expansion (Jobidon, 1995; Grondin *et al.* 2014; Girona *et al.*, 2023), au détriment de la régénération d'essences commerciales (Gilbert & Payette, 1982; Lafleur *et al.*, 2019).

Le broyage de l'aulne par la circulation des machines lors des opérations de récolte ou de préparation de terrain peut en outre stimuler la production de rejets de souche (Grondin & Cimon, 2003; Lafleur *et al.*, 2019). La régénération des aulnes, combinée à une plus grande disponibilité en lumière, favorise l'envahissement des sites humides au détriment de la régénération forestière, notamment celle de l'épinette noire (Thiffault *et al.*, 2004). Dans ce contexte, il est nécessaire de développer des traitements de préparation de terrain appropriés pour limiter la régénération des aulnes et favoriser la régénération des conifères.

La préparation de terrain est reconnue comme une solution efficace pour favoriser l'établissement de la régénération et minimiser le risque d'invasion par des espèces concurrentes (Durand, 1988; Jobidon, 1990). En forêt boréale, le principal objectif de la préparation de terrain est généralement de créer un nombre suffisant de microsites adéquats pour favoriser l'établissement, la survie et la croissance des semis qui seront plantés (Von der Gonna, 1992). Selon McKinnon *et al.* (2002) et Thiffault *et al.* (2004), la préparation du site améliore diverses caractéristiques du sol : (1) la température; (2) la disponibilité en eau; (3) l'aération; (4) la disponibilité en nutriments; et (5) diminuerait l'abondance de la végétation concurrente. Buse (1992) et Jobidon (1995) soulignent que les traitements courants de préparation de terrain ne font que couper ou déraciner les tiges d'aulne et sont donc susceptibles de stimuler le drageonnement et le réenvahissement. Pour prévenir ce problème, il est recommandé de séparer les tiges des racines par scalpage sur une profondeur de 10 à 15 cm afin d'empêcher la régénération végétative (Huenneke, 1985; Stoeckeler & Heinselman, 1950). De même, une étude menée dans le Nord-Ouest du Québec a indiqué que le scarifiage des sols de sites argileux mal drainés réduisait l'abondance de l'aulne rugueux (Durand, 1988). Enfin, Stoeckeler et Heinselman (1950) ont observé que la coupe printanière ou hivernale entraînait une régénération dense de l'aulne, alors que la coupe estivale (juillet et août) la réduisait ainsi que sa croissance, probablement en raison du déficit hydrique estival.

Du fait de la courte durée de la saison de croissance végétale en forêt boréale, le réchauffement du sol forestier par l'ouverture de la canopée stimulerait l'activité des

racines, la biomasse microbienne, la décomposition et la minéralisation de la matière organique (Paustian & Schnürer, 1987; Vitousek & Matson, 1985). En revanche, Paustian et Schnürer (1987) ont observé des taux de décomposition plus élevés lorsque les conditions de prolifération de la biomasse microbienne sont optimales, c'est-à-dire lorsque le potentiel hydrique est d'environ -10 kPa. Dans des conditions saturées ou très sèches (< -8000 kPa), l'activité microbienne cesse pratiquement et les taux de décomposition diminuent (Trofymow, 1999).

La résilience des sites forestiers humides peut être affectée par des pratiques sylvicoles non adaptées aux conditions écologiques du Nord-Ouest Québécois, en l'occurrence les coupes totales (CT) (Drever *et al.*, 2006). En raison des effets de l'aulne rugueux sur le succès de la régénération de l'épinette noire (Durand, 1988; Lafleur *et al.*, 2019), il est nécessaire d'appliquer des traitements adaptés aux sols humides afin de maintenir leur résistance et leur résilience c'est-à-dire la capacité des sites humides à se remettre de perturbations telles que l'exploitation forestière sans changement significatif dans le taux de croissance des arbres (Drever *et al.*, 2006; Holling, 1973). La notion de résistance fait référence, par exemple, à la capacité d'un système (pessière noire sur un site humide) à absorber les effets d'une perturbation (exploitation forestière) sans subir un changement d'état (composition du peuplement), c'est-à-dire sans subir de changements significatifs dans les variables et les processus qui soutiennent son fonctionnement (Gauthier *et al.*, 2008; Holling, 1973; Girona *et al.*, 2023). L'application de la théorie de la résilience nécessite de prendre en compte l'état de l'écosystème considéré (site forestier humide), les perturbations et les stress qui affectent la persistance de leurs états alternatifs (Drever *et al.*, 2006). L'état d'équilibre alternatif ou différent du peuplement initial est caractérisé, entre autres, par l'invasion d'espèces pionnières (aulne), qui est donc le résultat d'un schéma de colonisation et d'inhibition des espèces successives (épinette noire). Cette dynamique résulte d'un complexe de processus interactifs (compétition, complémentarité de niche) parmi lesquels l'aulne neutralise la régénération des plants d'épinette noire (Cornet, 1997; Lafleur *et al.*, 2019; Rietkerk *et al.*, 2004).

Les écosystèmes forestiers représentent un environnement complexe où se mêlent des matériaux morts aux caractéristiques chimiques différentes (feuillus, résineux, bryophytes) (Chen & Popadiouk, 2002). Dans la couche de matière organique, la distribution du rapport C/N est spatialement inégale (Turetsky *et al.*, 2012). Selon les études de Harvey et Bergeron (1989), l'aulne rugueux serait plus abondant sur les sites organiques mal drainés issus de coupe, c'est-à-dire où la couche organique est supérieure à 50 cm d'épaisseur, contrairement aux sites argileux ou sableux mal drainés avec des sols forestiers plus minces (environ 9 cm d'épaisseur).

Dans les peuplements d'épinette noire, le développement végétatif des semis et des racines est principalement déterminé par l'azote (N) (Hurd *et al.*, 2001; Myrold & Huss-Danell, 2003). Dans le sol organique, le N peut se trouver sous diverses formes (N organique, N inorganique) (Andrianarisoa, 2009; Strengbom *et al.*, 2004). Cependant, en raison de l'enracinement superficiel de l'épinette noire, la capacité de celle-ci à absorber les nutriments en profondeur est limitée (Jutras *et al.*, 2006). Dans le sol, l'activité de la biomasse microbienne minéralise le N sous des conditions optimales de température, d'humidité et de pH pour être ensuite assimilable par les plantes sous diverses formes, dont l'ammonium (NH_4^+) ou le nitrate (NO_3^-) (Jerabkova *et al.*, 2006; N'Dayegamiye *et al.*, 2007). Tout au long du processus de minéralisation, le N sous forme organique est transformé en N ammoniacal NH_4^+ puis en nitrate NO_3^- (Lupi *et al.*, 2013; N'Dayegamiye *et al.*, 2007). Les micro-organismes se servent d'une partie du N minéralisé pour leur métabolisme, et une autre partie est libérée et mobilisée sous forme de N ammoniacal dans le sol. Ensuite, la biomasse microbienne nitrifiante transforme le N ammoniacal NH_4^+ en nitrate NO_3^- , soit la forme chimique consommable par l'épinette noire (Bonan & Cleve, 1992; Lupi *et al.*, 2013).

L'aulne améliore la composition chimique des sols forestiers boréaux en N (Plenchette *et al.*, 1983). Doté des racines infectées par des bactéries actinomycètes fixatrices du N (Furlow, 1979), l'aulne peut apporter de 6 à 43 kg de N $\text{ha}^{-1} \text{an}^{-1}$ (Myrold & Huss-Danell, 2003; Plenchette *et al.*, 1983) lorsque le N contenu dans ses feuilles et racines est libéré dans le sol, rendu ainsi disponible pour d'autres

plantes (Hurd *et al.*, 2001). Par ailleurs, l'aulne joue un rôle important dans le bilan d'évapotranspiration des tourbières boisées et peut abaisser les nappes phréatiques (Jutras *et al.*, 2006). De même, Jutras *et al.* (2006) ont signalé une amélioration de la croissance des arbres en présence d'aulnes. Dans ce contexte, la présence d'aulnes pourrait favoriser la croissance des conifères par facilitation écologique (Thiffault & Hébert, 2017) dans les écosystèmes forestiers où la disponibilité du N du sol est faible et la nappe phréatique est peu profonde. Par contre, sur les sites où la densité des aulnes est trop élevée, les traitements de préparation du site pourraient être utilisés pour réduire cette densité tout en maintenant leur présence afin d'en conserver leurs effets bénéfiques. Cependant, les conditions environnementales où l'aulne rugueux serait favorable à la croissance des arbres restent à identifier.

Malgré l'effet possiblement bénéfique de l'aulne sur la croissance des arbres et la productivité des peuplements, très peu d'études ont examiné comment les pratiques sylvicoles peuvent être adaptées aux sites dominés par l'aulne, et la plupart de celles-ci ont été réalisées avant 1990. Parmi les études disponibles, on s'interroge encore sur l'efficacité des traitements de préparation de terrain à contrôler la concurrence de l'aulne sur la régénération résineuse. En outre, dans la forêt boréale mixte, les préoccupations persistent quant aux avantages écologiques de l'association de l'aulne avec les semis reboisés sur les sites humides. Dans ce contexte, nous testerons comment la préparation du site peut être utilisée pour maîtriser simultanément l'abondance des aulnes et favoriser la croissance des arbres. En même temps, ce projet fournira des outils d'aide à la décision aux gestionnaires forestiers pour les aider à restaurer les peuplements perturbés par l'invasion de l'aulne rugueux sur les sites humides de la forêt boréale.

1.2 État des connaissances

1.2.1. Forêt boréale mixte

Recouvrant environ 50 millions de km², pour un équivalent de 33 % de la surface de la terre, la forêt boréale appartient à une distribution mondiale circumhémisphérique. En Amérique du Nord, celle-ci se localise du Groenland à Terre-Neuve et du nord du Canada à l'Alaska (Bradshaw *et al.*, 2009; Brandt *et al.*, 2013). Marquée par des hivers froids et enneigés avec une courte saison de croissance, la forêt boréale a un climat subarctique (Burton *et al.*, 2010). Pendant 30 à 120 jours de l'année, les températures quotidiennes moyennes sont supérieures à 10 °C (Walter, 1985). Avec des précipitations moyennes allant de 150 à 450 mm an⁻¹, les variations des précipitations sont importantes le long des gradients longitudinaux (Walter, 1985). Selon la World Wide Baseline for Soil Resources (WRB), les sols boréaux sont principalement des cryosols (27 %), des podzols (15 %), des cambisols (8 %) et des leptosols (8 %); ils sont relativement humides et froids (Jones *et al.*, 2010).

Parcourue par un gradient climatique nord-sud, la région boréale se caractérise par une diversité de sols, aussi bien organiques que minéraux (Soil Classification Working Group, 1998). Ceux-ci sont généralement acides et pauvres en nutriments, notamment en N, lequel est considéré comme une des principales contraintes à la croissance des arbres et donc à la productivité des forêts de la zone boréale (Soil Classification Working Group, 1998; Tamm, 1991). En région québécoise, par exemple, la disponibilité de N dans le sol détermine la croissance des espèces végétales (Tamm, 1991), puisque celui-ci augmente la photosynthèse, la surface foliaire, la croissance et la formation du bois (Bonan & Cleve, 1992; Lupi *et al.*, 2013; Thiffault *et al.*, 2021). De nombreuses études, dont celles de Lafleur *et al.* (2010) et Lafleur *et al.* (2011), ont permis de démontrer que des diminutions de la productivité forestière étaient dues à des limitations nutritionnelles, notamment en N, en forêt boréale et plus spécifiquement dans les pessières noires paludifiées de

l'est du Canada. Sur des sites humides et paludifiés de la forêt boréale, on a constaté que la croissance de l'épinette noire diminuait avec l'augmentation de l'humidité du sol et de l'épaisseur de la couche organique sur le sol minéral (Cleve *et al.*, 1990; Yamasaki *et al.*, 2002).

Dominée par deux principales espèces de conifères dans les peuplements monospécifiques, la forêt boréale intéresse de nombreux chercheurs (Zasada *et al.*, 1997). Dans la région Nord-Est du Canada, les forêts boréales sont dominées par l'épinette noire (Brandt, 2009; Liu & Yang, 2014). De grandes étendues de feuillus intolérants à l'ombre, comme le peuplier faux-tremble (*Populus tremuloides* Michx., ci-après appelé tremble), le peuplier baumier (*Populus balsamifera* L.), le bouleau à papier (*Betula papyrifera* Marshall) en peuplements purs ou mélangés avec des conifères tels que le mélèze laricin (*Larix laricina* (Du Roi) K. Koch), le sapin baumier et le pin gris (*Pinus banksiana* Lamb.), qui dominent le sous-étage avec quelques arbustes, dont notamment l'aulne rugueux peuplent le paysage forestier (Brandt *et al.*, 2013; Jobidon, 1995). En outre, les lichens et les bryophytes constituent un maillon important de l'équilibre de cet écosystème (DeLuca *et al.*, 2002; Rousk *et al.*, 2013). Ceux-ci ont permis à la forêt boréale de bénéficier d'une part estimée à 20-50% de la production primaire nette (Turetsky, 2003; Turetsky *et al.*, 2012).

Le climat froid boréal du Québec est responsable des taux de décomposition et d'évapotranspiration relativement faibles dans les forêts boréales mixtes (Read *et al.*, 2004). Il en ressort une accumulation de matière organique du sol au fil du temps. Une telle accumulation de matière organique (MO) au sol (avec une forte concentration de polyphénols) couplée à un faible pH peut limiter la minéralisation de N et surtout la nitrification (Lupi *et al.*, 2013; N'Dayegamiye *et al.*, 2007). Par conséquent, l'apport du N par fixation biologique est particulièrement important pour la croissance des plantes (Amthor, 1995; Lupi *et al.*, 2013).

La forêt boréale mixte canadienne est soumise à de nombreuses perturbations naturelles (Lafleur *et al.*, 2010). On distingue, d'une part, les perturbations

principales comme les feux (Chen & Popadiouk, 2002) et, d'autre part, les perturbations secondaires telles que les épidémies d'insectes, les maladies ou les chablis. En plus des perturbations naturelles mentionnées, au cours des dernières décennies, la récolte du bois est devenue une source considérable de perturbation des écosystèmes de la forêt boréale nord-américaine (Perron *et al.*, 2008).

Au Québec, suivant les zones de végétation et les domaines bioclimatiques (Saucier *et al.*, 1998; Saucier *et al.*, 2009), les forêts mixtes de conifères et d'essences feuillues se retrouvent dans la partie sud du domaine de la pessière noire à mousses et dans la sapinière à bouleau blanc. Ces domaines constituent les forêts mixtes boréales.

Correspondant au domaine de la sapinière à bouleau blanc et à la sapinière à bouleau jaune au Québec, la forêt boréale mixte couvre 139 000 km² (Chen *et al.*, 2014). La forêt boréale mixte offre de nombreux biens et services aux communautés canadiennes : 1) approvisionnement (bois d'œuvre, pâte à papier, bois de chauffage, nourriture et eau douce); 2) régulation (régulation du climat, régulation des inondations, régulation des maladies et purification de l'eau); 3) services culturels (spirituels, éducatifs, récréatifs et esthétiques); et 4) services de soutien (production primaire, cycle des éléments nutritifs et formation des sols) (Gauthier *et al.*, 2008).

1.2.2. Conséquences de l'envahissement de l'aulne rugueux sur la croissance de l'épinette noire

Au Canada, l'aulne rugueux se trouve généralement sur des sites dont le sol est saturé en eau au printemps, même si ces sites deviennent plus secs en été (Healy & Gill, 1974). Knighton (1981) a étudié, dans des conditions contrôlées, la tolérance de l'aulne rugueux à des conditions de sol inondé pendant deux ans, où l'eau était maintenue au niveau du collet des racines (0,0 cm), à 7,5 cm et à 15,0 cm de hauteur. Après cette période, le plus important taux de mortalité des aulnes était dans les sols

plus inondés (7,5 cm et 15, 0 cm). Le taux de survie le plus important des tiges d'aulnes avait été observé dans le sol peu inondé. Sur les sols à texture fine et moyenne, l'aulne rugueux pousse bien (Healy & Gill, 1974).

La tolérance de l'aulne rugueux à l'alcalinité ou à l'acidité du sol est mal définie dans la littérature. Cependant, il peut être comparé à *Alnus glutinosa* ou *Alnus incana*. Celles-ci poussent bien sur des sols dont le pH est compris entre 3,4 et 7,7 (Healy & Gill, 1974; Knighton, 1981). L'aulne rugueux étant une espèce qui fixe du N atmosphérique par son association symbiotique (*actinorhyze*) avec *Frankia* (actinomycète), on peut le trouver sur des sites dégradés et pauvres en N (Jobidon, 1995). De plus, les racines des aulnes facilitent souvent la croissance des résineux sur certains sites appauvris, car elles fixent le N atmosphérique (Brown & Hansen, 1954; Fortin *et al.*, 1984; Roy *et al.*, 2007). Selon une étude de peuplements naturels d'aulnes rugueux au Québec, Fortin *et al.* (1983) rapportent une production annuelle de 1600 kg de feuilles par hectare, ce qui correspond à 43 kg/ha⁻¹ de N. On estime que l'aulne rugueux peut fixer annuellement 79 à 150 kg de N atmosphérique par hectare (Chatarpaul & Carlisle, 1983). Du fait de la décomposition rapide de sa litière à la surface du sol, l'aulne fournit des éléments nutritifs à son environnement (Daly, 1966).

Sous ombrage, l'aulne rugueux croît moins bien qu'en plein soleil. Il est considéré comme une espèce semi-tolérante à l'ombre (Healy & Gill, 1974). Parallèlement, dans des conditions d'ombre, les rejets d'aulne sont plus tolérants que les semis (Jobidon, 1995). La floraison de l'aulne commence tôt au printemps. Le pollen est déjà mature à la fin de l'automne précédent (Bassett *et al.*, 1961). À l'âge de sept ans, l'aulne commence à produire des graines (Brown & Hansen, 1954). Le vent est le facteur principal de la pollinisation des fleurs de l'aulne (Heinrich, 1976). La dispersion des graines a lieu à partir de septembre (Healy & Gill, 1974).

Dans les stations où le sol a récemment été exposé à la lumière, l'aulne se reproduit par graines; autrement, il se maintient par reproduction végétative, ayant la capacité de former des rejets de souche, des drageons et de se reproduire par marcottage

(Brown & Hansen, 1954; Healy & Gill, 1974). Le mode de reproduction végétatif le plus important est la formation de rejets, tandis que le drageonnement est le moins important (Brown & Hansen, 1954).

Bien que l'aulne rugueux puisse atteindre une hauteur près de 8 m et un diamètre à hauteur de poitrine (1,3 m; DHP) dépassant 12 cm dans certains cas (Brown & Hansen, 1954), sa hauteur moyenne varie de 1,5 à 2,4 m (Vincent, 1964). À l'âge de neuf ou dix ans, le taux annuel de croissance de la hauteur diminue (Vincent, 1964), et par conséquent, les tiges commencent à mourir à l'âge de 20 ans; peu de tiges atteignent 30 ans (Healy & Gill 1974), bien que Brown et Hansen (1954) en aient trouvé une qui avait 45 ans.

