

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC EN OUTAOUAIS

L'AMENDEMENT EN CENDRES DES ÉRABLIÈRES AMÉLIORE-T-IL LA
FERTILITÉ DU SOL, LE STATUT NUTRITIONNEL DE L'ÉRABLE À SUCRE
ET SA CROISSANCE?

MÉMOIRE
PRÉSENTÉ
COMME EXIGENCE PARTIELLE
DE LA MAÎTRISE EN BIOLOGIE
EXTENSIONNÉE DE L'UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À MONTRÉAL

PAR
JOLAINE ARSENEAU

JUIN 2020

REMERCIEMENTS

Je voudrais dans un premier temps remercier mon directeur de recherche, David Rivest, et mon co-directeur, Nicolas Bélanger, pour m'avoir aidé à accomplir l'un de mes plus grands objectifs de vie. Merci de m'avoir guidée et instruite au cours de ce projet de maîtrise. Je suis aussi reconnaissante envers Angélique Dupuch pour avoir dirigé la mise en place d'un des dispositifs expérimentaux de mon projet et pour son soutien au plan administratif.

Mon mémoire présente les résultats issus d'observations dans 19 érablières situées en Estrie, de 2015 à 2018. Nous y avons analysé l'effet de plusieurs amendements en cendres sur les propriétés chimiques des sols, la nutrition foliaire des érables à sucre et leur croissance sur sols acides. J'ai moi-même effectué la revue de littérature, l'échantillonnage sur le terrain, le traitement des échantillons en laboratoire ainsi que les analyses statistiques des données.

Je remercie Patrick Cartier et Steve Reynolds de la compagnie Domtar, Samuel Royer-Tardif du Service canadien des forêts et Simon Bilodeau-Gauthier du MFFP pour leur collaboration dans la planification et la mise en place des sites expérimentaux ainsi que l'équipe de Alexis Lussier Desbiens de l'Université de Sherbrooke pour la récolte des feuilles sur les arbres matures avec le drone DeLeaves. Je tiens aussi à remercier Hélène Lalande de l'Université McGill pour m'avoir accueillie chaleureusement dans son laboratoire et formée aux analyses chimiques des sols et des tissus foliaires. Je suis aussi reconnaissante envers Anna Mazaleyrat et Hélène Le Borgne pour leur aide avec les analyses statistiques. Enfin, je tiens à remercier Rebeca Cordero Montoya et Éva Masson pour leur bonne humeur et positivisme contagieux. Étant au Québec, je ne peux autrement remercier ma mère qu'avec quatre petits mots : Maman, c'est fini!

Table des matières

REMERCIEMENTS	i
LISTE DES FIGURES	iii
LISTE DES TABLEAUX	iv
LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES.....	v
RÉSUMÉ.....	vi
1. INTRODUCTION	1
1.1 Problématique.....	1
1.2 État des connaissances.....	4
1.2.1 Nutrition des érablières.....	4
1.2.2 Le chaulage forestier	7
1.2.3 L’amendement en cendres des sols forestiers.....	9
1.3 Objectifs et hypothèses de recherche.....	11
2. MATÉRIELS ET MÉTHODES	13
2.1 Sites d’étude et dispositifs expérimentaux	13
2.2 Échantillonnages et analyses en laboratoire	16
2.2.1 Propriétés chimiques du sol.....	16
2.2.2 Concentrations en macronutriments dans les feuilles d’érable à sucre	17
2.2.3 Taille des semis d’érable à sucre	18
2.2.4 Croissance des érables matures	18
2.3. Diagnostiques nutritionnels	18
2.4 Analyses statistiques.....	21
3. RÉSULTATS	23
4. DISCUSSION.....	30
CONCLUSION	37
LISTE DES RÉFÉRENCES.....	41

LISTE DES FIGURES

Figures	Page
1. Emplacement des sites des deux dispositifs expérimentaux distribués dans différentes érablières du sud-ouest du Québec.....	13
2. Plan du dispositif expérimental 1 distribué dans 15 érablières du sud-ouest du Québec.....	15
3. Plan du dispositif expérimental 2 distribué dans 4 érablières du sud-ouest du Québec.....	15
4. Proportion des semis d'érables à sucre dont l'indice DRIS foliaire en macronutriments indique un surplus, un équilibre ou une carence dans 15 érablières du sud-ouest du Québec	25
5. Proportion des érables à sucre matures dont l'indice DRIS foliaire en macronutriments indique un surplus, un équilibre ou une carence dans 5 érablières du sud-ouest du Québec	26

LISTE DES TABLEAUX

Tableaux	Page
1. Normes DRIS pour les feuilles d'érable à sucre dans la mi-cime et au-dessus de la cime pour N, P, K, Ca et Mg (Lozano et Huynh, 1989).....	21
2. Propriétés chimiques du sol dans les horizons organique et minéral trois ans après l'application de cendres dans 15 érablières du sud-ouest du Québec.....	23
3. Concentrations foliaires en macronutriments et indices nutritionnels DRIS de semis d'érable à sucre trois ans après l'application de cendres dans 15 érablières du sud-ouest du Québec.....	24
4. Concentrations foliaires en macronutriments et indices nutritionnels DRIS des érables à sucre mature trois ans après l'application de cendres dans 5 érablières du sud-ouest du Québec.....	26
5. Taille des semis d'érable à sucre trois ans après l'application de cendres dans 15 érablières dans le sud-ouest du Québec.....	27
6. Ratio entre la croissance radiale annuelle moyenne de 2005 à 2015, avant l'application d'un traitement de cendres, et la croissance annuelle de 2016, 2017 et 2018 d'érables à sucre matures, après l'application du traitement dans 15 érablières dans le sud-ouest du Québec.....	27
7. Concentrations foliaires en macronutriments et indices nutritionnels DRIS de semis d'érable à sucre 4 ans après l'application de cendres dans 4 érablières du sud-ouest du Québec.....	29
8. Taille des semis d'érable à sucre quatre ans après l'application de cendres dans 4 érablières dans le sud-ouest du Québec.....	29

LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES

DRIS	Diagnosis and recommendation integrated system
IND	Indice de déséquilibre nutritionnel
N	Azote
C	Carbone
P	Phosphore
K	Potassium
Ca	Calcium
Mg	Magnésium

RÉSUMÉ

L'amendement en cendres est de plus en plus utilisé dans les forêts du monde entier pour augmenter le pH et le contenu en cations basiques des sols, en particulier en Ca, et corriger les carences nutritionnelles des arbres. Les connaissances concernant les effets de l'amendement en cendres dans les érablières se développant sur les sols acides et peu fertiles du nord-est de l'Amérique du Nord demeurent toutefois limitées. L'objectif principal de cette étude était de déterminer les effets à court terme de l'application de cendres en érablières aménagées sur les propriétés chimiques du sol, la nutrition foliaire et la croissance de l'érable à sucre aux stades juvénile et mature. Un premier dispositif expérimental a été établi dans quinze peuplements répartis dans le sud-ouest du Québec. Sur chacun de ces sites, deux traitements d'épandage mécanisé de cendres (témoin non amendé vs. 20 Mg ha⁻¹) ont été mis en place à la fin de l'été 2015 dans des sites de 1,5 ha composés d'une strate de semis d'érable à sucre naturellement régénérés. Un deuxième dispositif expérimental a été établi dans quatre autres sites, où quatre traitements de cendres ont été mis en place (témoin non amendé, 5, 10 et 20 Mg ha⁻¹) dans des parcelles de 5 m² à la fin de l'été 2014. Des semis d'érable à sucre y ont ensuite été plantés à haute densité (50 × 50 cm) au printemps 2015. Dans le premier dispositif, l'application de 20 Mg ha⁻¹ de cendres s'est traduit, 3 ans après traitement, par une augmentation du pH et des concentrations en P, Ca et Mg dans l'horizon organique du sol. Dans l'horizon minéral, aucun effet significatif du traitement n'a été mesuré, bien que le pH et les concentrations en Ca et Mg tendaient à être supérieures dans le traitement avec cendres. À chacune des trois années suivant l'application des cendres, la croissance en diamètre des érables matures a augmenté. Dans les deux dispositifs expérimentaux, les semis dans les parcelles amendées en cendres avaient une plus grande concentration foliaire en Ca et présentaient un bilan nutritionnel mieux équilibré que ceux dans les parcelles témoin. Par contre, dans les deux dispositifs, l'amendement en cendres n'a eu aucun effet significatif sur la croissance des semis d'érable à sucre. Nos résultats indiquent que l'amendement en cendres peut avoir un effet positif à court terme sur la fertilité du sol, la nutrition des semis et la croissance d'érables à sucre matures.

MOTS-CLÉS : érable à sucre ; analyse nutritionnelle ; propriétés chimiques du sol ; cendres ; DRIS

1. INTRODUCTION

1.1 Problématique

Les érablières, dominées par l'érable à sucre (*Acer saccharum*), sont des peuplements de la forêt feuillue tempérée de l'est de l'Amérique du Nord qui ont une grande importance socio-économique (Trudelle *et al.*, 2009). Par exemple, au Québec, les retombées économiques directes engendrées par le réseau de création de valeur de la filière bois de feuillus durs, exploités majoritairement dans les érablières, ont été estimées à plus de 3,5 milliards de \$ par an en livraisons de produits du bois et à 20 000 emplois directs (Trudelle *et al.*, 2009). De plus, l'acériculture, qui génère près de 3 900 emplois au Québec et dont l'impact économique a été estimé à 200 millions de \$ par an, dépend directement des érablières aménagées (MAPAQ, 2011). La compétitivité de ces marchés dépend ainsi beaucoup de la productivité et de la santé des érablières.

Au cours des dernières décennies, divers travaux ont montré que plusieurs érablières dans l'est de l'Amérique du Nord, y compris au Québec, ont souffert d'un syndrome nommé « dépérissement des érablières ». Celui-ci se caractérise notamment par une perte de croissance des érables à sucre et une plus grande vulnérabilité face à des stress environnementaux (Bauce et Allen, 1991 ; Duchesne *et al.*, 2005 ; Houston, 1999 ; Long *et al.*, 1997 ; Watmough, 2010). Ce dépérissement s'accompagne généralement de la mortalité (tous stades de développement confondus) et d'une faible régénération de l'érable à sucre ainsi que d'une régénération accrue du hêtre à grandes feuilles (*Fagus grandifolia*) (Duchesne *et al.*, 2005 ; Hane, 2003). Le dépérissement peut aussi contribuer à l'envahissement de la strate de sous-bois par des espèces compétitrices

(e.g. herbacées, fougères ou arbustes) qui inhibent la croissance et la régénération des semis d'érable à sucre (Nyland *et al.*, 2006). Ce problème préoccupe grandement les industriels et propriétaires forestiers dont l'intérêt économique pour l'érable à sucre est nettement plus important que celui pour le hêtre à grandes feuilles.