À la différence de l'aulne rugueux, l'épinette noire est l'une des principales essences forestières et constitue le domaine bioclimatique de la pessière à mousses au Québec. Le domaine de la pessière à mousses représente plus de 29 % de la superficie totale (412 400 km²) et environ 62 % de la superficie forestière commerciale du Québec (MRNFP, 2003).

L'épinette noire peut survivre à des conditions climatiques extrêmes (de -62 °C à -34 °C à son point le plus froid, à 27 °C à 41 °C à son point le plus chaud, avec une moyenne de -11 °C à 7 °C), et à une vaste gamme de sols de textures et de drainages différents (loameux, humiques, mésiques, fibreux, etc.) (Brumelis & Carleton, 1989; Groot, 1995; Viereck & Johnston, 1990). En effet, elle pousse mieux sur les sols minéraux de profondeur moyenne et de texture moyenne à grossière et sur les sols argileux structurés (Buse & LeBlanc, 1990), tandis que les sites les moins favorables sont les sols peu profonds, secs et de texture fine (Buse & Baker, 1990; Viereck & Johnston, 1990). L'épinette noire se développe mieux sous des conditions fraîches avec un sol organique humide où ses racines adventives peu profondes lui donnent un net avantage sur les autres espèces d'arbres à racines plus profondes lorsque la nappe phréatique est près de la surface du sol (Jutras *et al.*, 2006). Ses racines sont concentrées dans les 20 premiers centimètres du sol (Viereck & Johnston, 1990).

La croissance de l'épinette noire est plus lente que celle de la plupart des arbres et arbustes associés (Heinselman, 1981; Viereck & Johnston, 1990; Montoro Girona *et al.*, 2018). Elle est connue pour sa tolérance à l'ombre et peut survivre pendant de longues périodes sous un couvert en limitant sa croissance (Viereck & Johnston, 1990). Il a été démontré que les racines de l'épinette noire sont fréquemment en symbiose avec des champignons ectomycorhiziens qui favorisent l'absorption racinaire et offrent une protection contre les pathogènes, ce qui peut avoir un effet positif sur sa croissance (Nadeau & Khasa, 2015).

À l'instar de nombreuses espèces de conifères, l'épinette noire est adaptée pour se régénérer après un incendie (Viereck & Johnston 1990). La reproduction de l'épinette noire se fait de deux façons, soit par graines, soit par marcottage (Boily & Doucet, 1993). Alors qu'elle produit des cônes semi-sérotineux, l'épinette noire libère ses graines lorsque celles-ci sont matures ou lorsqu'elles sont exposées à une chaleur intense comme un feu de forêt (Viereck, 1983). L'exposition du sol minéral après un feu de forte intensité entraîne la formation de lits de germination favorables à l'établissement de cette espèce (St-Pierre *et al.*, 1991).

Les effets néfastes de l'aulne rugueux sur la régénération de l'épinette noire sont, à ce jour, peu documentés. La documentation disponible indique que le couvert de l'aulne forme un écran dense qui limite la régénération résineuse, dont l'épinette noire, sur une longue période et peut même l'empêcher de s'établir (Jobidon, 1995). En Ontario, la quantité de lumière mesurée atteignant le bourgeon terminal des conifères en régénération sous un couvert d'aulnes rugueux était souvent inférieure à 40% de la pleine lumière (Vincent, 1964). L'étude a conclu que la quantité de lumière disponible était le principal facteur expliquant la croissance en hauteur des tiges de conifères. En outre, Johnston (1972) estimait que le couvert d'aulnes devait être maintenu à une faible densité pour permettre à la régénération résineuse de s'établir.

Dans la revue de littérature développée par Michalet *et al.* (2008) sur les interactions entre espèces feuillues et résineuses dans les forêts de montagne en France, ces

derniers partagent le constat que les espèces pionnières feuillues, dont l'aulne est un exemple, facilitent l'arrivée des espèces de résineuses tolérantes à l'ombre au stade juvénile. L'environnement créé par celles-ci permet notamment aux jeunes épinettes noires de bénéficier d'une réserve importante de nutriments mobilisés sous l'effet de l'activité microbienne qui résulte de la quantité de feuilles mortes disponibles à la surface du sol. Toutefois, au stade adulte, les individus d'épinette ont besoin de plus de lumière et ne peuvent plus évoluer sous couvert d'aulne (Viereck & Johnston, 1990; Michalet *et al.*, 2008).

1.2.3. Les différentes méthodes de coupe en forêt boréale mixte et leurs impacts sur la régénération de l'épinette noire.

Depuis les dernières décennies, la récolte du bois a entraîné des perturbations importantes dans les écosystèmes de la forêt boréale nord-américaine (Perron *et al.*, 2008; Girona *et al.*, 2023). Cette pratique a atteint un niveau intensif depuis les années 1950 à la suite de la mécanisation des opérations forestières pour les CT de grande envergure (Gauthier *et al.*, 2008; Lafleur *et al.*, 2010; Girona *et al.*, 2023). Aujourd'hui les coupes sont caractérisées par un gradient de sévérité (Doucet, 1988), faisant que chaque écosystème forestier réagit selon son propre contexte (Gauthier *et al.*, 2008). Par exemple, lorsqu'une perturbation telle que le feu suit une coupe, le peuplement peut effectuer une transition vers une lande à lichens (Dussart & Payette, 2002).

On ne peut plus nier aujourd'hui les effets de CT sur les peuplements mixtes. Dans les sites humides, lorsque la régénération préétablie est insuffisante, les conditions post-récolte ralentissent l'établissement et le développement des semis d'épinette noire (Seymour, 1995). Une expansion de la couverture par la végétation compétitive se produit (Chen & Popadiouk, 2002; Seymour, 1995), composée principalement d'arbustes et de feuillus dont l'aulne rugueux. Dans de telles

conditions, les peuplements successifs se composent donc d'une faible représentation d'épinette noire (Chen & Popadiouk, 2002).

À partir de 1995, la CT a progressivement été remplacée par la coupe avec protection de la régénération et du sol (CPRS) (Groot, 1995; Groot *et al.*, 2005). Elle représente près de 93% de la surface coupée au Canada (Canadian Forest Service, 2020). La CPRS est une CT qui encourage la régénération naturelle dans les peuplements de conifères (Groot, 1995). En sylviculture, la CPRS a pour effet de maintenir sur le site tous les arbres dont le DHP est inférieur < 9,1 cm lors de la récolte dans le peuplement (Brassard & Chen, 2010; McRae *et al.*, 2001). En outre, cette pratique de récolte sylvicole limite le déplacement de la machinerie à des sentiers de débardage espacés de 10 à 15 m. Aussi, les sentiers ne doivent pas occuper plus de 25% de la superficie de la forêt sachant que les sentiers de débardage sont des micro-environnements très perturbés (Harvey & Brais, 2002). En effet, les compétiteurs sont plus nombreux dans les sentiers et il est recommandé de limiter la quantité et l'étendue des sentiers afin de restreindre leurs effets négatifs sur la régénération (Harvey & Brais, 2002). Face aux multiples défis d'assurer la régénération post-récolte des peuplements d'épinette noire : l'essence la plus recherchée par l'industrie papetière et la scierie au Québec, la CPRS s'est avérée être une solution efficace de maintien de la productivité forestière. En minimisant les perturbations au sol, cette méthode de coupe assure une meilleure régénération forestière. Au Québec, les compagnies forestières n'ont plus besoin de planter après chaque coupe en utilisant le CPRS, tant que la régénération préétablie est suffisante, tant en qualité qu'en quantité (Thiffault *et al.* 2003).

1.3 Les traitements de préparation de terrain en forêt boréale mixte

La régénération des résineux après CT s'est souvent avérée difficile dans la forêt boréale nord-américaine (Lazaruk *et al.*, 2008). Lorsqu'ils sont recouverts par des feuillus, des herbes et une variété d'arbustes de début de succession à croissance

plus rapide (Lieffers *et al.*, 1993; Von der Gonna, 1992), les semis d'épinette noire ont un taux de croissance lent (Nienstaedt & Zasada, 1990). En plus de la concurrence pour la lumière, les semis d'épinette noire doivent également rivaliser avec l'aulne rugueux, pour d'autres ressources essentielles du sol comme l'eau et les nutriments minéraux (Lieffers *et al.*, 1993; Nienstaedt & Zasada, 1990).

Au Québec, le but principal de la préparation mécanique de terrain est de générer des microsites propices à la régénération et à l'établissement du futur peuplement (Thiffault, 2016; Von der Gonna, 1992). À l'échelle des microsites, la préparation mécanique de terrain crée diverses conditions suivant la technique utilisée (Figure 1.1). Cela donne des caractéristiques physiques (p. ex., drainage, taux d'humidité, aération du sol), chimiques et biologiques (p. ex., disponibilités des nutriments, degré de compétition) pouvant être fort différentes (Bedford & Sutton, 2000; Henneb *et al.*, 2015; Johnston, 1972; Thiffault, 2016). Selon une étude réalisée en Colombie-Britannique portant sur les effets de huit techniques de préparation mécanique de terrain (sur terrain non paludifié) concernant la croissance des plants de pin tordu (*Pinus contorta* var. *latifolia* Douglas), Bedford et Sutton (2000) rapportent que la majorité des traitements de préparation mécanique de terrain augmentaient significativement la croissance des plants lorsque comparée avec la croissance observée dans les parcelles témoins non traitées.

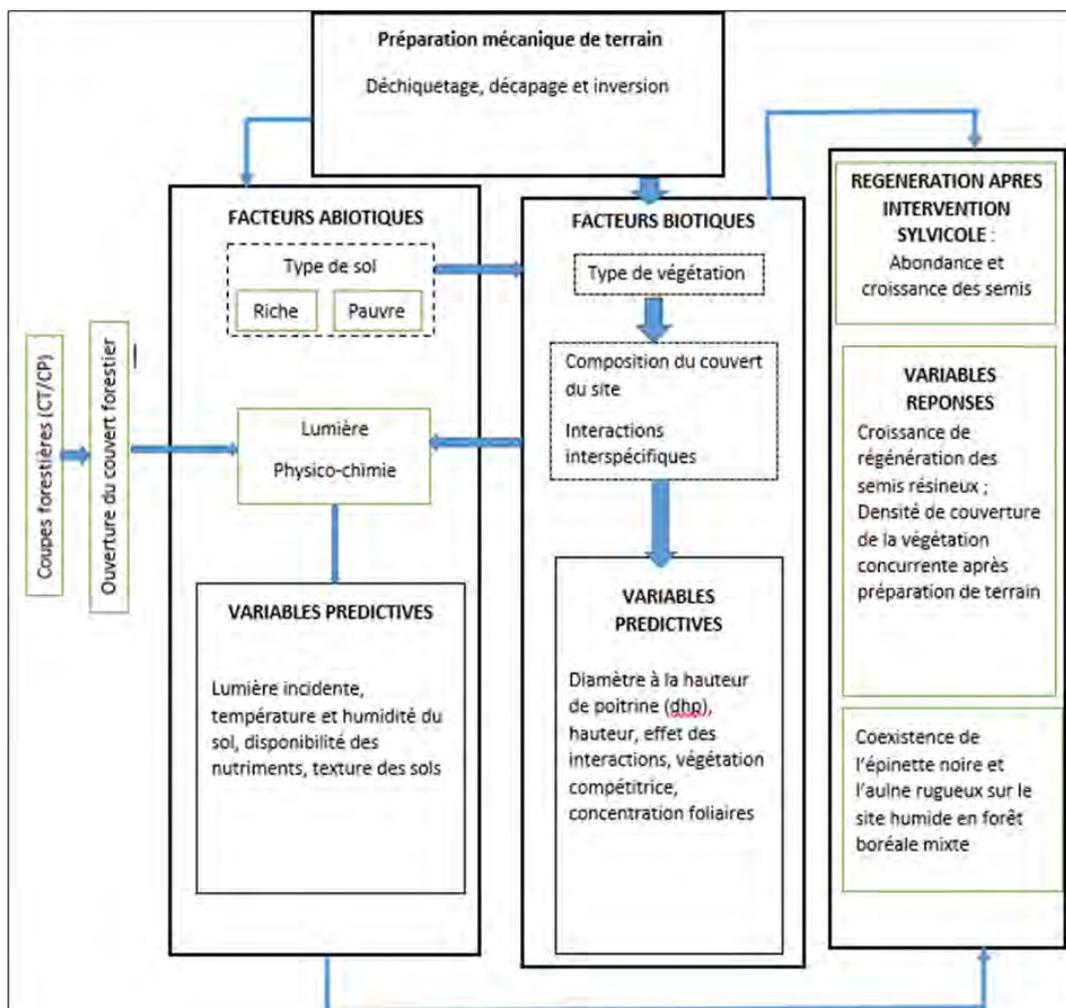


Figure 1.1 Schéma illustratif des effets de divers traitements de préparation de terrain sur la remise en production d'un site forestier post-récolte envahi par l'aulne rugueux.

Le renversement des tiges d'aulne comme technique de préparation du terrain risque de stimuler la formation de rejets et le marcottage (Jobidon, 1995). Pour y remédier, il est recommandé que la tige soit séparée de son système racinaire (Huenneke, 1985). Selon une étude réalisée au Minnesota dix ans après la coupe des peuplements d'épinette noire, Johnston (1972) soulignait qu'une préparation du terrain par scalpage à une profondeur de plus de 10 à 15 cm était nécessaire pour séparer les tiges d'aulnes rugueux de leur système racinaire. Cela permettrait ainsi de réduire sa croissance végétative, sans quoi l'établissement d'une régénération résineuse est exposé à l'échec.

Par ailleurs, les travaux tant de coupe que de préparation du terrain réalisés sur des stations propices à la venue de l'aulne (stations humides) et qui contribuent au maintien d'un faible rapport C/N, sont susceptibles de favoriser le développement rapide de l'aulne rugueux et d'autres espèces de transition, aux dépens d'une régénération forestière (Brumelis & Carleton, 1988). Une préparation du terrain qui expose le sol minéral créerait des conditions favorables à la germination de l'aulne rugueux (Von der Gonna, 1992).

Durand (1988) a réalisé une étude comparative de divers modes de préparation de terrain dans le canton d'Hébécourt en Abitibi. Celui-ci indique que l'aulne rugueux était moins abondant à la suite d'un scarifiage à dents sous-soleuses réalisées sur des argiles mal drainées, comparativement au témoin; pour les autres types écologiques étudiés (argile bien à modérément bien drainée, argile bien drainée, argile modérément bien drainée), la densité des aulnes était comparable entre les parcelles préparées et le témoin. Ainsi le choix du traitement dépend avant tout des conditions du site (déchets de coupe, végétation indésirable, sol, pente) (Jobidon, 1995).

1.3.1 Hersage et scarifiage

Depuis le début des années 1980, le hersage et le scarifiage sont devenus les pratiques de préparation de terrain les plus courantes au Canada (Von der Gonna, 1992; Prévost & Thiffault, 2013). Moins polluantes que les techniques chimiques d'un point de vue environnemental, ces méthodes de préparation du sol consistent à perturber mécaniquement la surface du sol et à détruire partiellement la végétation présente en vue de créer des microsites propices à la plantation de plants (Henneb *et al.*, 2015; Prévost, 1992). Les avantages de ces techniques, du moins en général, ne sont plus à démontrer. En effet, le hersage et le scarifiage modifient à la fois les régimes hydrique et thermique du sol tout en augmentant sa fertilité par la mise en

place de conditions adaptées à la croissance des semis (Henneb *et al.*, 2015; Prévost, 1996; Thiffault, 2016).

La mise en application du hersage ou le scarifiage est cependant conditionnée par les caractéristiques du site (débris d'exploitation forestière, végétation indésirable, sol et pente). De plus, Fryk (1986) estime que la technique choisie doit dépendre de la nature et de l'intensité des changements souhaités (Sutherland & Foreman, 2000). Vitousek et Matson (1985) suggèrent que le hersage ou le scarifiage pour éliminer la couche organique du sol forestier peut entraîner des pertes de nutriments dans le sol, au détriment des semis d'épinette noire. Néanmoins, Prévost (1997) souligne que le scarifiage, en particulier, peut compenser les déficits en éléments nutritifs causés par l'enlèvement de la couche de matière organique dans la forêt boréale du Québec par un régime thermique du sol qui améliore la croissance des semis.

1.3.2 Décapage

Depuis l'entrée en vigueur de la loi sur l'aménagement durable des forêts au Québec en 2013, le maintien de la productivité des écosystèmes est un élément essentiel de la gestion durable des forêts (Jetté *et al.*, 2013). Ceci implique la mise sur pied des stratégies adéquates d'une bonne régénération des sites exploités après des perturbations (Thiffault, 2016). Dans la plupart des documents scientifiques disponibles, le décapage ou scalpage est parfois référencé sous le nom de scarification par plateau (Chaves Cardoso *et al.*, 2020). Cette technique consiste à créer des plaques de sol minéral exposées en enlevant la couche organique de surface pour exposer le sol minéral sous-jacent (Chaves Cardoso *et al.*, 2020; Lieffers *et al.*, 2003; Prévost, 1992). L'application de cette technique de préparation mécanique de terrain expose le sol minéral et l'entraîne à des variations des températures contrairement aux sols recouverts de l'humus (Prévost, 1992).

Le sol minéral exposé par décapage se réchauffe plus vite que le sol non perturbé sous des couches organiques isolantes (Von der Gonna, 1992). Dans le cadre d'un traitement de décapage, l'augmentation de la température du sol est bénéfique (Liefers *et al.*, 2003), car les racines poussent plus rapidement dans des sols plus chauds que dans des sols plus froids (Thiffault *et al.*, 2017). Sur les parterres des coupes accidentés, où les conditions d'humidité changent rapidement de très humide à très sec, il est couramment appliqué en combinaison avec des buttes (Von der Gonna, 1992). Par ailleurs, le scalpage est plus efficace sur les sites secs, bien drainés, avec des sols à texture moyenne. Sur ces sites, ces traitements peuvent être assez profonds pour aider à contrôler la végétation concurrente, mais sans causer d'autres problèmes comme la saturation en eau ou une entrave à la croissance des racines des semis (Chaves Cardoso *et al.*, 2020).