L'acidification des sols par les dépositions atmosphériques acides (sulfuriques et nitriques) a été reconnue comme un déterminant important du dépérissement des érablières de l'est de l'Amérique du Nord (Horsley *et al.*, 2002 ; Ouimet *et al.*, 2008). Ces dépôts acides affectent divers processus du recyclage des éléments nutritifs du sol et favorisent le lessivage des cations basiques, notamment le calcium (Ca) (Ouimet et Duchesne, 2009). Les sols de plusieurs érablières dans l'est de l'Amérique du Nord présentent des carences en Ca (Houle *et al.*, 2007 ; Kolb et McCormick, 1993 ; Ouimet et Duchesne, 2009). Or, l'érable à sucre est une espèce dont la croissance est optimale sur les sols forestiers riches en cations basiques tels que le Ca, le potassium (K) et le magnésium (Mg) (Bigelow et Canham, 2002 ; Long *et al.*, 2009). Le pH le plus propice à la croissance et à la régénération de l'érable à sucre est situé entre 6,0 et 7,5 (Osman, 2013a). Diverses études ont mesuré des pH nettement inférieurs à 5,0 dans diverses érablières de l'est de l'Amérique du Nord (Duchesne *et al.*, 2002 ; Lawrence *et al.*, 2012 ; Treasure *et al.*, 2019). Certains auteurs ont aussi suggéré que l'acidification des sols peut affecter négativement la croissance racinaire des arbres et leur capacité de prélèvement des nutriments du sol (Ouimet *et al.*, 1996). Par ailleurs, d'autres facteurs seraient impliqués dans le dépérissement des érablières tels que des sécheresses sévères, des gels tardifs printaniers et des défoliations inhabituelles et sévères par des insectes ravageurs comme la livrée des forêts (Bauce et Allen, 1991 ; Horsley *et al.*, 2000 ; Payette *et al.*, 1996).

L'application de matières alcalinisantes a été envisagée afin de contrer les stress nutritionnels observés dans le dépérissement contemporain des érablières. En fait, plusieurs essais expérimentaux ont identifié des impacts positifs de l'application de

chaux dolomitique ($\text{CaMg}[\text{CO}_3]_2$) et/ou calcique (CaCO_3), notamment sur les sites fortement acides, pour accroître le Ca échangeable dans le sol et améliorer son statut acide-base ainsi que la nutrition foliaire, la survie et la croissance de la régénération et des tiges commerciales d'érable à sucre (Long *et al.*, 1997 ; Moore *et al.*, 2012 ; 2014 ; Ouimet *et al.*, 2008). Par contre, le chaulage des forêts à l'aide de la chaux demeure une pratique opérationnelle onéreuse en raison du coût grandissant lié à l'extraction et au transport de cet intrant. De plus, l'exploitation de la chaux est associée à des émissions importantes de CO_2 vers l'atmosphère (jusqu'à 0,75 Mg CO_2 /Mg chaux produite) (European Commission, 2001). Une alternative intéressante au chaulage forestier, autant sur le plan économique qu'environnemental, est l'amendement des sols par des cendres de bois, notamment celles issues de la combustion des résidus industriels et de biomasse forestière (da Costa *et al.*, 2020; Hébert et Breton, 2008). Bien que les cendres possèdent un pouvoir chaulant de près de 50 % inférieur à celui de la chaux, celles-ci contiennent du phosphore (P), des cations basiques et des oligo-éléments nécessaires à la croissance des arbres (Augusto *et al.*, 2008 ; Royer-Tardif *et al.*, 2019).

En Europe, l'épandage de cendres en milieu forestier est une pratique forestière relativement bien adoptée et documentée. Par exemple, des études ont révélé que l'amendement de cendres peut avoir un effet positif sur la croissance des arbres et le taux de régénération, bien que ces effets dépendent des espèces et des propriétés biochimiques initiales du sol et qu'ils soient très variables d'un peuplement à un autre (Augusto *et al.*, 2008a ; Insam et Knapp, 2011 ; Pitman, 2006 ; Saarsalmi *et al.*, 2012). Toutefois, les recherches menées en Europe ont été généralement menées dans le biome de la forêt boréale. Elle se sont aussi concentrées sur l'étude de l'impact d'un nombre limité de taux d'application de cendres, qui étaient généralement faibles (3 à 6 Mg ha⁻¹) par rapport à ceux (10 à 20 Mg ha⁻¹) que certains industriels forestiers envisagent employer dans l'est de l'Amérique du Nord (Patrick Cartier, comm. pers.).

L'amendement de cendres au Canada est une pratique dont la réglementation est encadrée par les provinces (Hannam *et al.*, 2016). En 2016, huit des treize provinces et territoires du Canada ne permettaient pas l'application des cendres en tant qu'amendement (fertilisant et/ou agent chaulant), ni en foresterie ni en agriculture (Hannam *et al.*, 2016). Le principal obstacle à l'amendement de cendres est la présence d'éléments traces métalliques, dont les concentrations acceptées varient selon les juridictions. Dans les forêts québécoises, l'amendement en cendres est encore peu pratiqué et les connaissances sur le sujet demeurent limitées (Brais *et al.*, 2015 ; Hannam *et al.*, 2018). Ce projet, développé dans le cadre du réseau « AshNet », permettra de répondre à ce besoin de connaissances en étudiant les effets à court terme de l'amendement des sols d'érablières sur sols acides sur les propriétés chimiques du sol, la nutrition foliaire de l'érable à sucre et sa croissance. AshNet est un réseau qui étudie activement la valorisation des déchets issus de la production de bioénergie et qui vise à améliorer la santé des écosystèmes forestiers avec les cendres (Emilsson *et al.*, 2018).

1.2 État des connaissances

1.2.1 Nutrition des érablières

Les symptômes les plus communs du dépérissement des érablières de l'est de l'Amérique du Nord sont la réduction des croissances primaire et secondaire, la mortalité des branches et la réduction ou l'absence complète de régénération (Bishop *et al.*, 2015; Horsley *et al.*, 2002). Les facteurs de stress les plus étudiés dans les érablières du Québec ont été l'acidification des sols causée par les dépôts atmosphériques acides ainsi que les déséquilibres nutritionnels qui en découlent (Bélanger *et al.*, 2002 ; Hendershot et Jones, 1989 ; Ouimet *et al.*, 2006).

La solubilité des éléments nutritifs dans le sol peut être estimée par la mesure d'un nombre minimal de variable dont le pH du sol. L'augmentation de l'acidité des sols se traduit par une diminution des teneurs en bases échangeables telles le K, le Ca et le Mg et de l'activité ionique de la solution du sol (Osman, 2013b). Le long d'un réseau de sites couvrant plusieurs régions écologiques dans l'est de l'Amérique du Nord, entre 1987 et 2000, Houle *et al.* (2007) ont mesuré des pH très acides en érablière allant jusqu'à 3,6 dans l'horizon organique et 4,0 dans l'horizon minéral.

Plusieurs études évaluant les relations entre la productivité des érablières et les propriétés chimiques du sol sont parvenues à la conclusion que les faibles concentrations en macronutriments dans les sols peuvent affecter négativement la nutrition et la croissance des érables à sucre (Duchesne *et al.*, 2002 ; Horsley *et al.*, 2002 ; Sharpe, 2002). Par ailleurs, les concentrations en Ca, Mg et K dans les sols sont des variables qui ont été fortement associées à la mortalité des érablières en dépérissement (Pitel et Yanai, 2014). Dans cette dernière étude, les taux de mortalité annuelle les plus élevés ont été mesurés sur les sites dont les sols présentaient une faible concentration en Ca, Mg et K dans la partie supérieure de l'horizon B. De manière similaire, Bailey *et al.* (2004) ont montré que les érablières du nord-est des États-Unis les plus en déclin étaient situées sur les sites très faiblement saturés en Ca (<2%) et en Mg (<0,5%) dans la partie supérieure de l'horizon B. Cela dit, les méthodes d'exploitation forestière altèrent les concentrations en nutriments essentiels des sols et peuvent, par conséquent, causer la perte de fertilité du sol et accentuer la mortalité de la régénération de l'érable à sucre (Bailey *et al.*, 2019).

L'augmentation de l'acidité des sols favorise la mobilité et la biodisponibilité de l'aluminium (Al) qui peut devenir toxique pour les érables, impactant principalement la croissance de ceux-ci (Schaberg et al., 2006). Les pluies acides ont accentué la dissolution des minéraux et le lessivage des cations basiques comme le Ca, le Mg et le K, provoquant l'accumulation des ions Al^{3+} et H^+ sur les sites d'échange (Wallace *et*

al., 2007). Cette perte en cations basiques échangeables entraîne un déséquilibre dans la disponibilité de ces éléments nutritifs (Duarte *et al.*, 2013). Une trop forte activité de Al dans la solution du sol favorise un effet antagoniste sur le prélèvement du Ca et du Mg, ce qui nuit au développement des racines de l'érable à sucre (St.Clair *et al.*, 2008 ; Thornton *et al.*, 1986).

Des quantités insuffisantes en Ca et Mg dans les sols peuvent engendrer des carences pour les arbres, causant la décoloration des feuilles et, dans les stades plus avancés de carence, la nécrose foliaire, une réduction de croissance et la mortalité des arbres (Bernier et Brazeau, 1988b ; Vadeboncoeur *et al.*, 2010). De faibles concentrations foliaires en K ont été associées au déclin de l'érable à sucre au Québec et au Vermont (Bernier et Brazeau, 1988b ; Wilmot *et al.*, 1996). L'analyse des tissus foliaires d'un arbre permet d'estimer son statut nutritionnel. Cette analyse peut être effectuée par la méthode DRIS (Diagnosis and Recommendation Integrated System) qui permet de connaître l'ordre selon lequel les nutriments sont limitants (Lozano et Huynh, 1989). La section méthodologie du chapitre II présente les principales caractéristiques de cette méthode.

Une méta-analyse sur l'effet de la fertilisation sur la croissance d'érablières aux États-Unis et au Canada suggère que, parmi le N, le P et le Ca, l'érable à sucre serait principalement limité par le Ca sur des sols acides (St.Clair *et al.*, 2008 ; Vadeboncoeur *et al.*, 2010). La fertilisation des sols en K a également limité le dépérissement de l'érable à sucre dans ces régions (Tripler *et al.*, 2002 ; Wilmot *et al.*, 1996). Toutefois, peu de recherche ont évalué la concentration en K dans les sols nécessaire pour éviter le dépérissement des érablières. Des carences en P dans les sols ont aussi été observées chez l'érable à sucre dans plusieurs érablières en dépérissement des Appalaches au Québec (Bernier et Brazeau 1988a). Paré et Bernier (1989) ont observé que les érablières présentant de faibles réserves de P dans l'horizon organique étaient associées

à de faibles concentrations foliaires en P et à de faibles densités de racines fines d'érable à sucre dans les 15 premiers cm du sol. Dans la région centrale de l'Ontario, Gradowski et Thomas (2006) ont démontré que la croissance de l'érable à sucre est passée d'une limitation historiquement dominée par le N à une limitation en P. Les dépôts atmosphériques de N sont sans doute responsables de ce changement. En effet, les taux actuels modélisés des dépôts atmosphériques de N (10 à 25 kg N ha⁻¹ an⁻¹) dans plusieurs forêts tempérées de l'est du Canada demeurent très élevés (Aherne et Posh, 2013). Un nombre grandissant de forêts tempérées feuillues de l'est de l'Amérique du Nord montrent des signes de saturation en N, autant dans les sols que dans les arbres (Aber *et al.*, 2003). À moyen terme, cette saturation en N engendre une acidification des sols par nitrification, une limitation en P et peut contribuer à modifier l'abondance, la composition, la structure et les fonctions des communautés microbiennes, affectant par la suite le taux de décomposition de la matière organique et la disponibilité des éléments nutritifs (Aber *et al.*, 1998 ; Zechmeister-Boltenstern *et al.*, 2011).