Le décapage peut présenter un risque dans certains cas lors de la remise en production d'un site forestier (Thiffault *et al.*, 2017). En effet, il a été démontré que les fortes variations de température générées par cette technique pouvaient provoquer le dépérissement des semis par le gel (Goulet, 2000), notamment dans les sols à forte teneur en argile. De plus, il a été démontré que l'augmentation de la température dans un sol mis à nu par décapage peut réduire sa teneur en eau et provoquer un stress hydrique important pour les semis (Von der Gonna, 1992). De tels impacts ont été observés sur un site récemment récolté dans le nord-ouest du Québec, caractérisé par une épaisseur d'humus de 8 cm et une couverture de *Kalmia*, *Vaccinium spp.* et *Cladonia spp.* (Thiffault *et al.*, 2004). Néanmoins, l'expérience de plusieurs sylviculteurs soutient que dans les régions caractérisées par une forte humidité, la pratique du scalpage peut être utile en raison du faible risque de stress hydrique (Thiffault, 2016). Cependant, il ressort en outre de l'expérience de plusieurs scientifiques que le scalpage trop superficiel peut ne pas être suffisant pour contrôler la végétation si les racines concurrentes ne sont pas éliminées. De plus, dans la mesure où le scalpage est trop profond, le microsite peut se gorger d'eau, surtout sur un site humide ou pendant les périodes de pluie (Chaves Cardoso *et al.*, 2020; Örlander *et al.*, 1990; Von der Gonna, 1992).

1.3.3 Inversion

L'inversion est une technique de préparation du sol peu utilisée aujourd'hui. Elle consiste à créer un microsite en inversant le sol à l'aide d'une excavatrice (Löf *et al.*, 2012, Buitrago *et al.* 2015). Il en résulte un retournement de la couche organique de surface. Celle-ci est recouverte d'un sol minéral (chapeau de sol minéral) (Löf *et al.*, 2012; Sutton, 1993). La mise en place de cette technique permet de récupérer environ 0,5 m² de surface de sol, avec une profondeur d'environ 20 cm sous la matière organique, puis de retourner la matière dans le trou d'origine en la retournant de manière à exposer le sol minéral en surface en évitant de créer un monticule (Hallsby & Örlander, 2004, Buitrago *et al.* 2015). Dans de nombreux cas, le retournement est parfois considéré comme l'une des techniques de buttage, bien que le site de plantation ne soit normalement pas significativement surélevé (Löf *et al.*, 2012; Sutton, 1993).

L'inversion des couches des sols permet de créer le nombre souhaité de microsites par hectare et peut être effectuée à l'automne, tandis que la plantation des semis aura lieu au printemps suivant (Chaves Cardoso *et al.*, 2020). D'un point de vue écologique, l'inversion minimise la perturbation du sol en milieu forestier. En Suède, une telle technique de préparation du sol est plus appréciée, notamment pour les valeurs esthétiques et récréatives de la forêt. Elle permet en effet de conserver près de 50% du sol forestier intact (Hallsby & Örlander, 2004).

Selon Hallsby et Örlander (2004), l'inversion crée de meilleures conditions pour la croissance des racines et favorise la minéralisation des nutriments, ce qui explique la meilleure croissance des plantes observée avec cette technique de préparation du site. Les auteurs mentionnent aussi que cette technique favorise un réchauffement plus rapide du microsite au printemps, ainsi qu'un réchauffement plus profond (Salonius, 1983; Von der Gonna, 1992, Buitrago *et al.* 2015). En plus, cette technique a augmenté la croissance et la survie des semis par rapport aux tranchées à disques et aux buttes après cinq saisons de croissance dans un milieu boréal en

Scandinavie (Gastaldello *et al.*, 2007; Hallsby & Örlander, 2004; Örlander *et al.*, 1998, Buitrago *et al.* 2015).

Lorsque l'inversion est appliquée, les microsites créés sont au même niveau que le sol de la forêt. Les semis qui seront plantés seront moins sensibles au gel ou à la sécheresse que les semis plantés sur une butte. La technique de l'inversion semble favoriser la disponibilité des nutriments, tout en permettant aux semis d'être alimentés en eau. Néanmoins, jusqu'à présent, il est apparu que cette technique n'était pas suffisamment efficace pour limiter la végétation compétitive à court terme (Gastaldello *et al.*, 2007). En dépit des résultats documentés de cette technique, Örlander *et al.* (1998) pensent que la présence de sol minéral dans les microsites retarde l'établissement de la végétation compétitive autour des plantules.

Au Québec, l'utilisation de l'inversion comme technique de préparation de terrain sur certains sites peut présenter des inconvénients en raison du déchaussement dû au gel sur les semis (Bock & Van Rees, 2002). À titre d'exemple, en Ontario, le soulèvement par le gel dans les monticules d'humus inversés a été suffisamment important pour affecter la survie des semis (Bock & Van Rees, 2002; Wood & Althen, 1993).

1.3.4 Déchiquetage

Le déchiquetage comme méthode de préparation de terrain est encore peu connu dans les peuplements mixtes du Québec. Cependant, on voit apparaître des preuves de son usage dans d'autres contextes à travers le monde, notamment en Europe et au Japon (De Waal, 2001). Cette méthode consiste à détruire le matériel végétal récolté à l'aide d'un broyeur in situ (Monty, 2015). A court terme, elle permet de réduire et de maîtriser la présence d'espèces végétales invasives (Chauvel & Martinez, 2013). Le matériel broyé laissé au sol peut être utilisé comme paillis, et ainsi limiter la régénération des mauvaises herbes et l'évaporation du sol (Lanphear

& Spangler, 1996). Néanmoins, cette méthode peut entraîner des conséquences écologiques dans le cadre d'une approche écosystémique de la gestion forestière (Weber, 2011). Au Royaume-Uni, par exemple, certaines terres rurales ont été abandonnées en raison de la croissance végétative incontrôlée des matériaux déchiquetés (De Waal, 2001).

1.4 Objectifs et hypothèses

1.4.1 Objectifs général et spécifiques

L'objectif principal de cette étude était d'évaluer les effets de diverses techniques de préparation de terrain (décapage, inversion et déchiquetage) sur la restauration de la productivité forestière sur des sites humides dominés par l'aulne rugueux et reboisés en épinette noire.

Plus précisément, notre étude visait à :

- (1) Déterminer la croissance et la nutrition foliaire de plants d'épinette noire en réponse au décapage, à l'inversion, au déchiquetage et au témoin sur les sites humides envahis par l'aulne rugueux ;
- (2) Comparer les effets du décapage, l'inversion, le déchiquetage au témoin sans préparation de terrain sur l'abondance de l'aulne rugueux et l'environnement de croissance de plants d'épinette noire.

1.4.2 Hypothèses

Pour atteindre les objectifs de notre projet, les hypothèses suivantes ont été formulées :

- **H1** : Les différents traitements de préparation de terrain (décapage, inversion, déchiquetage) permettent de maîtriser la présence de la végétation concurrente et d'améliorer la croissance et la nutrition foliaire des plants d'épinette noire sur le site. En utilisant la pelle hydraulique scarificatrice pour le décapage, l'inversion et un broyeur à rouleaux pour le déchiquetage, on élimine la végétation concurrente et on améliore les conditions de température et d'humidité propices à la mobilisation des éléments nutritifs du sol en été (Sutherland & Foreman, 1995 ; Thiffault, 2016).
- **H2** : La croissance des semis d'épinette noire plantés est proportionnelle à l'ouverture du couvert. Toutefois, la concentration du N foliaire des plants est plus élevée dans les traitements moins exposés à la lumière (témoin) que dans les traitements de décapage, d'inversion et de déchiquetage, en raison de la forte abondance d'aulnes rugueux qui assurent la fixation biologique de N dans le sol (Vincent, 1964; Roy *et al.*, 2007).

CHAPITRE II

LES EFFETS DE DIVERS TRAITEMENTS SYLVICOLES SUR LA MAITRISE DE L'AULNE RUGUEUX ET LA REMISE EN PRODUCTION FORESTIÈRE EN FORÊT BORÉALE

Jonathan Kimbukusu kusa¹, Annie DesRochers¹, Nelson Thiffault^{1,2}

¹ Institut de recherche sur les forêts, Université du Québec en Abitibi-
Témiscamingue

² Centre canadien sur la fibre de bois, Ressources Naturelles Canada

2.1 Résumé

La régénération de l'épinette noire (*Picea mariana* (Mill.) BSP) dans les peuplements aménagés de la forêt boréale mixte du Québec est parfois compromise par l'aulne rugueux (*Alnus incana* subsp. *rugosa* (Du Roi) R.T. Clausen), particulièrement là où il était présent avant la coupe. L'augmentation de la lumière et l'élévation du niveau de la nappe phréatique après l'exploitation forestière créent des conditions favorables à l'invasion de l'aulne. Nous avons réalisé une expérience sur le terrain à la Forêt d'enseignement et de recherche du lac Duparquet, au Québec, dans la région de l'Abitibi-Témiscamingue, afin d'évaluer la capacité de la préparation mécanique de terrain à améliorer l'établissement des semis d'épinette noire sur un site humide envahi par l'aulne quelques années après la coupe forestière. L'expérience comprenait quatre traitements appliqués en 2019: le décapage, le déchiquetage, l'inversion et un témoin non traité. Les parcelles principales ont été plantées en 2020 avec de l'épinette noire. A la fin de la saison de croissance 2021, nous avons mesuré la croissance et la nutrition des plants, la température, l'humidité, la lumière incidente, le pH et la couverture de la végétation concurrente au sol dans chaque traitement. Nous avons également prélevé des échantillons de sol dans les parcelles d'échantillonnage principales ainsi que dans les parcelles hors-parceaux des microsites des traitements de décapage et d'inversion afin de comparer leur concentration en nutriments. Nos résultats ont révélé que les traitements présentent des effets bénéfiques sur la croissance et la taille des plants qui, en moyenne, doublent sur les sites traités (50% supérieurs). Les plants reboisés dans le traitement de déchiquetage ont eu une meilleure hauteur et leur pousse annuelle était plus longue que ceux du traitement d'inversion, alors que les plants des traitements de décapage, de déchiquetage et d'inversion ont eu un diamètre similaire. Le décapage, le déchiquetage et l'inversion ont permis de maîtriser la régénération des espèces concurrentes, à savoir les arbres, les arbustes, les aulnes et les fougères, tout en augmentant la présence des graminées, en particulier dans les traitements de décapage et d'inversion. Les conditions de

température, d'humidité, de lumière et de pH du sol par les traitements de décapage, de déchiquetage et d'inversion n'ont pas favorisé une concentration significative des nutriments au sol et dans les aiguilles des semis reboisés par rapport au témoin. Nous avons constaté que les traitements de décapage et d'inversion ont influencé de façon similaire les propriétés physico-chimiques du sol des microsites créés, ainsi que les sols des parcelles hors-placeaux. La diversité des conditions environnementales créées par le traitement d'inversion et l'amélioration significative du pH dans les sols de décapage et les sols hors-placeaux de l'inversion, ainsi que l'augmentation significative de K dans les sols hors-placeaux décapage, devraient être prises en compte par les sylviculteurs lors de la planification de projets de restauration forestière sur des sites humides. Un suivi à plus long terme est nécessaire pour mieux comprendre la contribution de l'aulne à l'apport de N dans les sites traités et pour évaluer la contribution économique des traitements dans les peuplements.

Mots clés : Préparation mécanique de terrain, décapage, déchiquetage, inversion, *Alnus rugosa*, *Picea mariana*, sylviculture, aménagement forestier

2.2 Introduction

La régénération de l'épinette noire (*Picea mariana* (Mill.) BSP) dans les peuplements aménagés de la forêt boréale mixte du Québec est parfois compromise par l'aulne rugueux (*Alnus incana* subsp. *rugosa* (Du Roi) R.T. Clausen), en particulier là où il était présent avant la coupe (Jobidon, 1995). L'augmentation de la lumière et la remontée de la nappe phréatique après l'exploitation forestière créent des conditions favorables à l'invasion de l'aulne au détriment de la régénération résineuse (Brown & Hansen, 1954; Healy & Gill, 1974). L'aulne se régénère facilement par voie végétative une fois qu'il est coupé ou endommagé par la circulation des machines (Johnston, 1968). Toutefois, Brown et Hansen (1954) rapportent une association symbiotique de l'aulne avec *Frankia* comme source de N au sol. Dans d'autres contextes, une telle association a permis de pallier le besoin de N dans les sols pauvres et dégradés de la forêt boréale (Fortin *et al.*, 1983; Roy *et al.*, 2007). Le feuillage dense de l'aulne libère une litière abondante qui améliore les propriétés physico-chimiques du sol et facilite la nutrition de l'épinette noire, dont le système racinaire est peu profond (Fortin *et al.*, 1983). Dans les tourbières boisées, l'aulne contribue à l'abaissement de la nappe phréatique (Jutras *et al.*, 2006). Puisqu'on doit remettre en production les forêts coupées, il faudrait trouver des meilleures méthodes de préparation mécanique de terrain afin de limiter la propagation de l'aulne et favoriser la croissance de l'épinette noire.

Certaines méthodes de préparation de terrain ont été testées dans la forêt boréale mixte du Québec, mais des défis demeurent. À titre d'exemple, le décapage est une pratique sylvicole qui consiste à créer des microsites de plantation en enlevant la couche organique du sol forestier (Prévost, 1992 ; Thiffault, 2016). Cette technique est parfois déconseillée car elle peut priver les microsites d'un important capital nutritif (Prévost & Thiffault, 2013). Par l'exposition du sol minéral, elle entraînerait également des variations de température contrairement aux sols recouverts d'humus (Prévost, 1992 ; Thiffault, 2016). Un sol minéral mis à nu par décapage se réchauffe plus rapidement qu'un sol non perturbé sous des couches organiques isolantes (Von

der Gonna, 1992). L'augmentation de la température du sol est bénéfique pour les semis de conifères (Lieffers et al., 2003), car les racines poussent plus rapidement dans des sols plus chauds (Thiffault *et al.*, 2017). Sur les sites en pente, où les conditions d'humidité peuvent passer rapidement de très humides à très sèches, le décapage est couramment appliqué en combinaison avec des buttes (Von der Gonna, 1992). Cependant, il a été démontré que les grands écarts de température provoquée par le décapage pouvaient entraîner le soulèvement des plants par le gel (Goulet, 2000), en particulier dans les sols à forte teneur en argile. L'efficacité de cette méthode sur un site humide reste à vérifier afin de connaître son effet sur les propriétés physico-chimiques du sol et sur la croissance des plants reboisés.

Une autre méthode de préparation de terrain consiste à créer des microsites de plantation inversés (Löf *et al.*, 2012). Avec cette technique, une couche d'humus inversée recouverte d'un sol minéral ameubli est replacée dans le trou d'origine (Sutton, 1993; Löf *et al.*, 2012). Le retournement du sol minéral sur le sol organique à une profondeur de près de 20 cm par rapport au trou d'origine permet d'exposer le sol minéral tout en évitant de créer des monticules (Hallsby & Örlander, 2004). Le fait de créer un nombre voulu de microsites permet également de minimiser la perturbation du sol (Hallsby & Örlander, 2004). Selon Hallsby et Örlander (2004), l'inversion réchauffe le sol et crée de meilleures conditions pour la croissance des racines et favorise la minéralisation des nutriments, ce qui explique la meilleure croissance des plants observée avec cette technique de préparation de terrain. Les auteurs mentionnent également que cette technique favorise un réchauffement plus rapide du microsite au printemps, ainsi qu'un réchauffement plus profond (Salonius, 1983; Von der Gonna, 1992). Cette technique a en outre permis d'augmenter la croissance et la survie des semis par rapport aux tranchées à disques et aux buttes après cinq saisons de croissance dans un environnement boréal en Scandinavie (Gastaldello *et al.*, 2007; Hallsby & Örlander, 2004; Örlander *et al.*, 1998). Le réchauffement plus rapide et plus profond du sol du microsite au printemps (Salonius, 1983; Von der Gonna, 1992) peut permettre aux épinettes plantées d'être moins sensibles au gel ou à la sécheresse. Toutefois, à ce jour, cette technique ne

s'est pas révélée suffisamment efficace pour limiter l'invasion de la végétation concurrente à long terme en forêt boréale, en raison de la banque de graines du sol qui favorise la régénération rapide de la végétation concurrente (Löf *et al.*, 2012; Prévost & Thiffaut, 2013). Le N étant un élément limitant dans les sols de la forêt boréale, l'inversion permettrait une bonne concentration des nutriments par la décomposition de la matière organique de surface enfuie dans le sol.

Le déchiquetage en tant que méthode de préparation des sites forestiers a été testé dans d'autres contextes à travers le monde, notamment en Europe et au Japon (De Waal, 2001). Cette méthode consiste à déchiqueter le matériel végétal résiduel d'un site récolté, à l'aide d'un broyeur forestier (Monty, 2015). À court terme, elle permet de réduire et de maîtriser la présence d'espèces végétales invasives (Chauvel & Martinez, 2013). Le matériel broyé laissé au sol peut être utilisé comme paillis et ainsi limiter la régénération des adventices et l'évaporation du sol (Lanphear & Spangler, 1996). Cependant, aucune littérature n'est encore disponible sur la contribution du déchiquetage à réduire l'invasion de l'aulne et d'assurer la remise en production de la forêt boréale au Québec.

Les études réalisées fournissent des preuves scientifiques solides du rôle important de la préparation mécanique de terrain dans l'amélioration des conditions environnementales des plants reboisés ainsi que de leur nutrition. Cependant, à notre connaissance, le succès d'établissement des conifères sur les sites humides de la forêt boréale reste un grand défi pour les sylviculteurs et très peu d'études ont testé l'efficacité du décapage et de l'inversion sur lesdits sites. De plus, la contribution du déchiquetage à la maîtrise de l'aulne rugueux, à la croissance des conifères et aux propriétés physico-chimiques du sol n'est pas connue. Une telle connaissance pourrait permettre de faire de meilleures recommandations pour la restauration des peuplements forestiers aménagés sur les sites humides de la forêt boréale mixte. L'objectif de cette étude était de déterminer les effets de ces techniques de préparation de terrain (décapage, inversion et déchiquetage) sur la croissance de l'épinette noire sur des sites forestiers humides dominés par l'aulne rugueux. Nous posons l'hypothèse que le décapage, l'inversion et déchiquetage

permettront de limiter la présence de la végétation concurrente et d'améliorer les conditions environnementales propices à la croissance et la nutrition foliaire des plants d'épinette noire. Sur la base de cette hypothèse, nous avons prédit que la préparation de terrain éliminerait la végétation concurrente et améliorerait les conditions de température et d'humidité propices à la décomposition et à la mobilisation des éléments nutritifs du sol. Nous avons également prédit que la croissance des semis d'épinette noire plantés serait proportionnelle à l'ouverture de la canopée. Cependant, nous nous attendions à ce que la concentration de N foliaire de l'épinette noire soit plus élevée dans le traitement de témoin qui aura une couverture élevée d'aulnes qui assurent la fixation biologique de N.