1.2.2 Le chaulage forestier

Dans le contexte de l'acidification des sols des érablières et de leur limitation en Ca et Mg, plusieurs travaux se sont intéressés à évaluer les effets du chaulage sur la croissance et la nutrition de l'érable à sucre. Il est opportun d'analyser les résultats de ces travaux pour mieux appréhender les effets des cendres sur les érablières qui sont très peu documentés. L'application de chaux en forêt (dolomitique et calcique confondues) se traduit généralement par une augmentation du pH du sol, de sa concentration en Ca et Mg et de la croissance des arbres (Long *et al.*, 1997 ; Lundström *et al.*, 2003 ; Nolet *et al.*, 2015 ; Wargo *et al.*, 2002 ; Wilmot *et al.*, 1996). Reid et Watmough (2014) ont effectué une méta-analyse pour évaluer les effets de l'application de la chaux en fonction de plusieurs variables telles que le type de sol, le type de peuplement, les conditions initiales des sols et du temps après le traitement et des doses utilisées. Les résultats de l'application de la chaux dépendent grandement de

ces quatre dernières conditions. Par exemple, l'application de 2 ou 20 Mg ha⁻¹ de chaux dolomitique dans une érablière du sud du Québec s'est traduite, 3 ans après l'épandage, par une augmentation du pH, de la concentration en Ca et Mg et du C et N microbien du sol et d'une réduction de la concentration en Al (Chagnon *et al.*, 2001). Dans une érablière de la Pennsylvanie, 7 ans après l'application de 22,4 Mg ha⁻¹ de chaux dolomitique, Long *et al.* (1997) ont mesuré des augmentations des concentrations de Ca et Mg allant de 600 à 700% dans l'horizon organique et de 200 à 1000% dans l'horizon minéral. Selon les auteurs, la concentration foliaire en Ca dans les érables à sucre traités à la chaux a doublé alors que celle en Mg a quadruplé. Par contre, les concentrations en P (sol) et K (sol et feuilles) sont demeurées sensiblement les mêmes entre les dosages, bien que la concentration en P foliaire se soit légèrement accrue en présence de chaux (Long *et al.*, 1997). Dans une érablière au New Hampshire, une faible application de chaux calcique (1 Mg ha⁻¹) s'est traduite, 4 ans après l'épandage, par une augmentation de la densité de régénération, de la croissance, de la concentration foliaire en Ca et du taux de colonisation des racines par des mycorhizes chez les semis d'érable à sucre (Juice *et al.*, 2006).

Dans des érablières du Québec, Moore *et al.* (2012) ont observé que différents traitements de chaulage (0,5 à 50 Mg ha⁻¹) ont significativement augmenté l'accroissement de la surface terrière (jusqu'à 80%) de l'érable à sucre, 15 ans après l'épandage. Les auteurs ont aussi observé que la densité de la régénération en érable à sucre s'est accrue proportionnellement avec la dose d'application de chaux. Dans une expérience en pot, Burke et Raynal (1998) ont mesuré, après une saison de croissance, une augmentation significative de la croissance et de la concentration foliaire en Ca, Mg, K et P chez des semis d'érable à sucre suite à l'incorporation (en pot enterré) de 25 Mg ha⁻¹ de chaux à un sol très acide (pH = 3,2). En revanche, Nolet *et al.* (2015), sur des sols faiblement acides, ont mesuré que l'application de 3 Mg ha⁻¹ de chaux dolomitique a entraîné des effets à court terme marginaux sur la densité de régénération et la croissance de semis d'érable à sucre dans la région de l'Outaouais au Québec.

Ainsi, il semble que la réponse des semis d'érable à sucre aux amendements alcalins dépend grandement de la dose appliquée, de son pouvoir neutralisant et du type de sol.

1.2.3 L'amendement en cendres des sols forestiers

On observe un intérêt grandissant pour l'amendement en cendres comme pratique à adopter pour augmenter la disponibilité de nutriments dans les sols forestiers acidifiés par les dépôts atmosphériques (da Costa *et al.*, 2020 ; Demeyer *et al.*, 2001 ; Hansen *et al.*, 2018). Le pouvoir alcalinisant de la cendre dépend de la proportion de carbonates de Ca et de Mg formés lors de la combustion du bois (Augusto *et al.*, 2008 ; Pitman, 2006). L'intensité de la neutralisation du pH induit dans le sol par l'application des cendres ainsi que la durée de celle-ci varient selon le type de sol et la composition des écosystèmes forestiers (Bang-Andreasen *et al.*, 2017 ; Bougnom *et al.*, 2011). L'augmentation du pH du sol peut aussi entraîner une activation des communautés microbiennes et de la minéralisation de la matière organique du sol (Bang-Andreasen *et al.*, 2017 ; Klavina *et al.*, 2016), augmentant la biodisponibilité de N pour les arbres (Brais *et al.*, 2015). De façon générale, les effets des cendres sur les propriétés chimiques des sols sont moins prononcés dans l'horizon minéral que dans l'horizon organique, en particulier à court terme (1 ou 2 ans après traitement) (Augusto *et al.*, 2008b ; Hansen *et al.*, 2018 ; Reid et Watmough, 2014).

Augusto *et al.* (2008) ont effectué une méta-analyse de plus de 200 observations menées au cours de 80 expériences menées dans divers pays nordiques, la plupart en forêt boréale scandinave, pour évaluer les effets de l'application de cendres sur les propriétés chimiques des sols forestiers. Selon cette étude, à court terme (1 à 5 ans après l'épandage), la dissolution de sels contenus dans les cendres entraîne généralement des augmentations significatives du pH et des contenus en K, Ca et Mg dans le sol et dans les tissus foliaires des arbres. Ces changements sont relatifs au type de sol et à la dose de cendres appliquée. Par contre, ces changements sur le plan de la

nutrition des forêts ont eu peu d'effets à court terme sur leur productivité (Augusto *et al.* 2008). Cette méta-analyse suggère que les effets positifs attendus de l'application de cendres sur la nutrition et la croissance des forêts pourraient être accentués sous un climat tempéré, dû aux températures supérieures au climat boréal qui accélèrent la minéralisation des amendements organiques, et sur des sols acides et fortement limités en cations basiques. À l'opposé, un trop fort dosage de cendres peut avoir des effets nuls, voir adverses sur la croissance, même dans le cas de sols acides (pH > 3) dans des peuplements résineux (Brais *et al.*, 2015 ; Jacobson, 2003). L'augmentation du dosage en cendres augmente non seulement la disponibilité dans les sols en macronutriments, mais aussi celle d'éléments tels le Al et Mn qui sont antagonistes à Ca et Mg et qui peuvent atteindre à des niveaux de toxicité pour la croissance des arbres (Brais *et al.*, 2015).

Des études à plus long terme (10-30 ans après traitement) ont montré un effet positif des cendres sur la productivité des forêts boréales, principalement dans les pays nordiques (Saarsalmi *et al.*, 2005, 2012). La méta-analyse effectuée par Reid et Watmough (2014) a permis d'évaluer les effets de l'application de cendres sur la nutrition foliaire en Ca et la croissance de différentes espèces d'arbres en Europe et en Amérique du Nord. Selon cette étude, l'application de cendres a augmenté significativement la croissance des arbres (tous âges et espèces confondues) dans 42% des cas. Les auteurs ont aussi démontré que l'augmentation en Ca foliaire suite à l'application des cendres se manifeste généralement plus vite chez les semis que chez les arbres matures.

Les rares études réalisées en Amérique du Nord, toutes en forêts boréales, ont observé que le pH du sol et son contenu en macronutriments ont augmenté 1 an après l'application de traitements de cendres dans l'horizon organique du sol, même dans le traitement à plus faible dose (2 Mg ha⁻¹) (Brais *et al.*, 2015 ; Domes *et al.*, 2018 ; Noyce *et al.*, 2016). Après 5 ans, la capacité d'échange cationique dans les traitements de

endres a augmenté de 15% (2 Mg ha⁻¹) à 61% (8 Mg ha⁻¹) dans l'horizon organique (Brais *et al.*, 2015). À notre connaissance, il n'existe aucune étude publiée qui se soit attardée à évaluer les effets de l'application de cendres sur la croissance de l'érable à sucre au stade de maturité. Par ailleurs, aucune étude ne s'est attardée à analyser les impacts de l'application de cendres sur la croissance et la nutrition de l'érable à sucre aux stades juvénile et mature en forêt tempérée. Dans les forêts scandinaves et méditerranéennes, les études sur les effets de l'application de cendres sur la régénération ont généré des résultats très variables (Herrero *et al.*, 2007 ; Jacobson, 2003 ; Mahmood *et al.*, 2003 ; Mandre *et al.*, 2006). Dans des expériences en serre, Richard *et al.* (2018) ont observé une augmentation de la croissance de semis de pin rouge (*Pinus resinosa*) et de pin noir (*Pinus nigra*) en sol organique amendé avec des cendres, alors que Jacobson (2003) n'a observé aucune augmentation significative de la croissance du pin sylvestre (*Pinus sylvestris*) et de l'épinette de norvège (*Picea abies*) en sol minéral amendé avec des cendres. En dépit des nombreux effets positifs des cendres sur la fertilité des sols, leurs impacts sur la croissance des semis et des arbres matures sont quant à eux très variables selon les études.

1.3 Objectifs et hypothèses de recherche

Peu d'études ont porté sur l'impact à court terme de l'amendement en cendres sur les écosystèmes forestiers tempérés, en particulier dans les érablières, ainsi que dans un contexte opérationnel de forêt commercialement aménagée. Le premier objectif de la présente étude était de déterminer les effets de deux traitements opérationnels d'amendement en cendres (0 et 20 Mg cendres sèches ha⁻¹) sur les propriétés chimiques du sol, la nutrition foliaire et la croissance de l'érable à sucre au stade de semis et à l'âge de la maturité, 3 ans après l'épandage. Le deuxième objectif était d'analyser les effets de différentes doses de cendres (0, 5 10 et 20 Mg cendres sèches ha⁻¹) sur la nutrition foliaire et la croissance de l'érable à sucre au stade semis, 4 ans après l'épandage. Nous avons émis l'hypothèse que tous les amendements en cendres

améliorent à court terme la fertilité du sol, en augmentant le pH et le contenu en éléments nutritifs, ainsi que le statut nutritionnel foliaire et la croissance de l'érable à sucre aux stades de semis et à l'âge de la maturité.

2. MATÉRIELS ET MÉTHODES

2.1 Sites d'étude et dispositifs expérimentaux

Les sites d'étude sont situés dans la zone tempérée nordique, dans le sud-ouest du Québec (régions administratives de la Beauce et de l'Estrie), plus précisément dans les domaines bioclimatiques de l'érablière à tilleul (*Tilia americana*) et de l'érablière à bouleau jaune (*Betula alleghaniensis*) (MFFP, 2018) (figure 1).