2.3 Matériel et méthodes

2.3.1 Site d'étude

Notre projet tire profit de sites envahis par l'aulne rugueux à la suite d'une coupe forestière dans la Forêt d'enseignement et de recherche du lac Duparquet (FERLD) (Fig. 2.1). L'étude est située dans la forêt boréale mixte de l'ouest du Québec, Canada, avec un climat continental froid et sec appartenant au domaine bioclimatique du bouleau blanc et du sapin (Harvey & Leduc, 1999). La zone d'étude aménagée comprend deux secteurs: un secteur ouest sur lequel la coupe totale a été appliquée dans les années 2008-2009 et un secteur à l'est sur lequel la coupe totale a été effectuée entre les années 1945-1972 (Bescond, 2002). La recherche a été réalisée à l'intérieur d'un peuplement divisé en quatre blocs ayant les mêmes caractéristiques. La zone d'étude a connu une température moyenne annuelle de 1,7 °C entre 1951 et 1980 et des précipitations moyennes annuelles de 985 mm entre 1981 et 2010 (Environnement Canada, 2019). Formés par un relief de basses terres, les sites sont recouverts de vastes milieux humides (Bergeron *et al.*, 1983). On retrouve principalement en surface des dépôts d'argiles

glaciolacustres avec des drainages mésiques à subhydriques et des dépôts organiques humides associés aux sites (Bergeron et al., 1983).

2.3.2 Plan expérimental et échantillonnage

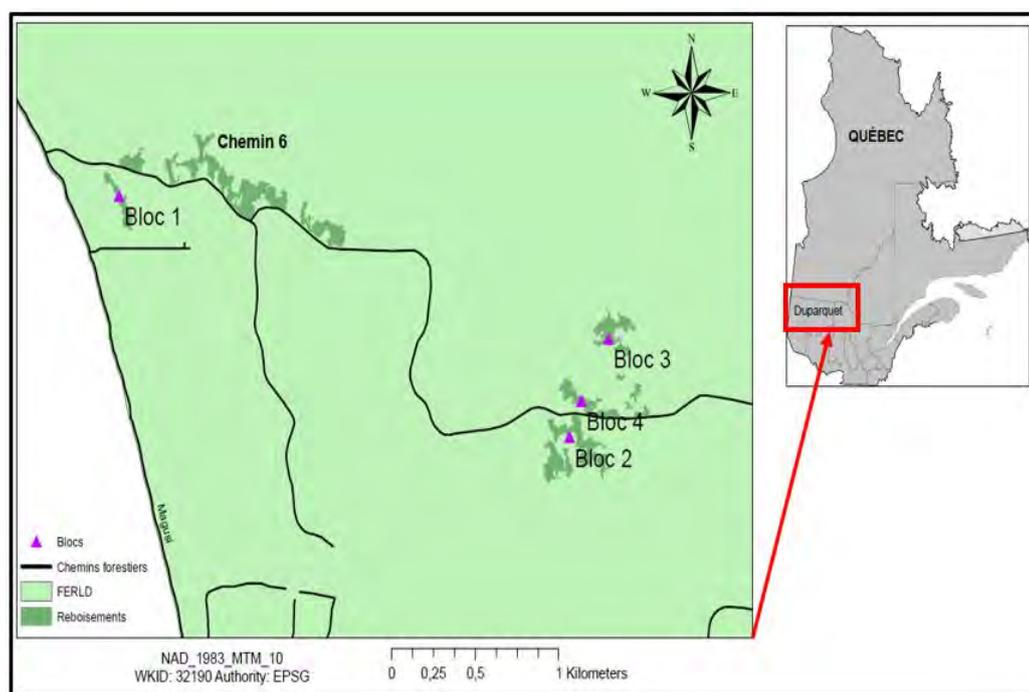


Figure 2.1. Site d'étude

Les secteurs à l'étude présentent des historiques sylvicoles différentes. En 2010, suite à une coupe totale, le secteur est a été traité par déchiquetage avant d'être reboisé en épinette noire en 2011. Après cette opération, les aulnes ont envahi le site et le succès de l'établissement des semis a été compromis. Le secteur ouest, quant à lui, est resté sans traitement ni reboisement puis envahi par les aulnes depuis la dernière coupe en 1972.

À la fin de l'automne 2019, nous avons effectué la préparation mécanique de terrain sur les quatre blocs. Le bloc 1 était situé dans le secteur est, tandis que les blocs 2, 3 et 4 se trouvaient dans le secteur ouest (Fig. 2.1). Un plan en blocs incomplets a

été mis en œuvre. Chaque bloc mesurait 50 m × 100 m, et comprenait quatre traitements: décapage, déchiquetage, inversion et un témoin non traité. L'expérience a été répétée quatre fois dans la zone d'étude (une fois par bloc). Au bloc 4, le traitement de déchiquetage a été exclu pour des raisons opérationnelles. Au total, 15 unités expérimentales (UE) étaient disponibles (Figure 2.2).

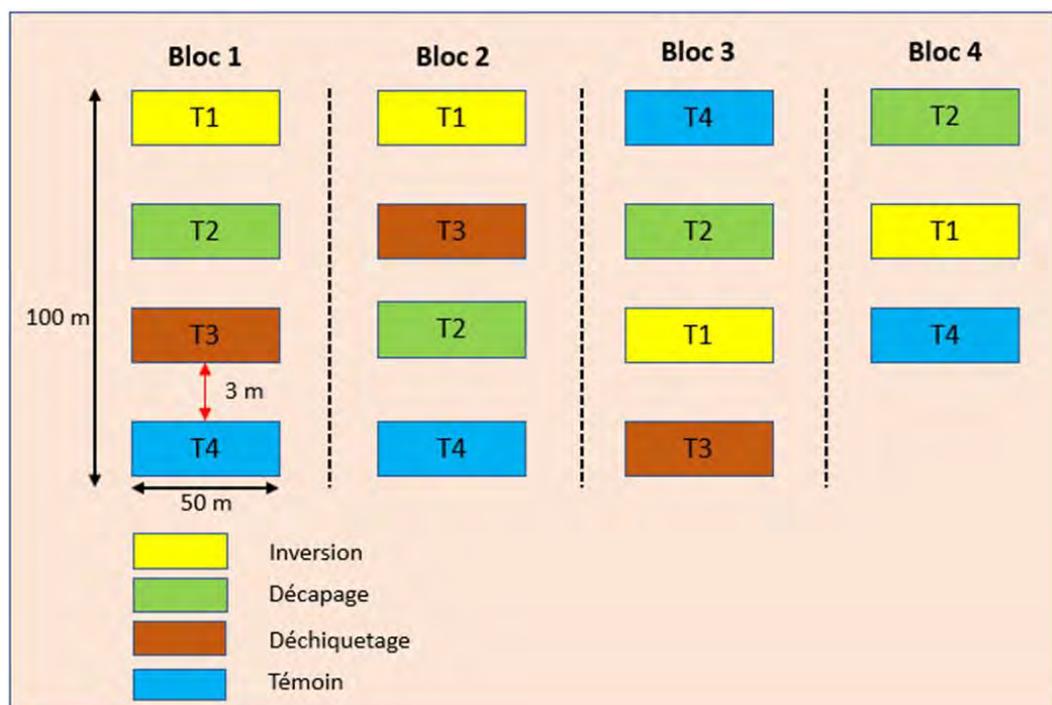


Figure 2.2 Structure des blocs et traitements

Lors des opérations de décapage et d'inversion, nous avons utilisé une pelle hydraulique (14,5 tonnes) pour créer des microsites. Le décapage a consisté à gratter la matière organique (MO) de la surface du sol minéral pour former des placeaux d'une profondeur de 15 cm, tandis que pour l'inversion, la couche de MO a été retournée à 1 m de profondeur et redéposée à la surface du placeau au même point. Au total, nous avons créé l'équivalent de 200 placeaux/ha pour le décapage et l'inversion. Chaque placeau mesurait 5 m x 3 m (15 m²) et était espacé de 3 m du placeau le plus proche. Nous avons utilisé un broyeur à rouleaux (tête Denis cimag DAH100c) pour effectuer le déchiquetage uniquement sur la végétation, et ce, en

couplant au point de contact avec le sol, la totalité des plantes occupant la parcelle. Tous les débris organiques ont été laissés à la surface du sol.

L'année suivante, à l'été 2020, nous avons reboisé les sites avec des plants d'épinette noire de forte dimension produits dans des récipients de 25 cavités de 310 cm³ chacun à partir d'une source locale de semences. Six plants d'épinette noire ont été reboisés dans les placeaux des traitements de décapage et d'inversion, à une densité équivalente à 1200 plants/ha. Dans les parcelles témoins et de déchiquetage, les semis ont été reboisés à une densité de 2500 plants/ha (Figure. 2.3).

2.3.3 Prise des données sur terrain

Au début de l'été 2021, nous avons installé cinq placettes circulaires de 100 m² (rayon de 5,64 m) par UE pour un total de 75 placettes. La configuration interne des placettes était distincte selon la méthode de préparation mécanique de terrain appliquée. Les placettes caractérisant le traitement avec placeaux (décapage et inversion) comportaient deux placeaux à l'intérieur (Figure 2.3).

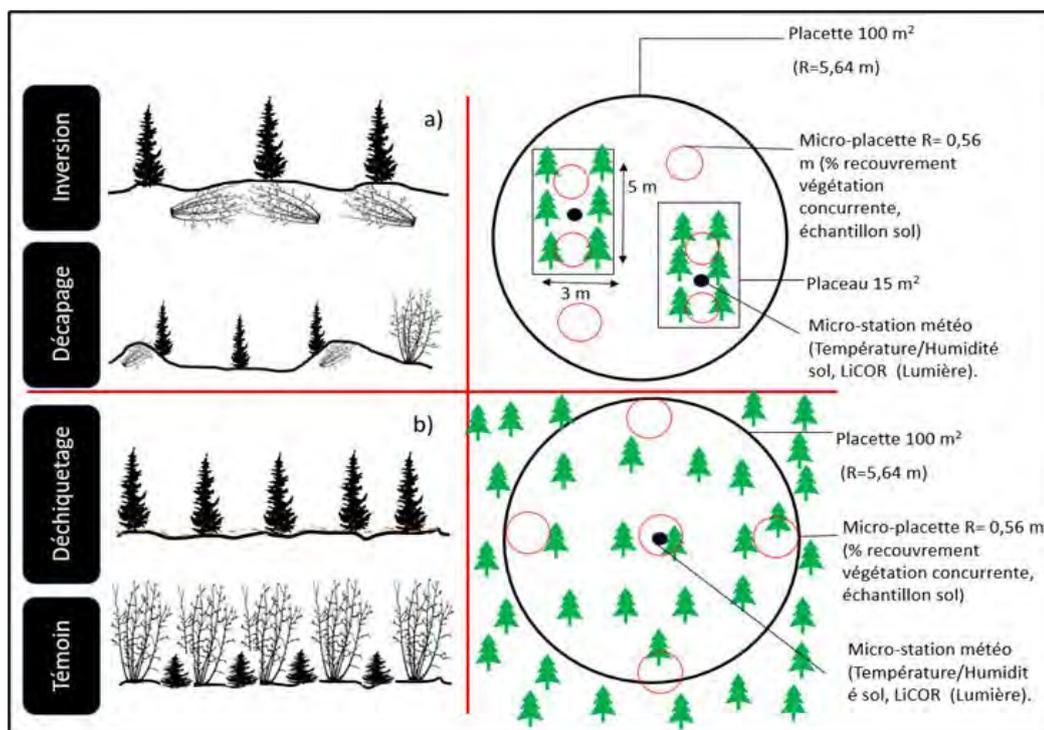


Figure 2.3 Description de la méthode de collecte des données sur terrain dans les unités expérimentales. La partie supérieure de la figure (a) illustre les traitements de décapage et d'inversion (avec placeaux). La partie inférieure de la figure (b) illustre les traitements de déchiquetage et témoin (sans placeaux)

Le 1^{er} juin 2021, nous avons installé 30 micro-stations météorologiques (WatchDog 1000 Series) dans toutes les UE (2 appareils pour chaque UE). Au sein de chaque UE, deux placettes ont été choisies pour recevoir chacune une micro-station. Chaque appareil était équipé de deux sondes : l'une mesurant la température et l'autre, l'humidité du sol. Les sondes connectées à l'appareil ont été insérées à une profondeur de 10 cm du sol pour mesurer les fluctuations de la température et de l'humidité du sol jusqu'au 28 septembre de la même année. La profondeur choisie était basée sur la zone de déploiement des racines des plants reboisés. L'humidité et la température moyennes mensuelles ont été calculées sur la base de la moyenne des enregistrements horaires.

À la fin de la saison de croissance (2021), des mesures de la hauteur (cm), du diamètre au niveau du sol (mm) et de la longueur de pousse annuelle (mm) de 390

semis vivants d'épinette noire ont été prises dans les parcelles avec placeaux (Figure 2.3). Dans les parcelles sans placeaux (déchiquetage et témoin), 248 plants vivants ont été mesurés à l'intérieur des placettes. L'ensemble des plants mesurés en été 2021 ont été étiquetés pour les études futures dans le même dispositif. Nous avons établi des micro-placettes de 1 m² (rayon de 0,56 m) à l'intérieur des placettes pour l'estimation visuelle de la couverture végétale concurrente par groupes fonctionnels et pour l'échantillonnage du sol. Nous avons évalué le recouvrement de la végétation en utilisant les classes suivantes : 0% ; 0-1% ; 1,1-5% ; 5,1-10% ; 11-20% ; 21-30% ; 31-40% ; 41-50% ; 51-60% ; 61-75% et >75%; une moyenne de deux estimations d'observateurs a été effectuée (Vanha-Majamaa *et al.*, 2000). Dans les traitements avec placeaux, nous avons installé six micro-placettes, deux à l'intérieur de chaque placeaux et espacées de 1 m. Les deux autres se trouvaient à l'extérieur des deux placeaux pour l'échantillonnage du sol (Figure 2.3). Chacune des deux micro-placettes hors-placeaux était séparée de 1 m du placeaux le plus proche. Les parcelles sans placeaux étaient composées de cinq micro-placettes pour chaque placette (Figure 2.3). Quatre micro-placettes ont été disposées aux points cardinaux et une au centre. Au total, 115 échantillons de sol ont été prélevés à une profondeur de 0-10 cm pour déterminer la concentration de N total, C total, P, K, Ca, Mg et le pH Les échantillons de sol ont été prélevés à l'aide d'une petite pelle à l'intérieur des micro-placettes installées et mélangés ensuite à la main pour former un seul échantillon composite (≥ 200 g). Les échantillons hors-placeaux de la même placette ont été mélangés ensemble et les échantillons de sol des micro-placettes situées dans les placeaux d'une même placette ont également été mélangés ensemble. 75 échantillons provenaient de nos traitements (1 échantillon par placette X 5 placettes par UE X 15 UE) et les 40 autres provenaient de sols hors-placeaux (1 échantillon par placette X 5 placettes par UE/ X 4 Blocs).

Une pousse annuelle des plants d'épinette noire a été récoltée à l'aide d'un sécateur sur les individus au sein d'une même placette, ensuite mélangées pour obtenir un échantillon composite de 10 g pour chaque placette. Au total, 75 échantillons ont été récoltés (1 échantillon par placette X 75 placettes).

A l'aide d'un photomètre (LAI-2200, LiCOR Inc., U.S.A.), nous avons mesuré l'intensité lumineuse incidente à 1 m du sol de chaque UE. Pour les traitements déchiquetage et témoin, nous avons mesuré la lumière au centre de la placette, tandis que nous avons mesuré la lumière au centre de chaque plateau des placettes appartenant aux traitements décapage et inversion. Nous avons également pris des mesures de référence correspondant à la pleine lumière dans un milieu ouvert près de chaque bloc. La lumière incidente a été calculée comme le rapport entre la lumière mesurée dans les traitements par rapport à la pleine lumière disponible.

2.3.4 Analyses de laboratoire

Les échantillons d'aiguilles et de sol ont été ramenés au laboratoire pour être conservés au frais à 2° C pendant deux semaines. Nous avons utilisé un rapport de 1:3 (sol/eau distillée) pour déterminer le pH de tous les échantillons de sol à l'aide d'un pH-mètre (Thermo Scientific ORION STAR A 211, Indonésie). Les échantillons de sol restants ont été pesés et séchés à l'étuve à 70 °C pendant 48 heures. Chaque échantillon de sol a été broyé manuellement au moyen d'un mortier et tamisé à 2 mm avant d'être analysé. La pousse annuelle récoltée a été pesée et séchée à l'étuve à 65 °C jusqu'à l'obtention d'une masse stable après 48 heures. Nous avons broyé les échantillons d'aiguilles dans un moulin Cyclone portant un maillage de 1 mm (UDY Corp., Fort Collins, Colo.). Les concentrations en N total et C total ont été analysées par combustion sèche (Vario MAX cube; Elementar, Langenselbold, Allemagne). Le P, le K, le Ca et le Mg extractibles ont été extraits dans une solution Mehlich-III et mesurés par spectrométrie d'émission optique à plasma d'argon à couplage inductif (Optima 4300 DV ; Perkin-Elmer, Norwalk, Conn.).

2.3.5 Analyses statistiques

Les analyses statistiques ont été réalisées à l'aide du logiciel R version 4.1.1 (R Development Core Team, 2013). Les analyses des effets des traitements sur les variables de hauteur, de diamètre, de longueur de pousse annuelle, de pH, de concentrations d'éléments chimiques dans les aiguilles et le sol, et d'humidité, de température, de lumière et de couverture d'espèces concurrentes ont été soumises à des analyses de modèles linéaires mixtes à l'aide de la fonction lme de la librairie lme4 (Bates *et al.*, 2014). Le bloc (répétition) a été considéré comme un effet aléatoire; les traitements de préparation de terrain ont été considérés comme des effets fixes.

Les hypothèses du modèle ont été testées en suivant les conditions d'homogénéité et de normalité de la variance à l'aide d'une approche graphique. Les hypothèses du modèle ont été respectées sans transformation des données. Un seuil α de 0,05 a été utilisé pour identifier les effets significatifs. Les comparaisons entre les traitements ont été effectuées par des tests de comparaison des moyennes en utilisant le test de Tukey (Multcomp). Le package emmeans de R a été utilisé comme méthode post hoc pour effectuer des comparaisons par paire lorsqu'un effet significatif a été trouvé pour une variable (Lenth *et al.*, 2018). Une analyse en composante principale (ACP) a été réalisée pour visualiser les liens entre les variables hauteur, diamètre, pousse annuelle des plants reboisés et les variables environnementales de ceux-ci dans les traitements, notamment, les nutriments foliaires, les nutriments du sol, la lumière, la température, l'humidité et le pH du sol dans chaque traitement reboisé. Nous avons utilisé la fonction ACP de la librairie FactoMineR en utilisant des matrices de corrélation (Lê *et al.*, 2008). Les parcelles hors-placeaux n'ont pas été incluses dans l'ACP, n'ayant pas été reboisées.

2.4 Résultats

2.4.1 Hauteur, diamètre et pousse annuelle

Tous les traitements ont eu un effet bénéfique sur la hauteur des semis par rapport au témoin (Figure 2.4; Tableau A.1). La hauteur des épinettes était supérieure dans les parcelles traitées par déchiquetage que dans l'inversion, tandis que les plants dans le traitement décapage avaient une hauteur intermédiaire. La longueur moyenne de la pousse annuelle était supérieure dans les traitements décapage, déchiquetage et inversion par rapport au témoin (Figure 2.4). La longueur de pousse annuelle des plants du traitement déchiquetage était significativement supérieure lorsque comparée à l'inversion. Le diamètre moyen des plants d'épinette noire était similaire entre les traitements décapage, déchiquetage et inversion et plus grand que dans le témoin (Figure 2.4).

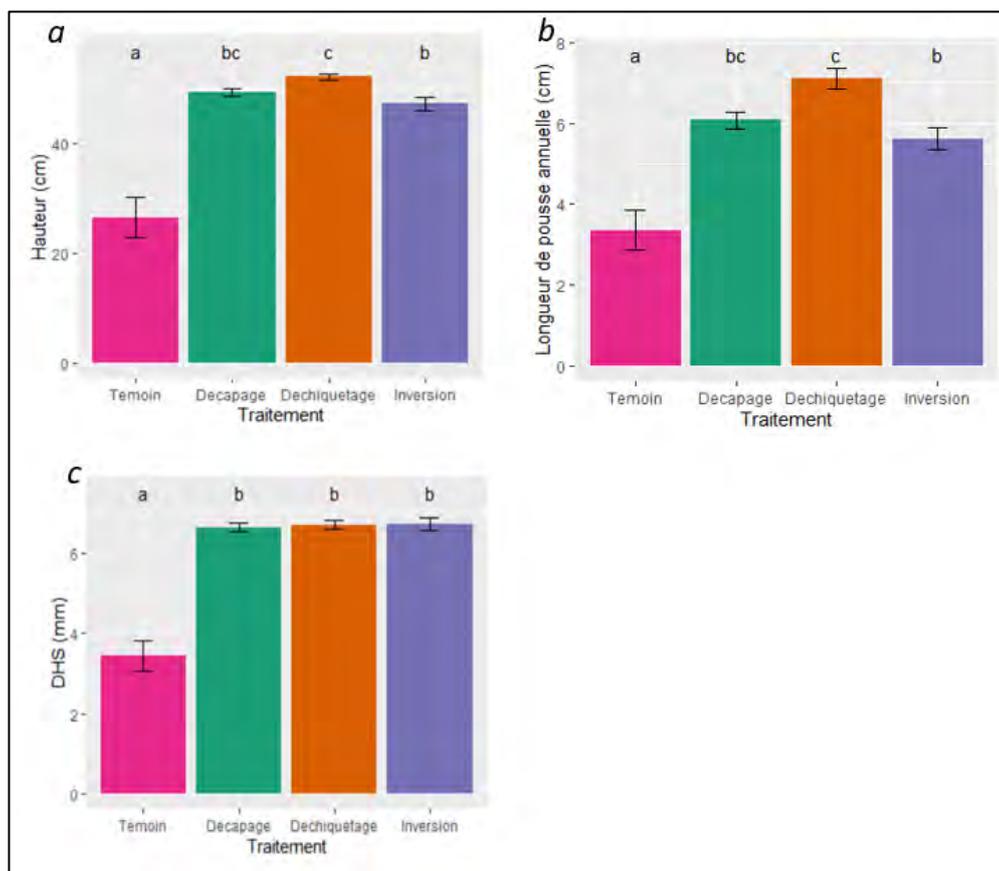


Figure 2.4 Hauteur (a), longueur de la pousse annuelle (b) et diamètre au niveau du sol (c) des plants d'épinette noire en fonction des traitements de préparation de terrain. Les barres surmontées de lettres différentes sont significativement différentes au seuil de $p \leq 0.05$. Les données sont présentées sous la forme de moyenne \pm erreur type DHS= Diamètre à hauteur du sol.

2.4.2 Végétation concurrente

Deux ans après l'application de la préparation mécanique de terrain, la couverture des groupes d'espèces présentes dans l'environnement immédiat des plants d'épinette noire était constituée de graminées, d'arbustes, d'arbres, d'aulnes et de fougères. Les traitements de préparation mécanique de terrain ont significativement réduit la couverture des aulnes, des arbres, des arbustes et des fougères, mais ont augmenté la présence des graminées, en particulier dans les traitements de décapage et d'inversion. Dans les traitements témoin et déchiquetage, la couverture d'arbres

était plus élevée que dans les traitements de décapage et d'inversion, qui présentaient des valeurs de couverture significativement plus faibles. Comparé aux plantes présentes dans les traitements de préparation mécanique de terrain, l'environnement des plants reboisés dans le traitement témoin était caractérisé par un taux significativement élevé de groupes d'espèces concurrentes (Figure 2.5).

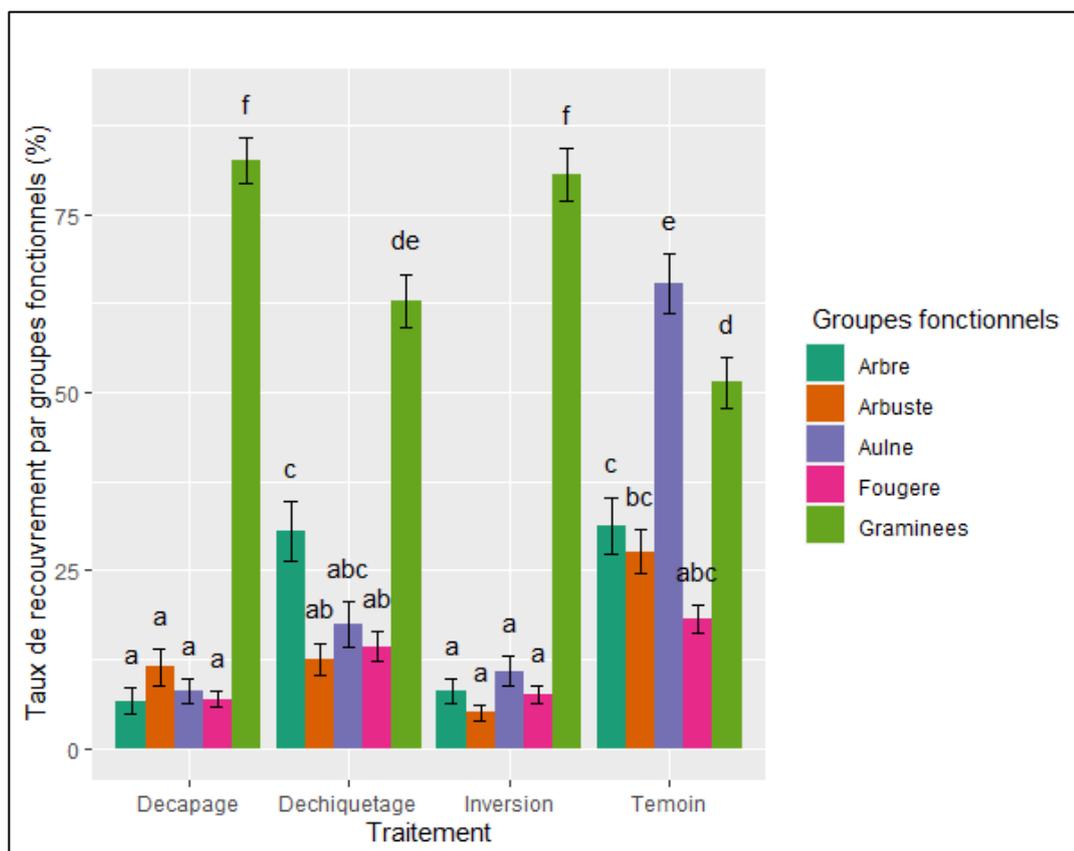


Figure 2.5 Taux de recouvrement par groupes fonctionnels de plante par traitement de préparation de terrain. Les barres surmontées de lettres différentes sont significativement différentes au seuil de $p \leq 0.05$. Les données sont présentées sous la forme de moyenne \pm erreur type

2.4.3 Concentrations en éléments nutritifs dans le sol et dans les aiguilles

Deux ans après l'application des traitements, des différences significatives dans les propriétés chimiques du sol ont été constatées entre les traitements. Dans l'ensemble, les méthodes de préparation de terrain appliquées n'ont pas entraîné de différences dans le N, le C et le P du sol, alors qu'elles ont entraîné des différences significatives dans le K, le Ca, le Mg et le pH du sol (Tableau 2.1). La concentration de K dans le sol a augmenté de manière significative dans les parcelles soumises à l'inversion et dans les parcelles hors-placeaux du traitement de décapage par rapport au témoin, tandis que dans les traitements de décapage, de déchiquetage et parcelles hors-placeaux du traitement inversion, les valeurs de K étaient intermédiaires. En outre, le traitement par inversion a entraîné une augmentation significative du Ca dans le sol par rapport au décapage, tandis que les parcelles de décapage, de déchiquetage, des parcelles hors-placeaux du traitement d'inversion et du témoin présentaient des valeurs intermédiaires. Le traitement d'inversion a également augmenté de manière significative le Mg du sol par rapport au témoin, tandis que les parcelles de décapage (dans et hors-placeaux), de déchiquetage et des parcelles hors-placeaux du traitement d'inversion présentaient des valeurs de Mg intermédiaires. La méthode d'inversion a augmenté le pH du sol par rapport aux parcelles hors-placeaux du traitement de décapage, des parcelles de déchiquetage et de témoin, tandis que dans les parcelles de décapage et les parcelles hors-placeaux d'inversion le pH du sol était intermédiaire et légèrement plus bas par rapport à l'inversion. Les analyses statistiques ont indiqué que les traitements de décapage et d'inversion ont influencé significativement les propriétés chimiques du sol d'une manière similaire à celle des parcelles hors-placeaux.

Tableau 2.1 Concentration en éléments nutritifs (en g/kg-1) et pH du sol (moyenne \pm erreur standard) par traitement de préparation de terrain

| Traitements | Ntot | Ctot | P | K | Ca | Mg | pH |
|--------------------|-----------------------|--------------------------|------------------------|-------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| Décapage | 5,76 ($\pm 0,95$) a | 86,99 ($\pm 16,78$) a | 0,01 ($\pm 0,002$) a | 0,16 ($\pm 0,01$) ab | 2,24 ($\pm 0,19$) a | 0,46 ($\pm 0,57$) ab | 5,78 ($\pm 0,23$) bc |
| HP_Décap | 6,54 ($\pm 1,37$) a | 95,33 ($\pm 23,30$) a | 0,02 ($\pm 0,003$) a | 0,18 ($\pm 0,01$) b | 2,42 ($\pm 0,24$) ab | 0,50 ($\pm 0,06$) ab | 5,02 ($\pm 0,17$) ab |
| Déchiquetage | 6,30 ($\pm 1,44$) a | 94,65 ($\pm 22,12$) a | 0,02 ($\pm 0,002$) a | 0,15 ($\pm 0,007$) ab | 2,49 ($\pm 0,36$) ab | 0,40 ($\pm 0,04$) ab | 5,17 ($\pm 0,20$) ab |
| Inversion | 3,45 ($\pm 1,37$) a | 54,66 ($\pm 12,61$) a | 0,01 ($\pm 0,002$) a | 0,17 ($\pm 0,01$) b | 4,49 ($\pm 0,75$) b | 0,60 ($\pm 0,05$) b | 6,17 ($\pm 0,22$) c |
| HP_Inv | 6,23 ($\pm 1,12$) a | 100,77 ($\pm 22,21$) a | 0,02 ($\pm 0,003$) a | 0,16 ($\pm 0,009$) ab | 3,70 ($\pm 0,83$) ab | 0,48 ($\pm 0,04$) ab | 5,75 ($\pm 0,19$) bc |
| Témoin | 8,00 ($\pm 1,57$) a | 124,09 ($\pm 25,79$) a | 0,02 ($\pm 0,003$) a | 0,12 ($\pm 0,01$) a | 2,67 ($\pm 0,61$) ab | 0,36 ($\pm 0,04$) a | 4,80 ($\pm 0,15$) a |
| Valeur de P | 0,146 | 0,267 | 0,161 | 0,008 | <0,05 | <0,05 | <0,001 |

Note : Pour une variable réponse donnée, des lettres différentes représentent des différences significatives entre les traitements selon le test de Tukey. HP_Décap = Hors-placeau décapage, HP_Inv = Hors-placeau inversion

La comparaison des nutriments foliaires des semis d'épinette noire a montré des différences significatives entre les traitements. Les aiguilles avaient une concentration en N plus élevée dans les traitements de déchiquetage comparativement à l'inversion, tandis que les semis reboisés dans les traitements de décapage et de témoin avaient des concentrations intermédiaires (Tableau 2.2). Les traitements n'ont toutefois pas montré de différences significatives dans la concentration en C, P, K, Ca et Mg dans les aiguilles des semis reboisés.

Tableau 2.2 Concentrations foliaires en éléments nutritifs des épinettes noires (en g /kg-1) moyenne \pm erreur standard) par traitement de préparation de terrain.

| Traitements | Ntot | Ctot | P | K | Ca | Mg |
|--------------|-------------------------|-------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| Décapage | 13,20 ($\pm 0,61$) ab | 490,74 ($\pm 1,64$) a | 1,68 ($\pm 0,07$) a | 1,24 ($\pm 0,24$) a | 3,73 ($\pm 0,29$) a | 1,01 ($\pm 0,03$) a |
| Déchiquetage | 14,89 ($\pm 1,04$) b | 487,76 ($\pm 2,81$) a | 1,73 ($\pm 0,07$) a | 1,00 ($\pm 0,04$) a | 4,48 ($\pm 0,21$) a | 1,00 ($\pm 0,04$) a |
| Inversion | 12,91 ($\pm 0,66$) a | 486,76 ($\pm 0,07$) a | 1,82 ($\pm 0,10$) a | 2,24 ($\pm 0,54$) a | 3,90 ($\pm 0,37$) a | 1,04 ($\pm 0,06$) a |
| Témoin | 12,94 ($\pm 0,61$) ab | 490,33 ($\pm 3,85$) a | 1,53 ($\pm 0,12$) a | 0,96 ($\pm 0,09$) a | 3,93 ($\pm 1,17$) a | 0,96 ($\pm 0,09$) a |
| Valeur de P | <0,05 | 0,333 | 0,329 | 0,329 | 0,14 | 0,334 |

Note : Pour une variable réponse donnée, des lettres différentes représentent des différences significatives entre les traitements selon le test de Tukey.

2.4.4 Relations entre les variables nutritionnelles des traitements au sol et foliaires et les variables hauteur, diamètre et pousse annuelle de l'épinette noire.

Globalement, l'ACP a expliqué 34% de la variance dans les données le long d'un gradient de fertilité (Figure. 2.6). Nous avons observé une forte relation positive entre la hauteur et le diamètre des plants avec le pH du sol et le carbone du sol dans les traitements inversion, décapage et déchiquetage. Contrairement au décapage et l'inversion, la croissance des plants n'était pas associée à la disponibilité de lumière dans le traitement déchiquetage. La hauteur et diamètre des plants n'était pas associée à la température du sol. L'humidité au sol était positivement associée à la mobilisation du N et la croissance de la pousse annuelle des semis dans l'ensemble des traitements. Nous avons trouvé que la concentration foliaire en N, P, Ca et Mg des plants était fortement associée au traitement de déchiquetage comparé aux traitements décapage, inversion et témoin. Nous avons trouvé que les conditions environnementales du traitement témoin étaient moins variées et n'avaient pas favorisé le développement des plants en hauteur et en diamètre. La superposition des ellipses des traitements décapage, déchiquetage et d'inversion, par rapport au témoin sur les deux axes de la figure, indique une similarité des conditions entre les traitements. Parmi les quatre traitements, l'ellipse de l'inversion est plus grande et plus déployée que celles des traitements décapage, déchiquetage et témoin. Ainsi, l'inversion offrirait des conditions plus variables à l'établissement des conifères et à la remise en production des peuplements aménagés sur les sites humides.

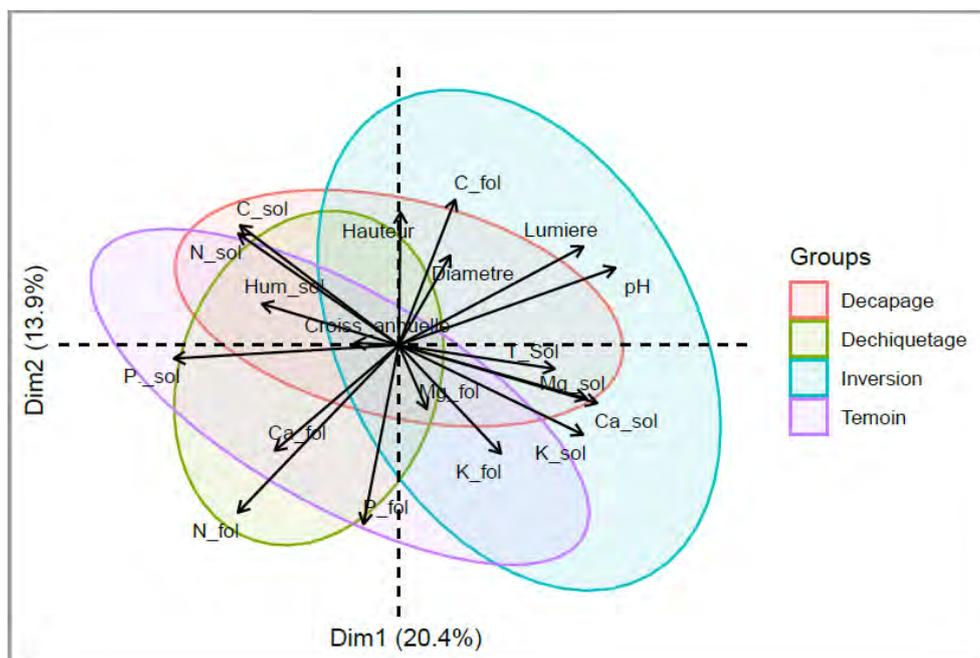


Figure 2.6. Analyse en composantes principales représentant les relations entre les variables explicatives dans les traitements de préparation de terrain. Les paramètres physico-chimiques du sol, les concentrations foliaires ont été incluses dans l'analyse en tant que variables explicatives. Ca_fol = calcium foliaire, Ca_sol = calcium du sol, P_fol = phosphore foliaire, P_sol = phosphore du sol, N_sol = azote du sol, N_Fol = azote foliaire K_fol= potassium foliaire, K_sol= potassium sol, Mg_sol= magnésium du sol, Mg_fol= magnésium foliaire, C_sol= carbone sol, C_fol= carbone foliaire, T_sol= température sol, Hum_sol= humidité sol, Lumière= lumière incidente, Hauteur= hauteur plants, Diamètre= diamètre plants, Croiss_annuelle= longueur de pousse annuelle.

2.4.5 Réponses des variables environnementales (Température du sol, humidité du sol et lumière incidente) en fonction des traitements de préparation de terrain.