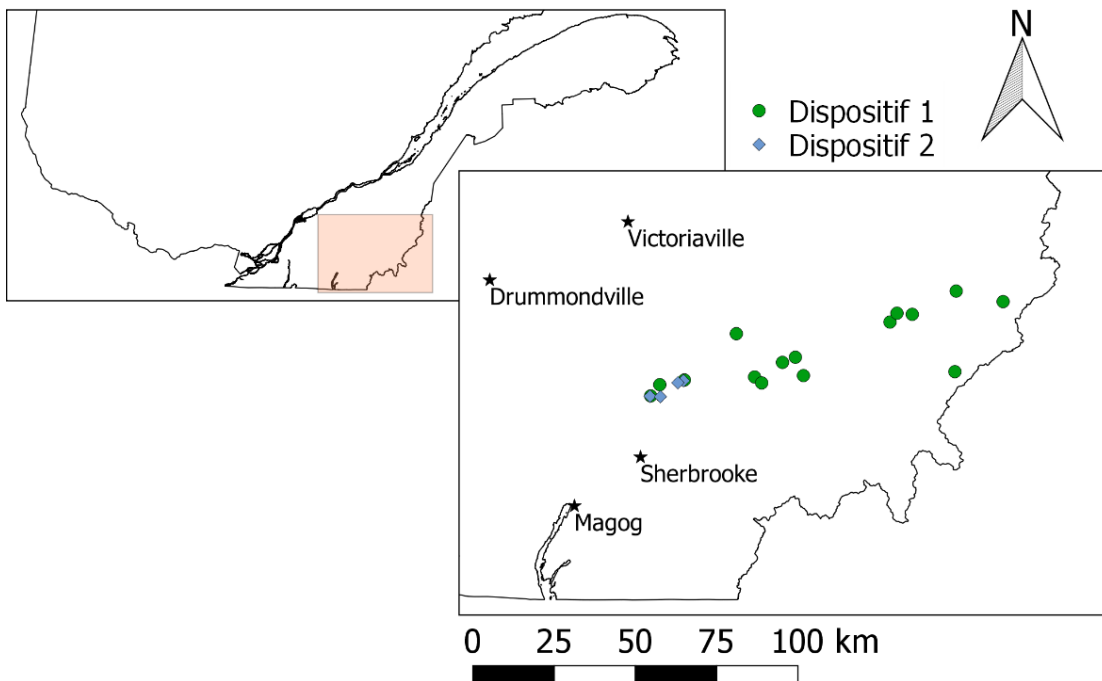


Figure 1. Emplacement des sites des deux dispositifs expérimentaux distribués dans différentes érablières du sud-ouest du Québec.

La topographie y est ondulée avec des pentes douces (i.e. inférieures à 15% d'inclinaison) et les sols sont des podzols humo-ferriques et ferro-humiques avec un humus (horizons FH) de type Moder (Cann et Lajoie, 1943 ; Collin *et al.*, 2016). Le pH moyen des sols était de $4,6 \pm 0,4$ (écart-type) alors que leur concentration moyenne en sables et en argiles était de $31,5 \pm 7,3$ % et $13,4 \pm 4,1$ %, respectivement. Les peuplements sélectionnés étaient âgés de plus de 60 ans et ont été aménagés par coupe de jardinage. Les dernières récoltes de bois (30 à 35 % de la surface terrière) sur les sites ont été effectuées en 2012 et 2013.

Le dispositif expérimental 1 (figure 2) comprend 15 peuplements sur lesquels deux traitements d'épandage opérationnel de cendres (témoin non amendé vs. 20 Mg cendres sèches ha⁻¹) ont été appliqués entre septembre et octobre 2015 sur une surface de minimal de 100 m × 50 m avec un épandeur adapté sur un porteur forestier. En juillet et août 2015, quatre parcelles de 10 m × 10 m ont été disposées dans chaque peuplement afin d'échantillonner les concentrations foliaires des semis en macronutriments et le pH du sol avant l'application des cendres (figure 2). Deux parcelles ont été installées dans la zone cendrée et les deux autres hors de celle-ci (témoins). Au total, le dispositif 1 est formé de 60 parcelles : 30 avec cendres et 30 sans cendres.

Afin de déterminer les effets de différentes doses de cendres sur la nutrition et la croissance des semis d'érables à sucre, un deuxième dispositif expérimental a été mis en place. Le dispositif expérimental 2 (figure 3) comprend quatre peuplements sur lesquels quatre traitements de cendres (témoin sans cendre, 5 Mg ha⁻¹, 10 Mg ha⁻¹ et 20 Mg ha⁻¹) ont été appliqués manuellement en septembre 2014 dans des parcelles de 5 m × 5 m. Sur chacun des sites, les parcelles ont été distribuées aléatoirement et séparées les unes des autres par une zone tampon de 10 m. Des semis d'érable à sucre provenant de la pépinière publique de Berthierville ont été plantés dans les parcelles en mai 2015 par groupe de neuf plants selon des espacements de 50 × 50 cm. Les semis ont été

protégés par des exclos de 2 m de hauteur formés d'un grillage métallique ayant une maille de 2,5 cm.

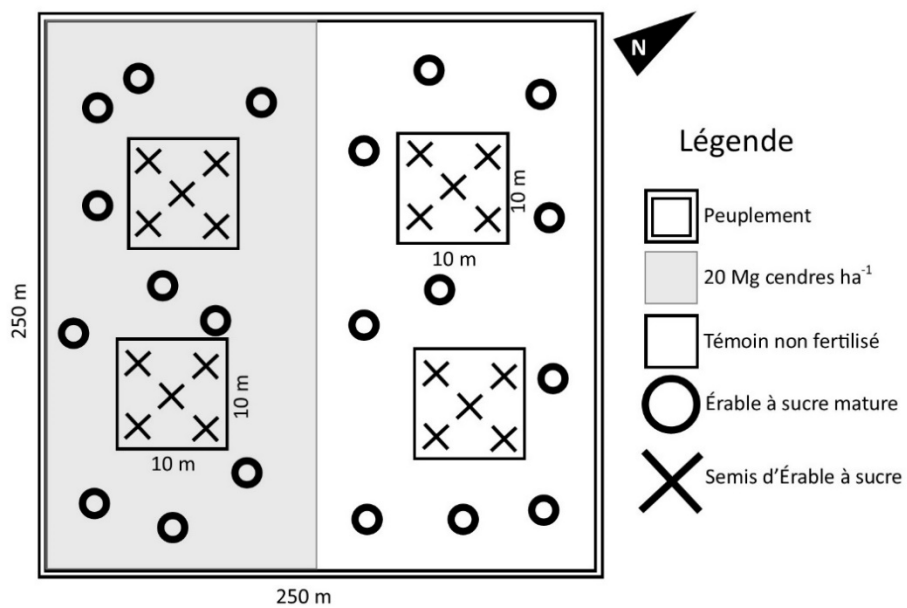


Figure 2. Plan du dispositif expérimental 1 distribué dans 15 érablières du sud-ouest du Québec.

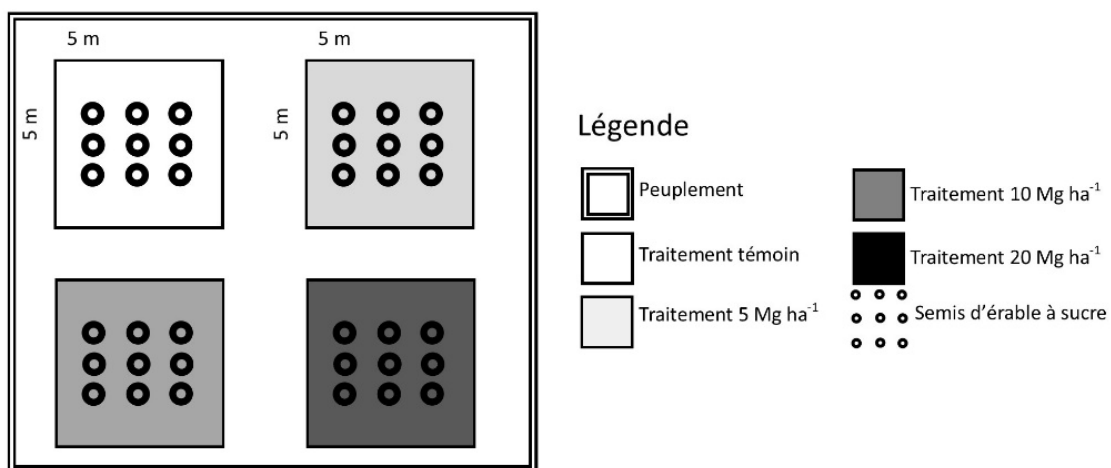


Figure 1. Plan du dispositif expérimental 2 distribué dans quatre érablières du sud-ouest du Québec.

La cendre appliquée dans les deux dispositifs présente les caractéristiques chimiques suivantes : 47 % d'humidité, pH de 13, capacité neutralisante de 51%, 200 g Ca kg⁻¹, 14 g Mg kg⁻¹, 15 g K kg⁻¹, 3 g P kg⁻¹ et 3,4 g S kg⁻¹ (Royer-Tardif *et al.*, 2019). Ces éléments chimiques sont principalement présents sous forme d'oxyde, après la combustion de la matière première, dans les proportions suivantes : 25-30% CaO, 2,5-3% MgO et 4,5-5% K₂O. Cette cendre provenait de l'usine de pâte et papier de Domtar à Windsor, dans la région de Sherbrooke (figure 1).

2.2 Échantillonnages et analyses en laboratoire

2.2.1 Propriétés chimiques du sol

Dans le dispositif 1, des échantillons composites de l'horizon organique (FH) et du sol minéral (0-20 cm), formés de quatre sous-échantillons prélevés selon la méthode de Bélanger et Van Rees (2008), ont été prélevés dans les 60 parcelles expérimentales au mois d'août en 2015 et 2018, respectivement quelques mois avant et 3 ans après l'épandage. Les échantillons ont été séchés à l'air ambiant jusqu'à un poids constant et ont ensuite été tamisés à 2 mm. Le pH de tous les échantillons a été analysé en utilisant un ratio sol/eau distillée de 1/5 pour le sol minéral et 1/10 pour le sol organique (Hendershot *et al.*, 2008). Sur les sols de 2018, nous avons mesuré leur contenu en N et C total, P extractible, et Ca, Mg et K échangeables. Les contenus en N et C total ont été mesurés par combustion à 1450 °C par détection infrarouge (C) et conductivité thermique (N) sur un analyseur TruMac CNS (LECO, St. Joseph, MI, USA). Les concentrations en P extractible ont été déterminées par colorimétrie (bleu molybdate) sur des extractions de sols au Mehlich III (Zidia et Tran, 2008) avec un analyseur automatique d'ion (Lachat Instruments, Milwaukee, WI, USA). Les concentrations en

Ca, Mg et K échangeables ont été mesurées sur des extractions de sols au BaCl_2 (0,1 M) par absorption/émission atomique (Varian 220 FS, Agilent Technologies, Palo Alto, CA, USA) (Tran et Simard, 2008). Le lithium (Li) et le sélénium (Se) ont été utilisés comme catalyseurs. Une étude compagne a évalué les propriétés chimiques du sol dans toutes les parcelles expérimentales du dispositif 2, deux ans après l'application des cendres, en utilisant les mêmes méthodes (Royer-Tardif *et al.*, 2019).