L'inversion et le déchiquetage ont augmenté la température du sol par rapport au décapage et témoin plus froids (Tableau 2.3). Néanmoins, l'inversion a résulté en une température du sol plus élevée que le déchiquetage ($p < 0.001$) (Tableau 2.3). Les traitements décapage et déchiquetage ont augmenté l'humidité du sol comparé à l'inversion et au témoin ($p < 0.001$) (Tableau 2.3; Figures A.1; A.2). Les traitements ont eu un effet significatif sur la disponibilité de la lumière mesurée à 1 m du sol. Les plants reboisés dans les traitements décapage et inversion recevaient davantage de lumière que les plants dans les traitements témoin et déchiquetage ($p < 0.001$)

Tableau 2.3 Moyennes mensuelles pour la période de juin-septembre 2021 de la température et de l'humidité du sol par traitement de préparation.

| <i>Traitement</i> | Humidité sol (%) | Température sol (° C) |
|--------------------|-----------------------|-----------------------|
| Témoin | 34,3 ($\pm 0,17$) a | 15,5 ($\pm 0,05$) a |
| Décapage | 46,4 ($\pm 0,23$) c | 15,3 ($\pm 0,09$) a |
| Déchiquetage | 42,2 ($\pm 0,22$) b | 16,1 ($\pm 0,02$) b |
| Inversion | 33,4 ($\pm 0,16$) a | 17,7 ($\pm 0,04$) c |
| Valeur de P | <0,001 | <0,001 |

Note : Pour une variable réponse donnée, des lettres différentes représentent des différences significatives entre les traitements selon le test de Tukey.

Tableau 2.4 Pourcentage moyen de lumière incidente à 1 m de hauteur des traitements

| <i>Traitement</i> | <i>Lumière incidente (%)</i> |
|--------------------|------------------------------|
| Témoin | 15 ($\pm 2,48$) a |
| Décapage | 61 ($\pm 2,09$) b |
| Déchiquetage | 21 ($\pm 1,41$) a |
| Inversion | 59 ($\pm 2,93$) b |
| <i>Valeur de P</i> | <0,001 |

Note : Des lettres différentes représentent des différences significatives entre les traitements selon le test de Tukey.

2.5 Discussion

Nos résultats montrent que la préparation mécanique du terrain a significativement augmenté la hauteur, la longueur de la pousse annuelle et le diamètre des plants reboisés par rapport à ceux reboisés dans des parcelles non traitées (témoin). Toutefois, nos résultats ont montré que les plants reboisés dans le traitement déchiquetage ont mieux poussé en hauteur que les plants reboisés dans l'inversion.

La meilleure réponse du traitement par déchiquetage sur la hauteur et la longueur de la pousse annuelle peut s'expliquer par une maîtrise plus efficace de la végétation graminée au sol par rapport au décapage et l'inversion. En effet, la couche de matière organique laissée au sol lors du déchiquetage semble avoir agi comme une barrière, retardant la régénération rapide des arbres, arbustes, aulnes, fougères, et surtout, de graminées en concurrence pour les nutriments au cours de l'été. En raison de leur réseau dense de rhizomes, les graminées exercent une forte concurrence sur les nutriments dans les jeunes peuplements de conifères, au détriment de la croissance de l'épinette noire (Landhäusser & Lieffers, 1998; Chomel *et al.* 2020). Ainsi, comme les premières années de plantation des semis de l'épinette noire sont cruciales pour leur établissement, une faible couverture de graminées dans les parcelles de déchiquetage aurait permis aux racines peu profondes de l'épinette noire de mieux absorber les nutriments disponibles. Une autre explication possible est que le réchauffement du sol et la disponibilité plus élevée de l'eau ont permis une bonne mobilisation des nutriments du sol et un meilleur développement des plants. La température plus élevée dans la zone racinaire a probablement augmenté la disponibilité des nutriments (De Barba *et al.* 2015), des sucres et des hormones, y compris les cytokinines, qui stimulent le débourrement végétatif (Sachs & Thimann, 1967; Bronson *et al.* 2009).

Les résultats obtenus pour le sol et les aiguilles sont apparemment incohérents. L'analyse chimique des échantillons de sol n'a révélé aucune différence entre les traitements de décapage, de déchiquetage, d'inversion et témoin sur les

concentrations de N dans le sol, tandis que la concentration de N dans les aiguilles s'est avérée plus élevée dans le traitement de déchiquetage que dans le traitement d'inversion et similaire aux traitements de décapage et témoin. Ceci suggère un effet positif du déchiquetage sur la nutrition en N des jeunes épinettes noires dans les sols humides de la forêt boréale en été. Par leur dispersion superficielle, les racines de l'épinette noire ont probablement rapidement absorbé le N provenant de la décomposition de la matière organique des aulnes et d'autres plantes laissées au-dessus du sol.

Le traitement par inversion a réchauffé, asséché et augmenté le pH du sol, ce qui constitue des conditions favorables à la décomposition de la matière organique et à la nutrition de l'épinette noire (Von der Gonna, 1992). Un autre facteur pouvant expliquer la petite taille des semis dans le traitement inversion par rapport au traitement déchiquetage est la faible capacité des racines des plants reboisés à utiliser les éléments minéraux disponibles au sol. La profondeur de 1 m à laquelle la matière organique a été enfouie n'a peut-être pas permis aux racines des plants reboisés d'absorber les nutriments rendus disponibles par sa décomposition. Ceci s'est traduit par une faible relation entre la hauteur et le N du sol dans l'ACP (Figure 2.6). En outre, nous avons constaté que tous les traitements ont amélioré de manière similaire le diamètre des semis par rapport au témoin, quel que soit le niveau d'exposition à la lumière. Un tel résultat peut s'expliquer par le fait que les traitements ont permis de mieux maîtriser quatre autres groupes d'espèces concurrentes (arbres, arbustes, aulnes et fougères). En effet, le diamètre des arbres est très sensible à la présence de compétiteurs (Jobidon, 2000 ; Thiffault *et al.* 2014).

Alors que le décapage est reconnu comme pouvant potentiellement réduire la disponibilité des éléments nutritifs du sol (Prévost & Thiffault, 2013), nous avons constaté une amélioration significative des propriétés chimiques du sol à la suite du décapage, tout comme dans toutes les parcelles traitées, ainsi que dans les parcelles hors-placeaux des traitements de décapage et d'inversion. En effet, malgré le fait que le décapage et les autres traitements appliqués n'ont pas entraîné de différences

au niveau de N, C et P, ces traitements ont eu des effets significatifs sur disponibilité de K, Ca, Mg, ainsi que le pH du sol. Nos analyses statistiques ont également indiqué que les traitements de décapage et d'inversion ont influencé de manière significative les propriétés chimiques du sol de la même manière que leurs parcelles hors-placeaux. Une explication de ces résultats serait l'augmentation de l'eau du sol dans le traitement de décapage; La fonte de la neige pourrait avoir transporté des nutriments vers les microsites de décapage, améliorant ainsi la fertilité et le pH du sol, ce qui a profité aux plants reboisés. En effet, nous avons observé une relation étroite entre l'humidité du sol et la disponibilité de N dans la zone de décapage (Figure 2.6). Avec la méthode d'inversion, l'acidité du sol a été réduite de manière significative par rapport aux traitements par déchiquetage, au témoin et aux parcelles hors-placeaux du décapage. De plus, l'inversion a augmenté de manière significative le K, le Ca et le Mg du sol par rapport au témoin, tandis que la concentration de Ca dans l'inversion était plus élevée que dans le décapage. Ces résultats seraient liés à un réchauffement significatif du sol. Le retournement de la couche organique de surface a probablement créé de meilleures conditions pour la croissance des racines, favorisé la mobilisation des nutriments et amélioré les propriétés physico-chimiques du sol, ce qui explique la large ellipse du traitement par inversion dans l'ACP (Figure 2.6). Le retournement d'un sol minéral sur un sol organique au même endroit a favorisé un réchauffement plus rapide du microsite en été, ainsi qu'un réchauffement plus profond, rendant les éléments nutritifs disponibles (Salonius, 1983 ; Von der Gonna, 1992).

Alors que les nutriments N, C, P étaient significativement bas dans le sol de tous les traitements reboisés, le traitement de déchiquetage a montré une augmentation significative de la réponse N foliaire par rapport au traitement témoin.

L'augmentation de N dans les aiguilles dans les traitements de déchiquetage, contrairement au sol peut être due à la dilution (Imo & Timmer, 1998). Une plus grande quantité de N a été absorbée par les sujets produisant des pousses annuelles plus longues comme le montre la relation entre N dans le sol et la longueur des pousses annuelles des semis d'épinette reboisés dans les traitements de

déchiquetage et de décapage (Figure 2.6). Une autre explication possible est la faible couverture de graminées dans le traitement de déchiquetage par rapport à l'inversion et au décapage. Les plants reboisés dans le traitement de déchiquetage ont été épargnés d'une forte concurrence pour les nutriments causée par les rhizomes des graminées et ont profité pour absorber rapidement le N mobilisé au sol par les débris organiques et les individus d'aulnes vivants. Bien que l'inversion a montré une augmentation significative de K, Ca et Mg dans le sol par rapport au témoin et une concentration élevée de Ca par rapport au décapage, l'analyse de la concentration foliaire n'a pas montré de différence significative dans les aiguilles de tous les traitements appliqués en ce qui concerne le K, Ca et Mg. Un tel résultat serait lié au flux de masse. Il s'agit du principal processus par lequel les plantes absorbent le K, le Ca et le Mg (McGonigle & Grant, 2015), de sorte qu'une faible absorption peut refléter un faible flux d'eau à travers les tiges des plants (McGonigle & Grant, 2015). Ceci est cohérent avec la teneur en eau plus faible observée dans le traitement par inversion. En outre, les conditions de sol plus humides et plus chaudes dans le traitement de déchiquetage auraient contribué à une plus grande absorption du N par les plants d'épinette noire reboisés.

Ces connaissances sont intéressantes car elles montrent que la préparation mécanique de terrain a la capacité de rendre les sites forestiers productifs dans les sites humides. Un suivi à plus long terme est nécessaire pour déterminer si les interactions entre l'aulne et l'épinette noire reboisé se maintiennent. L'acquisition de données à long terme serait également nécessaire pour comparer les traitements d'un point de vue rentabilité économique.

CHAPITRE III

CONCLUSION GÉNÉRALE

Face aux défis écologiques auxquels est confrontée la forêt boréale, la préparation mécanique de terrain est l'un des moyens proposés pour assurer la remise en production des forêts aménagées. Les travaux de préparation mécanique de terrain favorisent l'établissement de la régénération, minimisent le risque d'envahissement par des espèces concurrentes et améliorent diverses caractéristiques du sol.

Le maintien de la composition et de la productivité des forêts boréales mixtes après leur exploitation constitue un défi écologique et économique majeur. Dans le contexte des forêts humides envahies par l'aulne rugueux, le développement de pratiques sylvicoles qui assurent la restauration de la productivité forestière et le succès de l'établissement dans les peuplements aménagés représente un défi particulier pour les gestionnaires forestiers. Les résultats de cette étude ont permis de déterminer les effets à court terme de traitements de préparation mécanique de terrain sur la croissance de semis d'épinette noire et leur nutrition foliaire. De plus, elle a démontré la contribution des variables (lumière, température, humidité et pH) qui expliquent le mieux la croissance de l'épinette noire et la maîtrise de la végétation concurrente après la préparation mécanique de terrain dans un contexte de forêt aménagée sur des sites boréaux humides.

La présente étude a montré que les traitements présentent des effets bénéfiques sur la croissance et la taille des plants qui, en moyenne, doublent sur les sites traités. Aucun traitement ne parvient vraiment à contrôler les graminées et cela, même si ces dernières sont jugées comme de sévères compétiteurs pour les plants d'épinette noire. Parmi les préparations de terrain, le déchiquetage a présenté un léger avantage à courts termes (plus d'N foliaire, plus de K, Ca et Mg dans les sols) mais cet avantage risque de s'estomper à moyen terme car les aulnes semblaient revenir plus facilement après ce traitement.

En bref, la remise en production des sites humides à vocation forestière envahis par l'aulne continue de poser plusieurs défis à l'aménagiste. Dans certaines situations, la perte de vocation forestière pourrait être causée par un changement permanent des conditions de drainage du site (e.g. la construction d'un chemin). Dans ce cas, il risque d'y avoir peu de méthodes de remise en production sans qu'il y ait un rétablissement des voies de drainage existantes avant coupe. Par contre, si le site apparaît restaurable par traitement sylvicole, le contrôle régulier des graminées et des aulnes apparaît une solution à privilégier mais coûteuse.

3.1 Limites de l'étude

Nos résultats ont mis en évidence l'importance de la préparation mécanique de terrain comme option sylvicole pour restaurer la production dans les forêts humides dominées par l'aulne rugueux. Tous les traitements de préparation mécanique de terrain ont amélioré la croissance des semis et leurs conditions environnementales. En plus d'améliorer les conditions de fertilité du sol, les traitements de préparation mécanique de terrain ont eu une influence positive sur la composition chimique des sols situés à proximité des microsites créés par la machinerie (sols hors-placeaux). Les mesures effectuées à l'échelle des plants reboisés ont permis de distinguer les effets positifs des traitements sur leur croissance. Toutefois, le manque de données de survie nous a empêché d'avoir une idée plus générale de l'établissement des plants reboisés par traitement et par hectare. De plus, les dimensions initiales de chacun des plants n'ont pas été mesurées dans le contexte de cette étude, ce qui empêche de calculer la croissance.

Dans un projet de reboisement, la connaissance des espèces environnant les semis dans un peuplement aménagé est un moyen efficace de limiter la compétition et de favoriser les interactions bénéfiques (e.g. facilitation). Pour cette étude, les espèces concurrentes ont été regroupées dans des groupes fonctionnels, ce qui ne permet pas de distinguer précisément les espèces concurrentes et ainsi déterminer leur

niveau d'agressivité sur les plants d'épinette noire et les ressources nutritives au sol.

3.2 Futures études

La remise en production des sites forestiers humides au Québec demeure encore aujourd'hui un défi pour les sylviculteurs. Bien que la préparation mécanique de terrain se soit avérée une bonne option pour rétablir la production dans certains contextes québécois, le choix des méthodes pour assurer la survie de l'épinette noire et la productivité des sites aménagés en milieu humide continue de faire l'objet d'un questionnement de la part de plusieurs chercheurs en foresterie. En effet, des recherches approfondies doivent être menées sur la survie des plants reboisés à moyen et à long terme pour chaque traitement de préparation mécanique de terrain et par hectare. Sont-ils bénéfiques pour l'amélioration de la productivité des plantations forestières ? Et quel traitement doit-on privilégier lors de la plantation d'arbres sur des sites humides ? Quel traitement est source de profit économique et de séquestration de carbone à long terme ?

La question de savoir si la maîtrise de la végétation concurrente sera maintenue à long terme pour favoriser la meilleure croissance des semis reboisés reste une préoccupation. Quoique la préparation mécanique de terrain ait réduit la végétation concurrente, le taux de couverture des graminées en particulier était très élevé par rapport à d'autres groupes d'espèces. Ainsi, cela pourrait impacter très négativement sur la survie et la croissance des plants reboisés.

3.3 Implications sylvicoles

Au Québec, la remise en production des sites forestiers improductifs est un défi majeur (Gauthier *et al.*, 2008). Les peuplements aménagés dont la régénération ou l'établissement n'est pas rapide après la récolte peuvent être vite envahis par l'aulne rugueux (Buse, 1992), surtout dans les sites humides où il était présent dans la communauté arbustive du sous-étage avant la récolte (Harvey & Bergeron, 1989). Bien que la hauteur, le diamètre et la longueur de pousse annuelle des plants reboisés dans les sites traités par déchiquetage à court terme semblent satisfaisants, le scénario à long terme risquerait d'être négatif. La propagation végétative a été documentée comme un mode de régénération de l'aulne rugueux (Johnston, 1968). Par conséquent, la végétation déchiquetée, y compris l'aulne au moment de la préparation mécanique de terrain, est susceptible de se régénérer très rapidement au fil du temps, entraînant des dommages à la régénération de l'épinette noire en cours de croissance, comme cela a été observé dans d'autres contextes forestiers à travers le monde (De Waal, 2001; Weber, 2011). Après sept ans, les tiges d'aulne atteignent la maturité, deviennent des arbustes et sont capables de se reproduire par graines (Brown & Hansen, 1954). Cette observation suggère que les sylviculteurs ne devraient pas recourir au déchiquetage sur de grandes surfaces (Viereck & Johnston, 1990; Michalet *et al.*, 2008). De plus, un recours à ce traitement pourrait entraîner des coûts financiers énormes pour l'entretien à long terme de la forêt.

Le décapage et l'inversion ont eu des effets bénéfiques similaires sur la hauteur, sur la longueur de pousse annuelle et sur le diamètre des semis reboisés d'épinette noire au cours des deux années qui ont suivi la préparation mécanique de terrain. En outre, nos résultats ont montré que les méthodes de décapage et d'inversion influençaient positivement la composition chimique du sol d'une manière similaire à celle des sols hors-placeaux proches de l'inversion et du décapage. Alors que Prescott *et al.* ont observé en 2000 que le décapage appauvrissait le sol dans la forêt boréale en minéraux, nous avons constaté une amélioration de la chimie du sol et une réponse positive de la croissance des semis reboisés dans le traitement de décapage. D'autre

part, malgré que les plants reboisés avaient moins bien poussés en hauteur et en longueur de pousse annuelle comparé aux semis du traitement déchiquetage, le traitement d'inversion présentait dans l'ACP une variété des conditions favorables à la meilleure croissance des semis d'épinette noire (Figure 2.6). Ainsi, ces observations suggèrent que les sylviculteurs devraient considérer le décapage et l'inversion comme des méthodes de préparation mécanique de terrain, efficaces pour stimuler la remise en production des sites humides après l'exploitation forestière dans la forêt boréale mixte. Les conditions des sols hors-placeaux des traitements de décapage et d'inversion étant améliorées par les traitements de décapage et d'inversion, leur prise en compte lors des opérations de reboisement sur les sites humides de la forêt boréale mixte seraient un moyen efficace d'augmenter le volume de bois par hectare dans les peuplements aménagés. L'augmentation significative des graminées dans tous les traitements mérite une attention particulière de la part des sylviculteurs. La gestion de la végétation concurrente pourrait être un moyen efficace de limiter l'abondance des graminées dans les parcelles reboisées.

Dans un contexte d'aménagement écosystémique des peuplements mixtes de sites humides, où l'envahissement par l'aulne rugueux constitue un enjeu économique et écologique après la récolte du bois, la préparation mécanique de terrain par décapage et inversion est un moyen efficace de rétablir la production à court terme. Dès les deux premières années de plantation de l'épinette noire, ces méthodes de préparation mécanique du terrain créent des microsites favorables à la croissance et à l'établissement des plants reboisés. De plus, elles augmentent le potentiel ligneux des sites reboisés à l'hectare. Des recherches à long terme pourraient être nécessaires pour identifier les traitements (décapage, inversion, déchiquetage) qui assureraient le mieux la maîtrise de la végétation concurrente et la remise en production des sites humides en d'épinette noire

ANNEXE A

Tableau A.1 Variables hauteur, pousse annuelle, diamètre des plants d'épinette noire en fonction des traitements de préparation de terrain après 1 an de reboisement (2021).

| <i>Traitements</i> | Hauteur | Pousse annuelle | DHS |
|---------------------|----------------------|---------------------|---------------------|
| <i>Décapage</i> | 49,40 ($\pm 0,74$) | 6,07 ($\pm 0,20$) | 6,62 ($\pm 0,10$) |
| <i>Déchiquetage</i> | 52,20 ($\pm 0,61$) | 7,09 ($\pm 0,26$) | 6,69 ($\pm 0,10$) |
| <i>Inversion</i> | 47,40 ($\pm 1,22$) | 5,61 ($\pm 0,27$) | 6,71 ($\pm 0,14$) |
| <i>Témoin</i> | 26,58 ($\pm 3,61$) | 3,34 ($\pm 0,49$) | 3,43 ($\pm 0,38$) |
| Valeur de P | <0,001 | 0,001 | 0,001 |

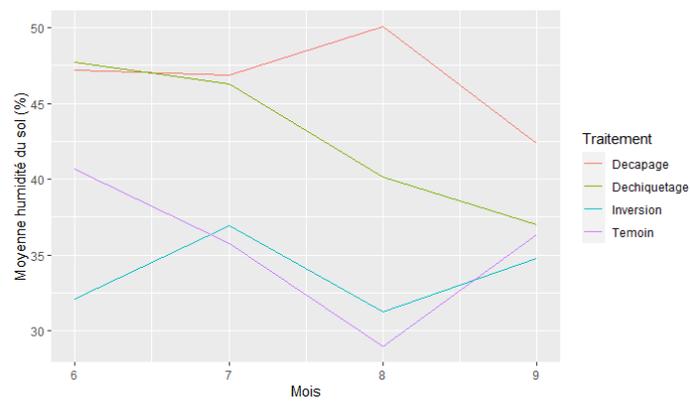


Figure A.1 Changement d'humidité du sol en fonction du temps par traitement de de préparation de terrain (année 2021).

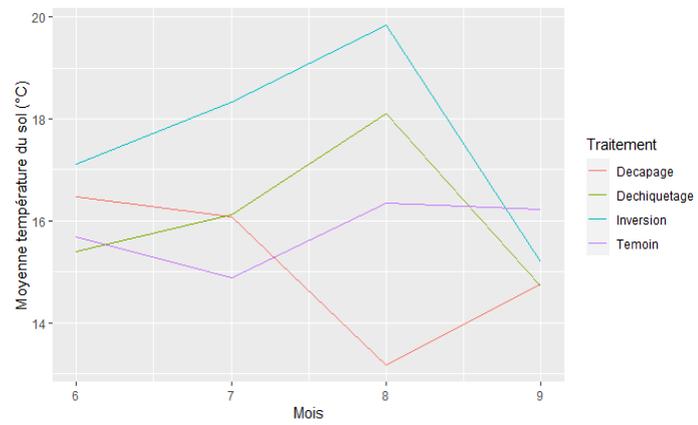


Figure A.2 Changement de température du sol en fonction du temps par traitement de préparation de terrain (année 2021)

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Amthor, J. S. (1995). Terrestrial higher-plant response to increasing atmospheric [CO₂]. Dans relation to the global carbon cycle. *Global Change Biology*, 1(4), 243-274.
- Andrianarisoa, H. S. (2009). Minéralisation de l'azote et nitrification dans les écosystèmes forestiers: Effet du type de sol et de l'essence forestière. Diss. Université Henri Poincaré-Nancy 1. 7 p.
- Bassett, I., Holmes, R. & MacKay, K. (1961). Phenology of several plant species at Ottawa, Ontario, and an examination of the influence of air temperatures. *Canadian Journal of Plant Science*, 41(3), 643-652.
- Bates, D., Mächler, M., Bolker, B. & Walker, S. (2014). Fitting linear mixed-effects models using lme4. arXiv preprint arXiv:1406.5823.
- Bedford, L. & Sutton, R. (2000). Site preparation for establishing lodgepole pine in the sub-boreal spruce zone of interior British Columbia: The Bednesti trial, 10-year results. *Forest Ecology and Management*, 126(2), 227-238.
- Bergeron, Y. & A. Bouchard, P. Gangloff et C. Camiré. (1983). La classification écologique des milieux forestiers d'une partie des cantons d'Hébécourt et de Roquemaure. *Études écologiques no.9*, Université Laval, Québec. 169 p.
- Bescond, H. (2002). Reconstitution de l'historique de l'exploitation forestière sur le territoire de la forêt d'enseignement et de recherche du Lac Duparquet au cours du 20^e siècle et influence sur l'évolution des peuplements forestiers. Mémoire M.Sc. en biologie. Université du Québec à Montréal, Montréal.
- Blouin, J., Berger, J.-P. & Gosselin, J. (2002). Guide de reconnaissance des types écologiques: région écologique 5a plaine de l'Abitibi. Ministère des Ressources Naturelles, Direction des Inventaires Forestiers, Québec. 52 p.

- Bock, M. D. & Van Rees, K. C. (2002). Mechanical site preparation impacts on soil properties and vegetation communities in the Northwest Territories. *Canadian Journal of Forest Research*, 32(8), 1381-1392.
- Boily, J. & Doucet, R. (1993). Croissance juvénile de marcottes d'épinette noire en régénération après récolte du couvert dominant. *Canadian Journal of Forest Research*, 23(7), 1396-1401.
- Bonan, G. B. & Cleve, K. V. (1992). Soil temperature, nitrogen mineralization, and carbon source–sink relationships in boreal forests. *Canadian Journal of Forest Research*, 22(5), 629-639.
- Bradshaw, C. J., Warkentin, I. G. & Sodhi, N. S. (2009). Urgent preservation of boreal carbon stocks and biodiversity. *Trends dans Ecology & Evolution*, 24(10), 541-548.
- Brandt, J. P. (2009). The extent of the North American boreal zone. *Environmental Reviews*, 17(NA), 101-161.
- Brandt, J. P., Flannigan, M., Maynard, D., Thompson, I. & Volney, W. (2013). An introduction to Canada's boreal zone: ecosystem processes, health, sustainability, and environmental issues. *Environmental Reviews*, 21(4), 207-226.
- Brassard, B.W.; Han, Y.H.C. (2010) *Dynamique de Structure et de Composition des Peuplements en Forêt Boréale Mixte: Implications Pour L'aménagement Forestier*, 3rd ed.; Réseau de Gestion Durable des Forêts: Alberta, AB, Canada. p. 21.
- Bronson DR, Gower ST, Tanner M & Van Herk I. (2009). Effect of ecosystem warming on boreal black spruce bud burst and shoot growth. *Global Change Biology*, 15: 1534-1543.
- Brown, B. A. & Hansen, H. L. (1954). Some observations of speckled alder regeneration and growth habits. *Minnesota Forestry Notes* 2: 1-2.

- Brumelis, G. & Carleton, T. (1988). The vegetation of postlogged black spruce lowlands in central Canada. I. Trees and tall shrubs. *Canadian Journal of Forest Research*, 18(11), 1470-1478.
- Brumelis, G. et Carleton, T. (1989). The vegetation of post-logged black spruce lowlands in central Canada. II. Understorey vegetation. *Journal of Applied Ecology*, 321-339.
- Buitrago, M., Paquette, A., Thiffault, N., Bélanger, N., & Messier, C. (2015). Early performance of planted hybrid larch: effects of mechanical site preparation and planting depth. *New Forests*, 46, 319-337.
- Burton, P. J., Bergeron, Y., Bogdanski, B. E., Juday, G. P., Kuuluvainen, T., McAfee, B. J. & Hantula, J. (2010). Sustainability of boreal forests and forestry in a changing environment (Vol. 25, pp. 249-282). IUFRO (International Union of Forestry Research Organizations) Secretariat.
- Burton, P. J., Messier, C., Smith, D. W., Adamowicz, W.L. (2003). Towards sustainable management of the boreal forest. NRC Research Press.
- Buse, L. J. (1992). Critical silvics of selected crop and competitor species in northwestern Ontario. Ontario Ministry of Natural Resources. Northwestern Ontario Forest Technology Development Unit, Thunder Bay, ON. 144 p.
- Buse, L. J., & Baker, W. D. (1990). Stock handling guidelines for northwestern Ontario: To grow or not to grow, you can make the difference. NWOFTDU technical report No. 47.
- Buse, L. & Le Blanc, P. (1990). Preliminary site quality keys for estimating productivity on black spruce and jack pine sites in northwestern Ontario. AJ Willcocks, WD Baker, L. Sumi and W. Carmean (compilers and eds.), tools for Site Specific Silviculture in Northwestern Ontario, Tech. Workshop Rep. 3: 31-45.

- Chatarpaul, L. & Carlisle, A. (1983). Nitrogen fixation: a biotechnological opportunity for Canadian forestry. *The Forestry Chronicle*, 59(5), 249-259.
- Chaves Cardoso, J., Burton, P., Elkin, C. M. (2020). A disturbance ecology perspective on silvicultural site preparation. *Forests*, 11(12), 1278.
- Chen, H.Y. & Popadiouk, R.V. (2002). Dynamics of North American boreal mixedwoods. *Environ. Rev.* 10, 137–16.
- Chen, H. Y., Bergeron, Y., Kenkel, C.N., Leduc, A.L., & Macdonald., E, S. (2014). Boreal mixedwood stand dynamics: ecological processes underlying multiple pathways. *The Forestry Chronicle*. 90(02): 202-213.
- Chauvel, B., Martinez, Q. (2013). Allergie à l'Ambroise: quels moyens pour empêcher l'invasion? *Revue Française d'Allergologie*. 53(3) :229-234.
- Chomel, M., Baldy, V., Guittonny, M., Greff, S., DesRochers, A. (2020). Litter leachates have stronger impact than leaf litter on *Folsomia candida* fitness. *Soil Biol. Biochem.* 147, 107850.
- Cleve, K. V., Oechel, W. C. & Hom, J. L. (1990). Response of black spruce (*Picea mariana*) ecosystems to soil temperature modification in interior Alaska. *Canadian Journal of Forest Research*, 20(9), 1530-1535.
- Cornet, A. (1997). Restauration des écosystèmes et des agrosystèmes: lutte contre la désertification et environnement. Dans les Fonds pour l'Environnement Mondial et la Lutte contre la Désertification. Montpellier: ORSTOM, 18 p. Daly, G. T. (1966). Nitrogen fixation by nodulated *Alnus rugosa*. *Canadian Journal of Botany*, 44(12), 1607-1621.
- De Barba D, Rossi S, Deslauriers A & Morin H. (2015). Effects of soil warming and nitrogen foliar applications on bud burst of black spruce. *Trees*, 30: 87-97.

- DeLuca, T., Nilsson, M. C., & Zackrisson, O. (2002). Nitrogen mineralization and phenol accumulation along a fire chronosequence in northern Sweden. *Oecologia*, 133(2), 206-214.
- De Waal, L.C. (2001). A viability study of *Fallopia japonica* stem tissue. *Weed Res* 41 (5):447-460.
- Doucet, R. (1988). La régénération préétablie dans les peuplements forestiers naturels au Québec. *The Forestry Chronicle*, 64(2), 116-120.
- Drever, C. R., Peterson, G., Messier, C., Bergeron, Y. et Flannigan, M. (2006). Can forest management based on natural disturbances maintain ecological resilience? *Canadian Journal of Forest Research*, 36(9), 2285-2299.
- Dunn, A. L., Barford, C. C., Wofsy, S. C., Goulden, M. L., & Daube, B. C. (2007). A long-term record of carbon exchange in a boreal black spruce forest: Means, responses to interannual variability, and decadal trends. *Global change biology*, 13(3), 577-590.
- Durand F, Bergeron Y, Harvey B (1988). Effets de la préparation de terrain sur le type et l'abondance des espèces végétales compétitrices dans le canton d'Hébécourt, Abitibi. Rapport de recherche 4, Université du Québec à Montréal, Montréal, 87 p.
- Dussart, E. et Payette, S. (2002). Ecological impact of clear-cutting on black spruce-moss forests in southern Québec. *Ecoscience*, 9(4), 533-543.
- Environnement Canada. (2019). Données des stations pour le calcul des normales climatiques au Canada de 1981 à 2010. 2021. https://climat.meteo.gc.ca/climate_normals/results_1981_2010_f.html?stnID=5988&autofwd=1. (Consulté le 18 avril 2021).
- FAO. 2016. State of the world's forest. Rome, Italy

- Fortin, Chatarpaul, L. et Carlisle, A. (1983). The role of nitrogen fixation in intensive forestry in Canada. Canadian Forestry Service, Petawawa National Forestry Institute, Chalk River, Ontario. Information Report PI-X-28. 91 p.
- Fryk, J. (1986). Adapted site preparation in Sweden Forskningsstiftelsen. Skogsarbeten. Res 5.
- Furlow, J. J. (1979). The systematics of the American species of *Alnus* (Betulaceae). *Rhodora*, 81(825), 1-121.
- Gastaldello, P., Ruel, J.-C. & Paré, D. (2007). Micro-variations in yellow birch (*Betula alleghaniensis*) growth conditions after patch scarification. *Forest Ecology and Management*, 238(1-3), 244-248.
- Gauthier, S., Vaillancourt, M.-A., Kneeshaw, D., Drapeau, P., De Grandpré, L., Claveau, Y. & Paré, D. (2008). Aménagement écosystémique en forêt boréale. Presses de l'Université du Québec, Québec, Canada. 4-525.
- Gilbert, H. & Payette, S. (1982). Écologie des populations d'aulne vert (*Alnus crispa* (Ait.) Pursh) à la limite des forêts, Québec nordique. *Géographie Physique et Quaternaire*, 36(1-2), 109-124.
- Girona, M. M., Morin, H., Gauthier, S., & Bergeron, Y. (2023). Boreal Forests in the Face of Climate Change: Sustainable Management (p. 837). Springer Nature.
- Goulet, F. (2000). Frost heaving of planted tree seedlings in the boreal forest of Northern Sweden. Swedish University of Agricultural Sciences, Department of Silviculture. Reports. 45. Umea, Sweden.
- Grondin, P. & Cimon, A. (2003). Les enjeux de biodiversité relatifs à la composition forestière. Gouvernement du Québec, Ministère des Ressources naturelles, de la Faune et des Parcs, Québec, Canada. Direction de la recherche forestière.2021. [http:// www. mrnfp. gov. qc. ca/forets/connaissances/recherche](http://www.mrnfp.gouv.qc.ca/forets/connaissances/recherche). (Consulté le 20 mai2021).

- Grondin, P., Gauthier, S., Borcard, D., Bergeron, Y. & Noël, J. (2014). A new approach to ecological land classification for the Canadian boreal forest that integrates disturbances. *Landscape Ecology*, 29: 1-16.
- Groot, A. (1995). Silvicultural systems for Black Spruce ecosystems. Dans: Bamsey, C.R. (Ed.), proceedings of the IUFRO symposium on innovative silviculture systems in boreal forests, 2-8 October 1994, Edmonton, Alberta, Canada. Natural Resources Canada. Canadian forest service, pp. 47-51.
- Groot, A., Lussier, J.-M., Mitchell, A. & MacIsaac, D. (2005). A silvicultural systems perspective on changing Canadian forestry practices. *The Forestry Chronicle*, 81(1), 50-55.
- Hallsby, G. & Örlander, G. (2004). A comparison of mounding and inverting to establish Norway spruce on podzolic soils in Sweden. *Forestry*, 77(2), 107-117.
- Harvey, B., & Leduc, A. (1999). Plan Général d'Aménagement-Forêt d'Enseignement et de Recherche du Lac Duparquet (1998–2023). Groupe de Recherche en Écologie Forestière, Université du Québec à Montréal (UQAM) et Unité de recherche et de développement forestier de l'Abitibi-Témiscamingue (UQAT): Québec, Québec, Canada, 153.
- Harvey, B. & Brais, S. (2002). Effects of mechanized careful logging on natural regeneration and vegetation competition in the southeastern Canadian boreal forest. *Canadian Journal of Forest Research*, 32(4), 653-666.
- Healy, W. & Gill, J. (1974). Alders. Dans: Shrubs and vines for northeastern wildlife. Gill, J.D. & Healy, W.M. (éds). Forest Service, United States. Department of Agriculture. Technical Report. NE-9: 6-9.
- Heinrich, B. (1976). Flowering phenologies: bog, woodland, and disturbed habitats. *Ecology*, 57(5), 890-899.

- Heinselman, M. L. (1981). Fire and succession in the conifer forests of northern North America. In *Forest succession*. Springer, New York, NY. (pp. 374-405).
- Henneb, M., Valeria, O., Fenton, N. J., Thiffault, N. & Bergeron, Y. (2015). Mechanical site preparation: Key to microsite creation success on Clay Belt paludified sites. *The Forestry Chronicle*, 91(2), 187-196.
- Holling, C. S. (1973). Resilience and stability of ecological systems. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 4(1), 1-23.
- Huenneke, L. F. (1985). Spatial distribution of genetic individuals in thickets of *Alnus incana ssp. rugosa*, a clonal shrub. *American Journal of Botany*, 72(1), 152-158.
- Hurd, T., Raynal, D. & Schwintzer, C. (2001). Symbiotic N₂ fixation of *Alnus incana ssp. rugosa* in shrub wetlands of the Adirondack Mountains, New York, USA. *Oecologia*, 126(1), 94- 103.
- Imo M, Timmer VR (1998) Vector competition analysis: a new approach for evaluating vegetation control methods in young black spruce plantations. *Canadian journal of soil science*, 78:3–15.
- Jerabkova, L., Prescott, C. E. & Kishchuk, B. E. (2006). Nitrogen availability in soil and forest floor of contrasting types of boreal mixedwood forests. *Canadian Journal of Forest Research*, 36(1), 112-122.
- Jetté, J.-P., Leblanc, M., Bouchard, M., Déry, S. & Villeneuve, N. (2012). Intégration des enjeux écologiques dans les plans d'aménagement forestier intégré. Partie I - Analyse des enjeux, version 1.1. Gouvernement du Québec, ministère des ressources naturelles et de la Faune, Direction de l'Aménagement et de l'Environnement forestiers. 159 p.
- Jobidon, R. (1990). Short-term effect of three mechanical site preparation methods on species diversity. *Tree Planters' Notes*, 41(4), 39-42.