2.2.2 Concentrations en macronutriments dans les feuilles d'érable à sucre

Dans toutes les parcelles du dispositif 1, deux à quatre feuilles saines (avec pétiole) par semis d'érable à sucre ont été prélevées à la fin juillet (période où la composition chimique des feuilles est stable et à son maximum) en 2015 et 2018 sur huit semis choisis au hasard. Les feuilles ont été combinées afin de former un échantillon composite par parcelle, pour un total de 60 échantillons par année. Cette stratégie d'échantillonnage capture efficacement la variabilité d'une parcelle forestière (Bélanger et Van Rees, 2008). Dans la partie supérieure de la cime d'érables à sucre mature, deux branches par individu ont été prélevées sur deux arbres matures par traitement sur cinq sites avec le drone DeLeaves, lequel est un outil conçu pour maximiser l'échantillonnage de la canopée dans des situations complexes comme des forêts matures caractérisées par des arbres de fortes tailles (Charron *et al.*, 2020). La logistique de cette nouvelle méthode mise à l'essai dans cette étude a en sorte qu'un nombre limité d'érables à sucre matures ont été échantillonnés. Cinq feuilles matures et saines par branche ont été récoltées afin de former un échantillon composite de 10 feuilles (Bélanger et Van Rees, 2008), pour un total de 20 échantillons composites. Dans le dispositif 2, quatre feuilles saines par semis d'érable à sucre ont été prélevées sur quatre semis de façon à former deux échantillons composites par parcelle, pour un total de 40 échantillons. Tous les échantillons foliaires ont été séchés à 60°C pendant 48 heures. Ils ont ensuite été broyés avec le vibro-broyeur MM 400 à une finesse de 60

microns avant d'être digérés dans un mélange d'acide sulfurique (H_2SO_4) et de peroxyde d'hydrogène (H_2O_2) (Parkinson et Allen, 1975). Tel que décrit précédemment, le N et le P ont été mesurés par colorimétrie, alors que les cations basiques (K, Ca et Mg) ont été mesurés par absorption/émission atomique.

2.2.3 Taille des semis d'érable à sucre

La taille des semis d'érable à sucre dans les deux dispositifs a été estimée en mesurant leur diamètre (au collet) et leur hauteur (collet jusqu'à la flèche terminale) en mai 2015 (dispositif 1) et septembre 2018 (dispositifs 1 et 2). La hauteur et le diamètre demeurent de bon indice de croissance pour l'étude des semis (Beudet et Messier, 1998).

2.2.4 Croissance des érables matures

Dans le dispositif 1, dix érables à sucre matures en santé, cinq dans le traitement avec cendres et cinq dans le témoin, ont été carottés (une carotte par arbre) à l'aide d'une sonde de Presler entre la fin août et le début septembre dans 15 peuplements, pour un total de 300 arbres échantillonnés. L'accroissement annuel du diamètre entre 2005 et 2018 a été déterminé par des mesures de largeur des cernes annuels à l'aide du système CD Dendro à un niveau de précision de 0,001 mm. Afin de mieux maîtriser les possibles biais générés par les variations interannuelles de croissance, nous avons calculé le ratio entre la croissance radiale annuelle moyenne de 2005 à 2015, soit avant l'application de cendres, et la croissance annuelle de 2016, 2017 et 2018, respectivement une, deux et trois années après l'application de cendres (Gendreau-Berthiaume *et al.* 2012).

2.3. Diagnostics nutritionnels

L'analyse des tissus foliaires d'un arbre permet d'estimer son statut nutritionnel. L'approche traditionnelle de diagnostic nutritionnel, qui compare des données brutes

de concentration foliaire avec les seuils critiques de déficience (Critical Value Approach, CVA), n'apporte pas une information complète sur l'état de santé des arbres, car les optimums varient selon l'âge des peuplements et les concentrations des autres nutriments dans l'environnement (Bailey *et al.*, 1997). De plus, l'approche CVA ne permet pas d'intégrer les interactions entre plusieurs nutriments. Cela signifie qu'en présence d'une carence de plusieurs nutriments, l'analyse ne permet pas de connaître l'ordre selon lequel les nutriments sont limitants (Lozano et Huynh, 1989). Les ratios sont donc plus souvent utilisés pour estimer les déficiences nutritionnelles, à travers certaines méthodes comme le DRIS (Diagnosis and Recommendation Integrated System) (Burke et Raynal, 1998). La méthode DRIS prend en compte les différentes interactions des nutriments dans les plantes, ce qui permet de faire ressortir les carences et les excès de chacun d'entre eux.

Le DRIS est une méthode d'analyse nutritionnelle mise en place par Beaufile (1973) puis modifiée par Beverly (1987). Cette méthode permet d'identifier simultanément les déséquilibres, les carences et les excès en nutriments dans les tissus végétaux en comparant les ratios des concentrations observées aux ratios optimums (Bailey *et al.*, 1997 ; Ouimet et Camiré, 1995). L'indice DRIS obtenu indique l'intensité à laquelle une plante nécessite un nutriment donné (Paré *et al.*, 1993). Plus l'indice obtenu est négatif, plus le nutriment est en déficit dans les feuilles, et vice et versa (Ouimet et Camiré, 1995 ; Serra *et al.*, 2013). Un indice DRIS inférieur à -15 démontre une carence nutritive significative de l'élément correspondant dans la plante. Le statut nutritionnel est adéquat lorsque les indices nutritionnels DRIS sont proches de zéro. La somme des valeurs absolues des indices nutritionnels permet d'obtenir l'indice de déséquilibre nutritionnel (IND), indice total du stress nutritionnel, qui devrait aussi s'approcher de zéro lorsque le contenu des feuilles est adéquat (Ouimet *et al.*, 2013). Un IND inférieur à 60 correspond à un statut nutritif équilibré, un IND entre 60 et 100 indique un déséquilibre nutritionnel léger, un IND entre 100 et 200 indique un déséquilibre nutritionnel modéré et un IND supérieur à 200 indique un déséquilibre

nutritionnel majeur (Ouimet *et al.*, 2013).

Le calcul du DRIS s'effectue en deux étapes : (1) le calcul des fonctions pour chaque paire d'éléments et (2) la somme des fonctions impliquant chaque nutriment. En imaginant de A à N l'ensemble des nutriments mesurés dans les tissus foliaires, les indices DRIS sont calculés de la façon suivante (Mourão Filho, 2004 ; Walworth et Sumner, 1987) :

$$\text{Indice A} = \frac{[f(A/B) + f(A/C) + f(A/D) \dots + f(A/N)]}{Z}$$

$$\text{Indice B} = \frac{[-f(A/B) + f(B/C) + f(B/D) \dots + f(B/N)]}{Z}$$

$$\text{Indice N} = \frac{[-f(A/N) - f(B/N) + f(C/N) \dots - f(M/N)]}{Z}$$

Quand $A/B \geq a/b$,

$$F(A/B) = \left(\frac{A/B}{a/b} - 1 \right) \frac{1000}{CV}$$

Quand $A/B \leq a/b$,

$$F(A/B) = \left(1 - \frac{a/b}{A/B} \right) \frac{1000}{CV}$$

où A/B est le ratio des nutriments dans les tissus de la plante qu'on cherche à diagnostiquer ; a/b est la valeur optimale ou la norme pour ce ratio ; CV est le coefficient de variation associé à la norme ; et Z le nombre de fonctions composant l'indice nutritionnel. Les normes et les coefficients de variation que nous avons utilisés sont ceux de Lozano et Huynd (1989) pour des érablières en santé (tableau 1).

Tableau 1. Normes DRIS pour les feuilles d'érable à sucre dans la mi-cime et au-dessus de la cime pour N, P, K, Ca et Mg (Lozano et Huynh, 1989).

Ratio	Mi-cime		Au-dessus de la cime	
	Moyenne	Coefficient de variation (CV)	Moyenne	CV
N/K	1,8477	28,37	1,8145	19,830
P/K	0,1842	38,166	-	-
P/Ca	0,1683	38,4	0,1871	37,879
Ca/N	0,7207	50,995	0,6339	48,754
Ca/K	1,2765	50,839	1,1104	48,476
Ca/Mg	8,1205	24,241	7,5975	19,854
Mg/P	0,8384	25,037	-	-
Mg/K	0,1495	32,78	0,1404	35,790

Nous avons comparé nos valeurs de concentrations foliaires en macronutriments avec les concentrations optimales pour la croissance des semis de l'érable à sucre estimées par Ouimet *et al.* (1996) de façon à quantifier la proportion d'individus se situant à l'extérieur des seuils optimaux.

2.4 Analyses statistiques

En utilisant des modèles linéaires à effets mixtes, nous avons testé l'effet de l'application de cendres dans le dispositif 1 sur le pH et les concentrations en nutriments du sol, les concentrations foliaires, les indices nutritionnels DRIS, les variables de taille des semis d'érables à sucre et la croissance des arbres matures. En ce qui concerne le dispositif 2, nous avons testé l'effet d'un traitement généralisé (trois doses de cendres confondues vs témoin) sur les concentrations foliaires, les indices nutritionnels DRIS et la taille des semis d'érable à sucre à l'aide d'un modèle linéaire à effets mixtes (Brooks *et al.*, 2017). Dans les modèles testés, les traitements de cendres et l'année du prélèvement des données ont été considérés comme des effets fixes. Dans les deux dispositifs, les peuplements ont été considéré comme effet aléatoire, sans

distinction entre les parcelles. Lorsque l'effet du traitement était significatif, nous avons comparé les moyennes de différents traitements à l'aide d'un test de Tukey avec une correction de Bonferroni. Un seuil de significativité alpha de 5 % a été considéré dans toutes les analyses.

La normalité des résidus des variables mesurées a été calculée à partir du test de Shapiro–Wilk et par la visualisation par histogramme de la distribution des résidus. Une transformation logarithmique ou racine carrée avec et sans l'ajout d'une constante a été appliquée sur les variables dépendantes qui ne satisfaisaient pas les critères de normalité. Les modèles linéaires à effets mixtes ont été calculés avec la fonction « `glmmTMB` » du progiciel « `glmmTMB` » (Brooks *et al.*, 2017) et les tests de Tukey avec la fonction « `emmeans` » (Lenth, 2019) du progiciel du même nom dans R (version 3.6.0, R Core Team 2019).

3. RÉSULTATS

Dans le dispositif 1, l'application de 20 Mg ha⁻¹ de cendres s'est traduite, 3 ans après l'épandage, par une augmentation du pH ($p = 0,013$) et des concentrations en P ($p > 0,001$), Ca ($p > 0,001$) et Mg ($p = 0,008$) de l'horizon organique (tableau 2). Dans l'horizon minéral, aucun effet significatif du traitement n'a été détecté, bien que le pH ($p = 0,105$) et le contenu en Ca ($p = 0,056$) et Mg ($p = 0,074$) tendaient à être supérieurs sous la fertilisation avec cendres.

Tableau 2. Propriétés chimiques du sol dans les horizons organique et minéral trois ans après l'application de cendres dans 15 érablières du sud-ouest du Québec.

Horizon	Propriété	Année	Témoin	20 Mg cendres ha ⁻¹
Organique	pH	2015 ^a	4,68 (0,28)	4,63 (0,27)
	pH	2018	4,57 (0,76)	5,07 (0,93) *
	C (%)	2018	28,44 (10,38)	27,16 (9,74)
	N (%)	2018	1,68 (0,52)	1,69 (0,64)
	P (mg·kg ⁻¹)	2018	12,19 (10,49)	20,46 (16,29) ***
	K (cmol(+).kg ⁻¹)	2018	0,47 (0,19)	0,55 (0,28)
	Ca (cmol(+).kg ⁻¹)	2018	12,21 (10,70)	24,24 (14,39) ***
	Mg (cmol(+).kg ⁻¹)	2018	3,03 (2,48)	3,92 (2,09) **
Minéral	pH	2015	4,47 (0,53)	4,43 (0,45)
	pH	2018	4,47 (0,60)	4,66 (0,52)
	C (%)	2018	4,09 (2,31)	4,48 (1,58)
	N (%)	2018	0,26 (0,12)	0,30 (0,14)
	P (mg·kg ⁻¹)	2018	2,55 (1,93)	3,70 (3,79)
	K (cmol(+).kg ⁻¹)	2018	0,11 (0,06)	0,11 (0,06)
	Ca (cmol(+).kg ⁻¹)	2018	2,96 (3,25)	3,45 (3,34)
	Mg (cmol(+).kg ⁻¹)	2018	0,68 (0,59)	0,82 (0,82)

^a Année de référence avant l'application des cendres. Les valeurs entre parenthèses expriment l'écart-type de la moyenne. Un ou plusieurs astérisques indiquent une différence significative entre le traitement de cendres et le témoin : * $p < 0,05$; ** $p < 0,01$; *** $p < 0,001$.

La concentration foliaire en Ca ($p < 0,046$) des semis d'érable à sucre sous la fertilisation avec cendres était supérieure à celle du témoin (tableau 3). L'indice DRIS Ca ($p = 0,045$) du traitement avec cendres était supérieur à celui du témoin, suggérant une diminution de la carence en Ca dans le traitement avec cendres. Une tendance inverse a été observée pour l'indice DRIS N ($p = 0,052$), suggérant une diminution de l'excès nutritionnel en N dans le traitement avec cendres. Les valeurs des indices DRIS inférieures à -15 pour le P et le K suggèrent des carences pour ces deux nutriments sous la fertilisation et le témoin (tableau 3). Une majorité des semis présentaient une carence en K (2015 et 2018) et P (2018) ainsi qu'un excès en Mg (2015 et 2018), autant dans les parcelles cendrées que dans les parcelles témoins (figure 4). Les valeurs relativement élevées de l'indice DRIS IND, comprises entre 96 et 131 (tableau 3), suggèrent que les semis d'érable à sucre présentaient un état de déséquilibre nutritionnel modéré, autant dans le traitement avec cendres que dans le témoin, probablement en raison des carences en P et K et du surplus en Mg (figure 4).

Tableau 3. Concentrations foliaires en macronutriments et indices nutritionnels DRIS de semis d'érable à sucre trois ans après l'application de cendres dans 15 érablières du sud-ouest du Québec.

Année	Traitement	Concentrations foliaires (g·kg ⁻¹)					Indice foliaire DRIS					
		N	P	K	Ca	Mg	N	P	K	Ca	Mg	IND
2015 ^a	Témoin	14,1 (2,6)	1,1 (0,3)	4,3 (1,3)	8,8 (2,9)	1,8 (0,5)	17,7 (6,6)	-11,9 (13,2)	-42,7 (22,7)	-6,5 (15,6)	43,4 (19,9)	131,4 (45,4)
	20 Mg ha ⁻¹	14,2 (2,2)	1,1 (0,3)	5,6 (1,4)	8,6 (2,9)	1,6 (0,4)	17,2 (10,4)	-10,1 (12,9)	-37,0 (24,4)	-6,3 (19,0)	36,2 (18,6)	120,5 (46,9)
2018	Témoin	14,6 (2,4)	1,0 (0,2)	5,1 (1,3)	8,4 (2,7)	1,8 (0,3)	15,1 (10,9)	-18,7 (9,3)	-30,1 (21,3)	-10,7 (23,3)	44,4 (15,2)	125,3 (44,0)
	20 Mg ha ⁻¹	14,1 (2,0)	1,1 (0,3)	5,6 (1,5)	9,9* (1,6)	1,9 (0,3)	8,42 (10,5)	-18,2 (10,1)	-25,4 (23,3)	-0,4* (9,27)	35,6 (12,8)	95,7 (45,8)

^a Année de référence avant l'application des cendres. Les valeurs entre parenthèses expriment l'écart-type de la moyenne. IND = indice de déséquilibre nutritionnel. Un astérisque indique une différence significative entre le traitement de cendres et le témoin à $p < 0,05$.

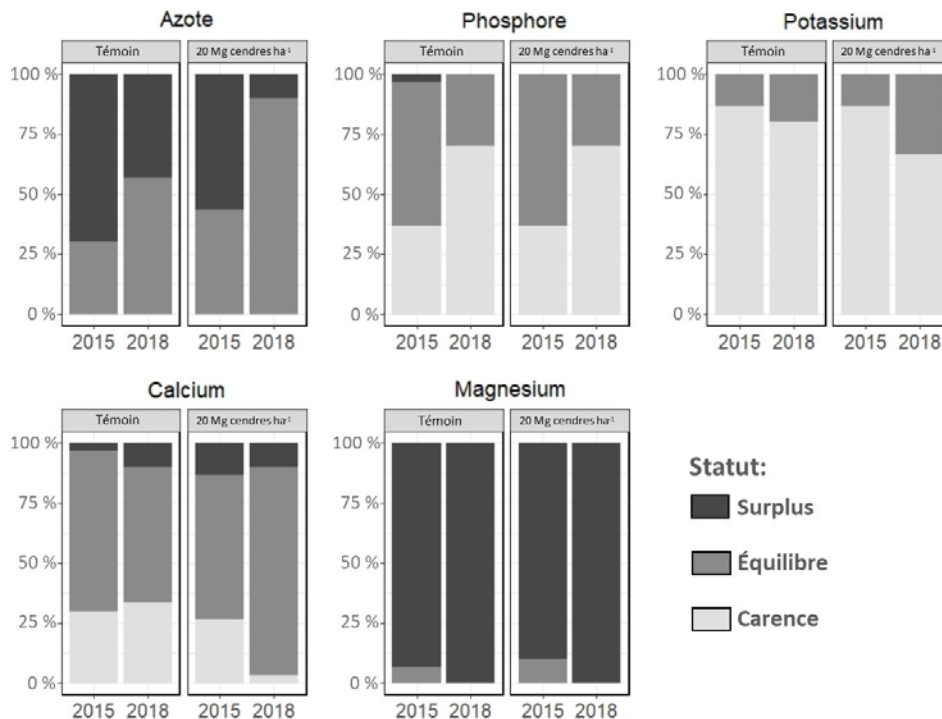


Figure 4. Proportion des semis d'érables à sucre dont l'indice nutritionnel DRIS indique un surplus, un équilibre ou une carence dans 15 érablières du sud-ouest du Québec. Surplus : indice DRIS > 15; Équilibre : $-15 \geq$ indice DRIS \leq 15; Carence : indice DRIS < -15.

La concentration en Mg ($p = 0,03$) des érables à sucre matures sous la fertilisation avec cendres était supérieure à celle du témoin (tableau 4). La concentration foliaire en Ca tendait aussi à être supérieure dans le traitement avec cendres ($p = 0,077$). Un effet significatif du traitement de cendres sur les indices DRIS Ca et DRIS N ($p < 0,05$) a été mesuré. Pour une plus grande proportion d'individus dans le traitement avec cendres, les valeurs se rapprochaient davantage vers l'état d'équilibre nutritionnel en Ca et N (tableau 4, figure 5). La majorité des arbres matures présentaient un état d'équilibre nutritionnel en P (figure 5). Tous traitements confondus, une majorité des arbres matures présentaient un état de carence nutritionnelle en K et un état de surplus en Mg (figure 5). Tout comme les semis, des indices DRIS IND supérieurs à 100 indiquent un déséquilibre nutritionnel modéré dans les deux traitements (tableau 4).

Tableau 4. Concentrations foliaires en macronutriments et indices nutritionnels DRIS des érables à sucre mature trois ans après l'application de cendres dans cinq érablières du sud-ouest du Québec.

Traitement	Concentrations foliaires (g·kg ⁻¹)					Indice foliaire DRIS					
	N	P	K	Ca	Mg	N	P	K	Ca	Mg	IND
Témoin	11,9 (0,82)	0,8 (0,2)	4,7 (1,1)	4,6 (2,1)	0,8 (0,3)	21,8 (12,2)	0,7 (12,1)	-15,2 (15,9)	-24,6 (33,2)	17,3 (13,9)	100,0 (41,3)
20 Mg ha ⁻¹	12,4 (2,2)	0,9 (0,1)	5,2 (2,0)	8,4 (7,3)	1,2* (0,6)	12,8* (13,9)	-18,3 (42,3)	-28,9 (47,4)	9,9* (91,3)	24,4 (33,2)	167,9 (141,3)

Les valeurs entre parenthèses expriment l'écart-type de la moyenne. IND = indice de déséquilibre nutritionnel. Un astérisque indique une différence significative entre le traitement de cendres et le témoin à $p < 0,05$.

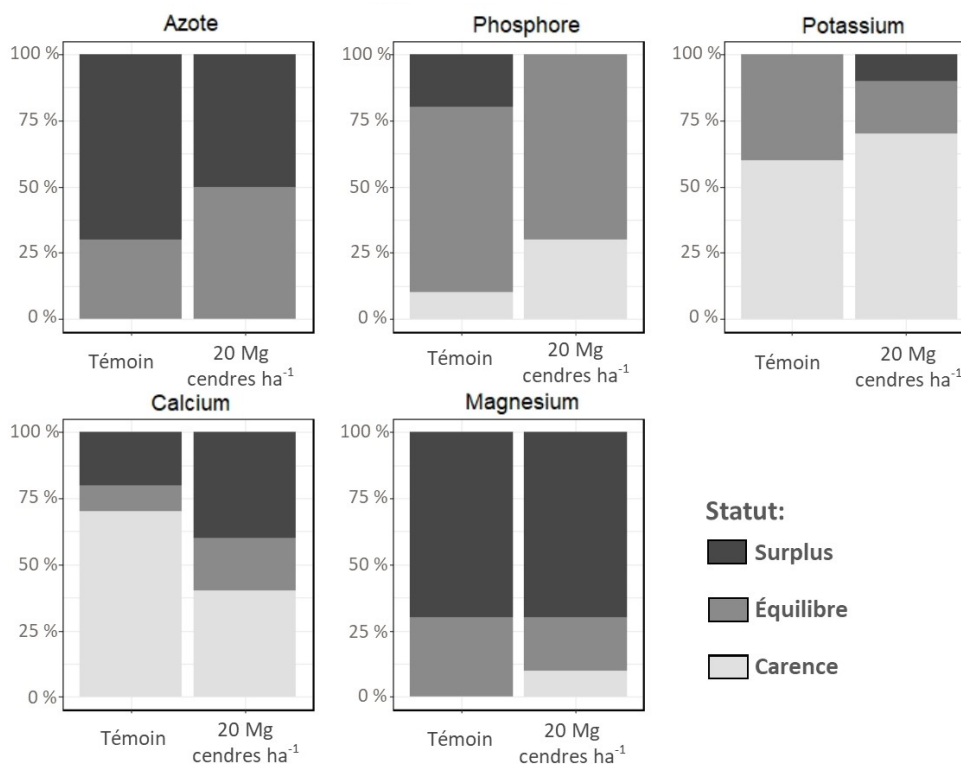


Figure 5. Proportion des érables à sucre matures dont l'indice nutritionnel DRIS indique un surplus, un équilibre ou une carence dans cinq érablières du sud-ouest du Québec. Surplus : indice DRIS > 15; Équilibre : -15 ≥ indice DRIS ≤ 15; Carence : indice DRIS < -15.

Dans le dispositif 1, la taille des semis d'érable à sucre ne différait pas entre les traitements (tableau 5). Une augmentation significative de la croissance radiale des érables à sucre matures a été observée pour les trois années suivant l'application de 20 Mg ha⁻¹ de cendres. En effet, le ratio sous la fertilisation avec cendres était supérieur à celui du témoin en 2016 ($p = 0,002$), 2017 ($p = 0,059$) et 2018 ($p = 0,047$) (tableau 6).