- Jobidon, R. (1995). Autécologie de quelques espèces de compétition d'importance pour la régénération forestière au Québec: revue de littérature. Mémoire de recherche forestière 117. Ministère des Ressources Naturelles du Québec, Sainte-Foy. 8-15 pp.
- Jobidon, R. (2000). Density-dependent effects of northern hardwood competition on selected environmental resources and young white spruce (*Picea glauca*) plantation growth, mineral nutrition, and stand structural development – a 5-year study. *For. Ecol. Manage.* 130: 77–97.
- Johnston, W. F. (1968). Lowland brush in clearcut spruce swamps develops from residual vegetation—not from invasion. *Journal of Forestry*, 66(7), 566-567.
- Johnston, W.F. (1972). Seeding black spruce on brushy lowland successful if vegetation density kept low. Research note NC-139. St. Paul, Minnesota: Forest Service, United States. Department of Agriculture. North Central Forest Experiment Station. 4 p.
- Jones, A., Stolbovoy, V., Tarnocai, C., Broll, G., Spaargaren, O., Montanarella, L. (Eds.). (2010). Soil Atlas of the Northern Circumpolar Region. European Commission, Office for Official Publications of the European Communities, Luxembourg. 142 p.
- Jutras, S., Hökkä, H., Bégin, J. & Plamondon, A. P. (2006). Beneficial influence of plant neighbours on tree growth in drained forested peatlands: a case study. *Canadian Journal of Forest Research*, 36(9), 2341-2350.
- Keenan, R. J. & Kimmins, J. (1993). The ecological effects of clear-cutting. *Environmental Reviews*, 1(2), 121-144.
- Knighton, M. D. (1981). Growth response of speckled alder and willow to depth of flooding (vol. 198) North Central Forest Experiment Station, Forest Service, United States. Department of Agriculture. St. Paul, Minnesota, 2-6.

- Lafleur, B., Harvey, B. D. & Mazerolle, M. J. (2019). Partial cutting in mixedwood stands: Effects of treatment configuration and intensity on stand structure, regeneration, and tree mortality. *Journal of Sustainable Forestry*, 38(3), 275-291.
- Lafleur, B., Paré, D., Fenton, N. J. & Bergeron, Y. (2010). Do harvest methods and soil type impact the regeneration and growth of black spruce stands in northwestern Quebec? *Canadian Journal of Forest Research*, 40(9), 1843-1851.
- Lafleur, B., Paré, D., Fenton, N. J. et Bergeron, Y. (2011). Growth and nutrition of black spruce seedlings in response to disruption of Pleurozium and Sphagnum moss carpets in boreal forested peatlands. *Plant and soil*, 345(1), 141-153.
- Landhäusser, S.M. et Lieffers V.J. 1998. Growth of *Populus tremuloides* in association with *Calamagrostis canadensis*. *Canadian Journal of Forest Research*, 28: 396-401.
- Lanphear FO, Spangler RL (1996) Weed control in roadside plantings: progress report. Joint Highway Research Project, Indiana Department of Transportation and Purdue University, West Lafayette.
- Lazaruk, L. W., Macdonald, S. E. & Kernaghan, G. (2008). The effect of mechanical site preparation on *ectomycorrhizae* of planted white spruce seedlings in conifer-dominated boreal mixedwood forest. *Canadian Journal of Forest Research*, 38(7), 2072-2079.
- Lê, S., Josse, J., & Husson, F. (2008). FactoMineR: an R package for multivariate analysis. *Journal of Statistical Software*, 25, 1-18.
- Lenth, R., Singmann, H., Love, J., Buerkner, P., Herve, M., 2018. Emmeans: estimated marginal means, aka least-squares means. R Package Version 1, 3.
- Lieffers, V.J., Messier, C., Burton, P.J., Ruel, J.C., Grover, B.E. (2003). Nature-based silviculture for sustaining a variety of boreal forest values. In: Burton, P.J., Messier, C., Smith, D.W., Ada-mowicz, W.L. (Eds.), *towards sustainable management of the Boreal Forest*. N.R.C. Press, Ottawa, Canada, pp. 481–530.

- Lieffers, V. J., Macdonald, S. E. & Hogg, E. H. (1993). Ecology of and control strategies for *Calamagrostis canadensis* in boreal forest sites. *Canadian Journal of Forest Research*, 23(10), 2070-2077.
- Liu, Z., & Yang, J. (2014). Quantifying ecological drivers of ecosystem productivity of the early- successional boreal *Larix gmelinii* forest. *Ecosphere*, 5(7), 1-16.
- Löf, M., Dey, D. C., Navarro, R. M. & Jacobs, D. F. (2012). Mechanical site preparation for forest restoration. *New Forests*, 43(5-6), 825-848.
- Lupi, C., Morin, H., Deslauriers, A., Rossi, S. & Houle, D. (2013). Role of soil nitrogen for the conifers of the boreal forest: a critical review. *International Journal of Plant & Soil Science*, 2(2), 155-189.
- McKinnon, L. M., Mitchell, A. K. & Vyse, A. (2002). Effects of soil temperature and site preparation on subalpine and boreal tree species. Pacific Forestry Centre. ISBN:066231624X, 27 p.
- McGonigle T, Grant, C. (2015) Variation in potassium and calcium uptake with time and root depth. *Journal canadien des sciences végétales*, 95:771–777.
- McRae, D., Duchesne, L., Freedman, B., Lynham, T. & Woodley, S. (2001). Comparisons between wildfire and forest harvesting and their implications in forest management. *Environmental Reviews*, 9(4), 223-260.
- Michalet, R., Pagès, J.-P., Saccone, P. & Brun, J.-J. (2008). Les interactions entre espèces d'arbres dans les mélanges illustrées par le cas des feuillus et des conifères dans les forêts de montagne. *Revue Forestière Française*. 60:139-153.
- Montoro Girona, M., Lussier, J. M., Morin, H., & Thiffault, N. (2018). Conifer regeneration after experimental shelterwood and seed-tree treatments in boreal forests: finding silvicultural alternatives. *Frontiers in Plant Science*, 9, 1145.
- Monty A., Eugene M., Mahy G., 2015. Vegetative regeneration capacities of five ornamental plant invaders after shredding. *Environmental Management*. 55: 423-430.

- MRNFP. (2003). Ministère des Ressources naturelles, de la Faune et des Parcs; Les enjeux de biodiversité relatifs à la composition forestière, Gouvernement du Québec. 2021. <http://www.mrnfp.gouv.qc.ca/forets/connaissances/connaissances-activites-diversite.jsp>. (Consulté le 10 septembre 2021).
- Myrold, D. D. & Huss-Danell, K. (2003). Alder and lupine enhance nitrogen cycling in a degraded forest soil in Northern Sweden. Dans *Frankia Symbiosis* (pp. 47-56). Springer, Dordrecht.
- N'Dayegamiye, A., Giroux, M. & Gasser, M. (2007). La contribution en azote du sol reliée à la minéralisation de la MO: facteur climatique et règles agricoles influençant les taux de minéralisation d'azote. Dans Colloque sur l'azote, CRAAQ-OAQ, 2-17.
- Nadeau, M. B. & Khasa, D. (2015). Les symbioses racinaires. *Vecteur Environnement*, 48(5), 44 p.
- N.F.D, National Forest Database. 2016. Base de données nationale sur les forêts. «Canadian Forest Service, Natural Resources Canada». Tableaux juridictionnels». En ligne. http://nfdp.ccfm.org/data/detailed/html/detailed_5120_p_QC.html. Consulté le 19 août 2023.
- Nienstaedt, H., & Zasada, J.C. (1990). *Picea glauca* (Moench) Voss – White spruce. Dans *Silvics of North America*. Vol. 1. Conifères. Forest Service, United States. Department of agriculture. Washington, district de Columbia. pp 204–226.
- Örlander, G., Gemmen, P., & Hunt, J. (1990). Site preparation: a Swedish overview. Canada – British Columbia Forest Resource Development Agreement. Government of Canada, Victoria, B.C. FRDA Rep. 105.
- Örlander, G., Hallsby, G., Gemmel, P. et Wilhelmsson, C. (1998). Inverting improves establishment of *Pinus contorta* and *Picea abies*—10-year results from a site preparation trial in Northern Sweden. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 13(1- 4), 160-168.

- Paustian, K. & Schnürer, J. (1987). Fungal growth response to carbon and nitrogen limitation: application of a model to laboratory and field data. *Soil Biology and Biochemistry*, 19(5), 621-629.
- Perron, N., Bélanger, L. & Vaillancourt, M-A. (2008) Organisation spatiale des peuplements et de la forêt résiduelle sous régimes de feu et de coupes. *Aménagement Écosystémique en Forêt Boréale* (eds S. Gauthier, M-A. Vaillancourt, A.Leduc, L. De Grandpré, D. Kneeshaw, H. Morin, P. Drapeau & Y. Bergeron), pp. 137–163. Presses de l'Université du Québec, Québec, Canada.
- Plenchette, C., Fortin, J. A., & Furlan, V. (1983). Growth responses of several plant species to *mycorrhizae* in a soil of moderate P-fertility: I. Mycorrhizal dependency under field conditions. *Plant and soil*, 70, 199-209.
- Prescott, C. E., Maynard, D. G., & Laiho, R. (2000). Humus in northern forests: friend or foe?. *Forest ecology and management*, 133(1-2), 23-36.
- Prévost, M. (1992). Effet du scarifiage sur les propriétés du sol, la croissance des semis et la compétition : revue des connaissances actuelles et perspectives de recherches au Québec. *Annales des Sciences Forestières*. 49: 277-296.
- Prévost, M. (1997). Effects of scarification on seedbed coverage and natural regeneration after a group seed-tree cutting in a black spruce (*Picea mariana*) stand. *Forest Ecology and Management*, 94(1-3), 219-231.
- 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(1), 72-86.
- Prévost, M. et Thiffault, N. (2013). La préparation de terrain. Chapitre 8. Le guide sylvicole du Québec, tome 2. Les concepts et l'application de la sylviculture. C. Larouche, F. Guillemette, P. Raymond and J.-P. Saucier (eds.). Les Publications du Québec, Québec, QC, pp. 134–157.

- Read, D. J., Leake, J. R. & Perez-Moreno, J. (2004). Mycorrhizal fungi as drivers of ecosystem processes in heathland and boreal forest biomes. *Canadian Journal of Botany*, 82(8), 1243-1263.
- Rietkerk, M., Dekker, S. C., De Ruiter, P. C. & van de Koppel, J. (2004). Self-organized patchiness and catastrophic shifts in ecosystems. *Science*, 305(5692), 1926-1929.
- Rousk, K., DeLuca, T. H. & Rousk, J. (2013). The cyanobacterial role in the resistance of feather mosses to decomposition—Toward a new hypothesis. *Plos one*, 8(4), e62058.
- Roy, S., Khasa, D. P. & Greer, C. W. (2007). Combining alders, *frankiae*, and *mycorrhizae* for the revegetation and remediation of contaminated ecosystems. *Botany*, 85(3), 237- 251.
- Sachs, T. & Thimann, K., V. 1967. The role of auxins and cytokinins in the release of buds from dominance. *American Journal of Botany*: 136-144.
- Salonius, P. (1983). Effects of organic–mineral soil mixtures and increasing temperature on the respiration of coniferous raw humus material. *Canadian Journal of Forest Research*, 13(1), 102-107.
- Saucier, J.-P., Bergeron, J.-F., Grondin, P., & Robitaille, P. (1998). Les régions écologiques du Québec méridional (3e version): un des éléments du système hiérarchique de classification écologique du territoire mis au point par le ministère des Ressources naturelles du Québec. *L'Aubelle* 124: 1-12.
- Saucier, J.-P., Grondin, P., Robitaille, A., Gosselin, J., Morneau, C., Richard, P., Brisson, J., Sirois, L., Leduc, A., Morin, H., Thiffault, É., Gauthier, S., Lavoie, C. & Payette, S. (2009). Écologie forestière, p. 165-316 dans *Manuel de foresterie*, 2e édition. Ouvrage collectif publié par l'Ordre des ingénieurs forestiers du Québec. Éditions MultiMondes, Québec, Québec.

- Seymour, R.S. (1995). The northeastern region. *In* Regional silviculture of the United States. 3rd ed. Edited by J.W. Barrett. John Wiley & Sons Inc., New York. pp. 31–79.
- Soil Classification Working Group. (1998). The Canadian System of Soil Classification, 3rd ed. Agriculture and Agri-Food Canada Publication 1646, 187 pp.
- St-Pierre, H., Gagnon, R. & Bellefleur, P. (1991). Distribution spatiale de la régénération après feu de l'épinette noire (*Picea mariana*) et du pin gris (*Pinus banksiana*) dans la forêt boréale, Réserve faunique Ashuapmushuan, Québec. *Canadian Journal of Botany*, 69(4), 717-721.
- St-Pierre, H., Gagnon, R. & Bellefleur, P. (1992). Régénération après feu de l'épinette noire (*Picea mariana*) et du pin gris (*Pinus banksiana*) dans la forêt boréale, Québec. *Canadian Journal of Forest Research*, 22(4), 474-481.
- Steel, R. G. D., Torrie, J. H., & Dickey, D. A. (1980). Principles and procedures of statistics. McGraw-Hill, New York. Principles and procedures of statistics. 2nd ed. McGraw-Hill, New York, 481p.
- Stoekeler, J. H. et Heinselman, M. (1950). The use of herbicides for the control of Alder brush and other swamp shrubs in the Lake States. *Journal of Forestry*, 48(12), 870-874.
- Strengbom, J., Näsholm, T. et Ericson, L. (2004). Light, not nitrogen, limits growth of the grass *Deschampsia flexuosa* in boreal forests. *Canadian Journal of Botany*, 82(4), 430-435.
- Sutherland, B.J., Foreman, F.F. (1995). Guide to the use of mechanical site preparation equipment in Northwestern Ontario. Technical Report TR-87, Canadian Forest Service, Natural Resources Canada, Sault Ste. Marie, 186 p.
- Sutherland, B. et Foreman, F. F. (2000). Black spruce and vegetation response to chemical and mechanical site preparation on a boreal mixedwood site. *Canadian Journal of Forest Research*, 30(10), 1561-1570.

- Sutton, R. (1993). Mounding site preparation: a review of European and North American experience. *New Forests*, 7(2), 151-192.
- Tamm, C. O. (1991). Introduction: geochemical occurrence of nitrogen. Natural nitrogen cycling and anthropogenic nitrogen emissions. Dans *Nitrogen in Terrestrial Ecosystems* (pp. 1-6). Springer, Berlin, Heidelberg.
- Teodoru, C. R., Del Giorgio, P. A., Prairie, Y. T., & Camire, M. (2009). Patterns in pCO₂ in boreal streams and rivers of northern Quebec, Canada. *Global Biogeochemical Cycles*, 23(2).
- Thiffault, N. (2016). Effets à court terme du décapage de la matière organique sur la croissance et la nutrition d'épinettes noires et de pins gris mis en terre en forêt boréale. *The Forestry Chronicle*, 92(2), 210-220.
- Thiffault, N. et Hébert, F. (2017). Mechanical site preparation and nurse plant facilitation for the restoration of subarctic forest ecosystems. *Canadian Journal of Forest Research*, 47(7), 926-934.
- Thiffault, N., Jobidon, R. & Munson, A. D. (2014). Comparing large containerized and bareroot conifer stock on sites of contrasting vegetation composition in a non-herbicide scenario. *New For.* 45: 875–891.
- Thiffault, N., Paquette, A., & Messier, C. (2017). Early silvicultural guidelines for intensive management of hybrid larch plantations on fertile sub-boreal sites. *Silva Fennica*, 51(2), 1716.
- Thiffault, N., Prigent, G., Cyr, G., Jobidon, R. & 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(1), 141-149.
- Thiffault, N., Raymond, P., Lussier, J. M., Aubin, I., Royer-Tardif, S., D'Amato, A. W., Doyen, F., Lafleur, B., Perron, M., Bousquet, J., Isabel, N., Carles, S., Lupiens, P., & Malenfant, A. (2021). Sylviculture d'adaptation aux changements climatiques:

- des concepts à la réalité Compte-rendu d'un colloque tenu au Carrefour Forêts 2019. *The Forestry Chronicle*, 97(1), 28-42.
- Thiffault, N., Titus, B. D. et Munson, A. D. (2004). Black spruce seedlings in a *Kalmia Vaccinium* association: microsite manipulation to explore interactions in the field. *Canadian Journal of Forest Research*, 34(8), 1657-1668.
- Trofymow, J. (1999). Expérience canadienne sur la décomposition interstationnelle (CIDET) Rapport sur l'implantation des stations et sur le projet (vol. 378). Service Canadien des Forêts, Centre de Foresterie du Pacifique, Victoria (Colombie-Britannique), 2-7.
- Turetsky, M. R. (2003). The role of bryophytes in carbon and nitrogen cycling. *The Bryologist*, 106(3), 395-409.
- Turetsky, M. R., Bond-Lamberty, B., Euskirchen, E., Talbot, J., Frohking, S., McGuire, A. D. & Tuittila, E. S. (2012). The resilience and functional role of moss in boreal and arctic ecosystems. *New Phytologist*, 196(1), 49-67.
- Vanha-Majamaa, I., Salemaa, M., Tuominen, S., and Mikkola, K. (2000). Digitized photographs in vegetation analysis — a comparison of cover estimates. *Appl. Veg. Sci.* 3(1): 89–94.
- Viereck, L. A. (1983). The effects of fire in black spruce ecosystems of Alaska and northern Canada. *The role of fire in northern circumpolar ecosystems*, Wiley, New York, USA, 210-220.
- Viereck, L. A., & Johnston, W. F. (1990). *Picea mariana* (Mill.) BSP Black Spruce Pinaceae Pine family. *Agriculture Handbook*, 1(654), 227.
- Vilain, M. (2012). *Méthodes expérimentales en agronomie : Pratique et analyse*. 2e édition, Lavoisier. Paris, 432 p.
- Vincent, A. (1964). Growth and numbers of speckled alder following logging of black spruce peatlands. *The Forestry Chronicle*, 40(4), 515-518.

- Vitousek, P. M. & Matson, P. A. (1985). Intensive harvesting and site preparation decrease soil nitrogen availability in young plantations. *Southern Journal of Applied Forestry*, 9(2), 120-125.
- Von der Gonna, M.A. (1992). Fundamentals of mechanical site preparation. Canada–B.C. Partnership Agreement on Forest Resource Development: FRDA II. Forestry Canada and British Columbia. Ministry of Forests, Victoria. FRDA Rep. ISSN 0835-0752.
- Walter, H. (1985). *Vegetation of the Earth and Ecological Systems of the Geo-Biosphere*. Translated from the 5th revised German edition. Springer-Verlag, Berlin. 318 p.
- Wood, J. E., & Althen, F. V. (1993). Establishment of white spruce and black spruce in boreal Ontario: effects of chemical site preparation and post-planting weed control. *The Forestry Chronicle*, 69(5), 554-560.
- Weber, E. (2011). Forte capacité de régénération à partir de fragments de rhizomes chez deux plantes clonales envahissantes (*Solidago canadensis* et *S. gigantea*). *Biol Invasions* 13 (12): 2947-2955.
- Yamasaki, S. H., Fyles, J. W. & Titus, B. D. (2002). Interactions among *Kalmia angustifolia*, soil characteristics, and the growth and nutrition of black spruce seedlings in two boreal Newfoundland plantations of contrasting fertility. *Canadian Journal of Forest Research*, 32(12), 2215-2224.
- Zasada, J., Slaughter, C., Duchesne, L. & Gordon, A. (1997). Ecological considerations for the North American boreal forest. International Institute for Applied Systems Analysis, Laxenburg Austria. Publ. No. IR-97-024.