Tableau 5. Taille des semis d'érable à sucre trois ans après l'application de cendres dans 15 érablières dans le sud-ouest du Québec.

Année	Traitement	Hauteur (cm)	Diamètre (mm)
2015 ^a	Témoin	11,4 (3,0)	2,1 (0,7)
	20 Mg ha ⁻¹	11,0 (2,9)	2,0 (0,6)
2018	Témoin	11,8 (3,8)	2,2 (0,7)
	20 Mg ha ⁻¹	11,1 (3,4)	2,2 (0,7)

^a Année de référence avant l'application des cendres. Les valeurs entre parenthèses expriment l'écart-type de la moyenne. Aucune différence significative entre le traitement de cendres et le témoin n'a été détectée à $p < 0,05$.

Tableau 6. Ratio entre la croissance radiale annuelle moyenne de 2005 à 2015, avant l'application d'un traitement de cendres, et la croissance annuelle de 2016, 2017 et 2018 d'érables à sucre matures, après l'application du traitement dans 15 érablières dans le sud-ouest du Québec.

Ratio	Témoin	20 Mg cendres ha ⁻¹
10 ans pré traitement/2016	1,13 (0,72)	1,38 (0,78) **
10 ans pré traitement/2017	1,23 (0,87)	1,36 (0,79)
10 ans pré traitement/2018	1,47 (1,29)	1,60 (1,14) *

Les valeurs entre parenthèses expriment l'écart-type de la moyenne. Un ou deux astérisques dans la rangée indiquent une différence significative entre le traitement de cendres et le témoin : * $p < 0,05$; ** $p < 0,01$.

Dans le dispositif 2, les concentrations foliaires en P ($p = 0,05$), Ca ($p < 0,001$) et Mg ($p = 0,04$) des semis d'érable à sucre dans les traitements de cendres (toutes doses

confondues) étaient supérieures à celles du témoin (tableau 7). Les tests de Tukey ont montré que la concentration foliaire en P dans le traitement de 20 Mg cendres ha⁻¹ était supérieure à celle du témoin. De plus, la concentration en Ca des trois traitements de cendres était supérieure à celle du témoin. La concentration en N dans les traitements de cendres (toutes doses confondues) étaient inférieures à celle du témoin. Les indices DRIS N ($p = 0,03$), DRIS Ca ($p < 0,001$) et DRIS IND ($p = 0,04$) dans les traitements de cendres (toutes doses confondues) étaient significativement différents de ceux du témoin (tableau 7). Les indices DRIS N et DRIS Ca tendaient à être plus près de l'équilibre nutritionnel (i.e. indices = 0) dans les traitements de cendres. L'indice DRIS IND dans les traitements de cendres (toutes doses confondues) était inférieur à celui dans le témoin, indiquant un plus faible déséquilibre nutritionnel dans les parcelles avec cendres. Les indices DRIS K et DRIS Mg suggèrent des carences en K et des excès en Mg dans tous les traitements (tableau 7). Les valeurs relativement élevées de l'indice DRIS IND, comprises entre 99 et 157, suggèrent que les semis d'érable à sucre présentaient un statut de déséquilibre nutritionnel modéré dans tous les traitements, notamment en raison des carences en K.

Tableau 7. Concentrations foliaires en macronutriments et indices nutritionnels DRIS de semis d'érable à sucre 4 ans après l'application de cendres dans quatre érablières du sud-ouest du Québec.

Traitement	Moyennes des concentrations foliaires (g·kg ⁻¹)					Indice foliaire DRIS					
	N [‡]	P [‡]	K	Ca [‡]	Mg [‡]	N [‡]	P	K	Ca [‡]	Mg	IND ^{‡1}
Témoin	13,3 (2,4)	0,8 ^a (0,1)	4,2 (2,1)	5,8 ^a (2,0)	1,3 (0,6)	33,2 ^a (43,3)	-7,3 (32,1)	-40,8 (45,4)	-19,9 ^a (16,5)	34,9 (24,0)	156,8 (111,3)
5 Mg ha ⁻¹	12,5 (1,4)	1,0 ^{ab} (0,3)	4,2 (1,1)	9,3 ^b (2,4)	1,6 (0,3)	10,7 ^a (8,5)	-19,4 (9,9)	-36,7 (19,7)	3,3 ^b (8,2)	42,1 (15,6)	116,4 (47,3)
10 Mg ha ⁻¹	11,4 (2,3)	1,0 ^{ab} (0,2)	4,7 (0,6)	10,7 ^b (2,7)	1,6 (0,3)	6,6 ^a (7,1)	-16,7 (8,2)	-34,3 (14,0)	12,0 ^b (10,4)	32,3 (9,12)	104,4 (33,1)
20 Mg ha ⁻¹	11,1 (1,3)	1,3 ^b (0,3)	4,1 (0,7)	12,3 ^b (1,7)	1,9 (0,3)	1,8 ^b (5,7)	-10,9 (8,9)	-37,1 (13,8)	14,7 ^b (8,3)	31,5 (9,5)	99,7 (32,4)

[‡]Effet significatif de l'application de cendres ($p < 0,05$). Dans une même colonne, les valeurs avec des lettres différentes indiquent une différence significative ($p < 0,05$; test de Tukey avec correction de Bonferroni). Les valeurs entre parenthèses expriment l'écart-type de la moyenne. ¹ IND = indice de déséquilibre nutritionnel.

La hauteur et le diamètre des semis d'érable à sucre dans le témoin ne différaient pas de ceux dans les traitements avec cendres (toutes doses confondues), quatre ans après l'application de cendres (tableau 8).

Tableau 8. Taille des semis d'érable à sucre quatre ans après l'application de cendres dans 4 érablières dans le sud-ouest du Québec.

Traitement	Diamètre (mm)	Hauteur (cm)
Témoin	6,9 (1,4)	84,2 (15,7)
5 Mg ha ⁻¹	6,5 (1,4)	73,2 (17,6)
10 Mg ha ⁻¹	6,5 (1,0)	76,2 (19,1)
20 Mg ha ⁻¹	6,7 (1,5)	84,6 (23,2)

Les valeurs entre parenthèses expriment l'écart-type de la moyenne. Aucune différence significative entre les traitements de cendres et le témoin n'a été détectée à $p < 0,05$.

4. DISCUSSION

4.1 Propriétés chimiques du sol

Dans le dispositif 1, l'amendement en cendres a contribué à augmenter le pH et les concentrations en P, Ca et Mg du sol. Ces augmentations étaient plus importantes dans l'horizon organique que dans l'horizon minéral du sol. Dans le dispositif 2, Royer-Tardif *et al.* (2019) ont obtenu des résultats similaires, deux ans après l'application des traitements d'amendement en cendres. Le changement rapide de pH suite à l'application des cendres s'explique par la dissolution des cations basiques de la cendre (Ca^{2+} et Mg^{2+}) et la réaction de ceux-ci avec les ions qui génèrent l'acidité du sol (H^+ , Al^{3+}), en particulier dans l'horizon de surface (0-10 cm) (Augusto *et al.*, 2008 ; Brais *et al.*, 2015 ; Indiramma *et al.*, 2020). Lorsque les cendres sont appliquées à la surface des sols forestiers (au lieu d'être mélangées au sol), la dissolution des cations basiques est lente et leurs effets sur l'horizon minéral peut prendre plusieurs années. Par exemple, Callesen *et al.* (2007) ont observé que 65% du Ca, du Mg et du K et 81% du P persistaient dans les cendres à la surface du sol, 7 ans après leur application dans des forêts au Danemark. Brais *et al.* (2015) ont détecté des effets sur le sol minéral 8 ans après l'application de cendres en Abitibi, au Québec. L'augmentation du pH de 0,5 unité dans l'horizon organique suite à l'application de 20 Mg ha⁻¹ de cendres est conforme avec les résultats de deux méta-analyses (Augusto *et al.*, 2008 ; Reid et Watmough, 2014). Les principales implications de l'augmentation du pH des sols acides et peu fertiles pour la nutrition des arbres est l'augmentation de la biodisponibilité du N, du P et des cations basiques, et, inversement, de la diminution de l' Al^{3+} et de son effet antagoniste sur le prélèvement des cations basiques (Bigelow et Canham 2002 ; Deforest *et al.*, 2012 ; Ouimet et Camiré, 1995).

Le Ca, le constituant le plus dominant des cendres (25-30% CaO), est l'élément qui a le plus augmenté suite à la fertilisation en cendres, ce qui est en accord avec les observations présentées dans les méta-analyses d'Augusto *et al.* (2008) et de Reid et Watmough (2014). Parmi les macronutriments essentiels à la nutrition des arbres tels que le N, le P et le Ca, ce dernier serait le principal facteur limitant la croissance de l'érable à sucre sur les sols acides (St.Clair *et al.*, 2008 ; Vadeboncoeur *et al.*, 2010). L'accroissement de la disponibilité du Ca dans les sols acides entraîne généralement une augmentation de la capacité d'assimilation de CO₂ dans les feuilles et de l'efficacité d'utilisation de l'azote dans la photosynthèse chez l'érable à sucre (Ellsworth et Liu, 1994).

Le Mg a aussi augmenté dans l'horizon organique du sol suite à la fertilisation en cendres de façon similaire à ce qui a été observé dans d'autres études, notamment en forêts boréales (Augusto *et al.*, 2008 ; Saarsalmi *et al.*, 2004, 2005). La fertilisation en cendres des sols forestiers acides, en augmentant la disponibilité du Ca et Mg dans le sol, peut augmenter les concentrations de ces éléments dans les racines fines des arbres (Brunner *et al.*, 2004). L'augmentation de la disponibilité du Ca et du Mg dans les sols peut aussi contribuer à limiter les symptômes de dépérissement de la cime et à augmenter la production de racines fines (Adams et Hutchinson, 1992 ; Brunner *et al.*, 2004) et le taux de reproduction des érables à sucre matures (Long *et al.*, 1997). Les implications d'une augmentation en Ca et Mg dans le sol suite à l'amendement en cendres sont donc importantes pour la productivité et la santé des érablières. Ce résultat est sans doute un déterminant important de l'augmentation à court terme de la croissance des érables matures observée dans le dispositif 1.

Dans le dispositif 1, la concentration en P dans l'horizon organique a significativement augmenté dans le traitement de cendres de 20 Mg ha⁻¹. Les études ayant évalué l'effet des cendres sur la disponibilité du P dans les sols forestiers ont montré des résultats

contradictoires (Augusto *et al.*, 2008 ; Lundström *et al.*, 2003 ; Pitman, *et al.*, 2006). Certains auteurs décrivent le P comme étant très insoluble et donc peu accessible aux plantes (Augusto *et al.*, 2008 ; Vassilev *et al.*, 2013). Des études réalisées en Amérique du Nord indiquent des augmentations à court terme du P disponible dans le sol suite à des amendements en cendres (Pugliese *et al.*, 2014), tandis que d'autres non (Brais *et al.*, 2015 ; Royer-Tardif *et al.*, 2019).

Le K est le seul nutriment présent en grande quantité dans la cendre (15 g K kg⁻¹ de cendres) qui n'a pas significativement augmenté dans le sol suite au traitement d'amendement dans le dispositif 1. Or, l'application de la cendre augmente habituellement la réserve de K dans le sol (Augusto *et al.*, 2008 ; Brais *et al.*, 2015 ; Noyce *et al.*, 2016). Il est possible que l'absence d'effet des cendres, trois ans après leur application, soit attribuable à la solubilité élevée du K à court terme (un an ou moins), à sa grande mobilité et sa plus faible affinité chimique que le Ca²⁺ et le Mg²⁺ (composante principale de la cendre et de la chaux) sur les sites d'échanges du sol, ce qui prédispose le K au lessivage (Augusto *et al.*, 2008 ; Baxter *et al.*, 1998 ; Mellbo *et al.*, 2008 ; Sarenbo et Claesson 2004). En effet, selon ces derniers auteurs, peu importe la forme de la cendre (granule ou *fly ash*) ou de son origine, les deux principales formes de K issu de la combustion de la matière première, soluble dans l'eau (i.e. sous forme de sel) et sous forme d'ion échangeable, demeurent sensibles au lessivage.

Le C et le N dans la cendre se retrouvent à des concentrations aussi faibles que 2,5 mg g⁻¹ et ≤ 1 mg g⁻¹, respectivement (Augusto *et al.*, 2008). Cela peut s'expliquer par le fait que le C et le N présentent une température d'évaporation très basse et sont libérés sous forme de composés gazeux lors de la combustion de la matière première en cendre (Baxter *et al.*, 1998 ; Demeyer *et al.*, 2001 ; Augusto *et al.*, 2008). De ce fait, la fertilisation en cendres n'a eu aucun impact significatif à court terme (3 ans après l'application) sur les concentrations en C et N dans le sol, ce qui est conforme à

plusieurs autres études réalisées majoritairement en forêts boréales (Augusto *et al.*, 2008).

4.2 Nutrition foliaire des érables à sucre

Nous avons mesuré une augmentation des concentrations foliaires en Ca des érables à sucre (stades semis et mature) et de leurs indices DRIS Ca à des valeurs plus proches de 0 suite aux différents traitements de cendres. Parallèlement, une diminution de la proportion d'individus en situation de carence en Ca a été observée. L'augmentation du Ca foliaire peut provenir de l'augmentation du pool de Ca dans le sol résultant de l'amendement et d'une plus grande biodisponibilité du Ca suite à l'augmentation du pH du sol. La diminution des carences foliaires en Ca peut contribuer à optimiser les fonctions photosynthétiques de l'érable à sucre, tout en limitant la mortalité de ses racines et le dépérissement de ses parties aériennes (Ellsworth et Lui, 1994 ; Watmough, 2010 ; Wilmot *et al.*, 1995).

Dans toutes les parcelles, les indices DRIS ont révélé des carences foliaires en K (semis et arbres matures dans les deux dispositifs) et P (semis du dispositif 1). De telles carences ont aussi été observées dans plusieurs autres érablières au Québec (Bernier et Brazeau, 1988a ; Masson *et al.*, 2019), en Ontario (Gardowski et Thomas, 2006) et au nord-est des États-Unis (Aber *et al.*, 1998 ; Long *et al.*, 2009). Des carences persistantes à long terme en P et K peuvent contribuer au dépérissement des érablières (Bernier et Brazeau, 1988a, 1988c). L'une des possibles causes des carences en K et P dans les érablières échantillonnées serait le résultat du lessivage progressif du K et P induit par les dépositions de polluants atmosphériques acides de différentes origines spatio-temporelles (Aber *et al.*, 1998 ; Long *et al.*, 2009 ; Ouimet et Duchesne, 2010). Dans ce sens, l'effet antagoniste entre le K et le Ca ou le Mg (en surplus chez la majorité des érables à sucre échantillonnés) contribue fort probablement à réduire le prélèvement et

à accroître la carence en K des érables à sucre (Marschner, 2011 ; Ouimet et Camiré, 1995). L'augmentation du P dans l'horizon organique suite à la fertilisation en cendres ne s'est pas traduite par une augmentation de la concentration foliaire en P des érables à sucre. La nature acide des sols forestiers ($\text{pH} \approx 4,5-5,0$) dans la région de notre étude a probablement fortement limité l'accessibilité du P pour les érables à sucre, même dans les parcelles amendées en cendres (Compton et Cole, 2001). À de tels pH, dans le sol minéral, le P évolue vers des formes peu solubles (rétroversion) par réaction de P avec les phases solides secondaires de Al, de Fe et de Mn (Marschner, 2011).

La concentration foliaire en N n'a pas été affectée par la fertilisation en cendres dans les deux dispositifs. Toutefois, les indices DRIS N indiquent que les traitements d'amendements en cendres ont provoqué une diminution des excès en N vers l'équilibre nutritionnel dans les semis et les arbres matures d'érable à sucre. Ainsi, dans le dispositif 1, la proportion d'érables à sucre présentant un indice DRIS N en équilibre a augmenté de 20% (stade mature) à 25% (stade semis) dans le traitement d'amendement en cendres. Dans l'est de l'Amérique du Nord, les forêts feuillues ont longtemps été considérées comme limitées en N, mais l'augmentation d'apports en N atmosphérique à travers les activités anthropiques a entraîné un changement de tendance (Gardowski et Thomas, 2006 ; Vitousek *et al.*, 1997). Une proportion importante des érablières situées dans le sud-ouest du Québec reçoit des dépôts de N atmosphérique supérieurs à $8 \text{ kg ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$ (Ouimet et Duchesne, 2009). Ces dépôts sont proches des charges critiques de saturation en N des forêts tempérées qui varient généralement entre 10 et $15 \text{ kg ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$ (Bobbink *et al.*, 2010). Ainsi, l'accumulation chronique de N dans les sols des érablières échantillonnées au cours des dernières décennies peut expliquer l'excès en N foliaire qui a été mesuré dans les érables à sucre des parcelles témoin des deux dispositifs de la présente étude (Bobbink *et al.*, 2010; Hendershot et Jones 1989). La réduction de l'excès de l'indice DRIS N des semis à la suite de la fertilisation en cendres peut être attribuable en grande partie à l'augmentation importante du Ca foliaire dans le calcul du ratio Ca:N utilisé dans les

analyses DRIS. Ces dernières utilisent aussi le ratio N:K, mais celui-ci variait très peu entre le témoin et les traitements de cendres.

4.3 Croissance des érables à sucre

Une augmentation à court terme de la croissance radiale des arbres matures a été observée, ce qui confirme notre hypothèse. Il s'agit d'un résultat inédit, où on observe, pour la toute première fois, une augmentation significative de la croissance à court terme (1-3 ans) d'érables à sucre matures suite à un amendement avec des cendres dans un contexte opérationnel d'aménagement forestier. En forêt boréale, on a observé généralement (sauf en sols organiques) peu d'effets à court terme (ex. 1 à 5 ans après traitement) des cendres sur la croissance des arbres matures (Brais *et al.*, 2015 ; Hannam *et al.*, 2018).

Dans la même région de notre étude, Ouimet *et al.* (2018) ont observé un effet positif et significatif, après cinq ans d'un amendement composé de 8 Mg ha⁻¹ de boue de chaux et de 15 Mg ha⁻¹ de biosolides papetiers (fournissant au total 4629 kg ha⁻¹ de Ca, 161 kg ha⁻¹ d'N, 85 kg ha⁻¹ de P et 13 kg ha⁻¹ de K) sur l'accroissement en surface terrière d'érables à sucre matures dans des peuplements éclaircis (gain de 35 % par rapport aux arbres non amendés). Les doses de Ca apportées dans l'étude de Ouimet *et al.* (2018) étaient comparables à celles de notre étude (4000 kg ha⁻¹ de Ca). Les auteurs ont aussi observé que la croissance du bouleau jaune et du hêtre à grandes feuilles n'a pas réagi à l'amendement. Il serait intéressant que des travaux de recherche futurs soient déployés pour vérifier si la croissance de l'érable à sucre réagit davantage à l'amendement en cendres par rapport à celle d'autres essences commerciales compagnes typiquement retrouvées dans les érablières.

Il est connu que les érables à sucre matures mobilisent davantage leurs ressources en Ca pour la croissance et la reproduction lorsqu'ils sont fertilisés avec des matières fertilisantes riches en Ca (Halman *et al.*, 2013). De plus, tel que souligné plus haut, le Ca est généralement le principal facteur limitant la croissance de l'érable à sucre sur des sols acides (St.Clair *et al.*, 2008 ; Vadeboncoeur *et al.*, 2010). Sur la base de ces principes, nos résultats suggèrent donc que la fertilisation en cendres a favorisé la croissance des érables à sucre matures, notamment grâce à l'augmentation du pool de Ca dans le sol. Il est aussi possible que l'augmentation du pH du sol suite à l'amendement en cendres ait contribué à stimuler la diversité et la quantité de la colonisation des érables à sucre par des champignons endomycorhiziens, améliorant ainsi leur capacité de prélèvement en éléments nutritifs et en eau et leur résistance face à des stress abiotiques et biotiques (Bang-Andreasen *et al.*, 2017, 2019 ; Coughlan *et al.*, 2000 ; Noyce *et al.*, 2016).

Bien que les semis d'érable à sucre des parcelles fertilisées avec de la cendre aient un indice de déséquilibre nutritionnel plus proche de 0 (i.e. équilibre nutritionnel) que ceux des parcelles témoins, les traitements de cendres n'ont eu aucun effet significatif sur leur taille en hauteur et diamètre. Généralement, la croissance des semis d'érable à sucre dépend grandement de la disponibilité de N dans le sol (Walter et Reich, 1997, 2000) et de l'ouverture de la canopée pour la lumière (Beaudet et Messier, 1998 ; Collin *et al.*, 2017 ; Matonis *et al.*, 2011). Or, les cendres ne sont pas une source significative de N et les semis suivis dans cette étude se sont développés sous un couvert forestier généralement fermé. Certaines études ont montré que les coupes partielles ont des effets plus prononcés sur la croissance des semis d'érable à sucre que les traitements de fertilisation et de chaulage forestier (Bédard *et al.*, 2018; Gasser *et al.*, 2010).

CONCLUSION

Nous avons émis l'hypothèse que l'amendement en cendres dans les érablières se développant sur les sols acides et peu fertiles améliore à court terme la fertilité du sol, en augmentant son pH et son contenu en éléments nutritifs, ainsi que le statut nutritionnel foliaire et la croissance de l'érable à sucre aux stades de semis et à l'âge de la maturité. Cette hypothèse a été en bonne partie confirmée par nos résultats. Dans le dispositif 1, nous avons mesuré une augmentation significative du pH et des concentrations de P, de Ca et de Mg dans l'horizon organique du sol, trois ans après l'application de 20 Mg ha⁻¹ de cendres. Dans l'horizon minéral, aucun effet significatif de ce traitement d'amendement en cendres n'a été mesuré, bien que le pH et les concentrations en Ca et Mg tendaient à être supérieures dans les parcelles ayant reçu 20 Mg ha⁻¹ de cendres. Autant dans le dispositif 1 (après 3 ans) que dans le dispositif 2 (après 4 ans), les concentrations foliaires en Ca des semis d'érables à sucre dans les parcelles ayant reçu un amendement de cendres, indépendamment de la dose (5 à 20 Mg ha⁻¹), étaient significativement supérieures à celles des semis des parcelles non amendées. Dans le dispositif 1, un effet positif du traitement de cendres sur la concentration foliaire en Mg et Ca des érables à sucre matures a été observé. Les diagnostics nutritionnels à l'aide de l'approche DRIS ont révélé que les différents amendements de cendres étaient associés à une diminution de la carence en Ca et de l'excès en N des érables à sucre (stades semis et mature). Dans le dispositif 2, les semis dans les parcelles amendées avec des cendres, indépendamment de la dose, présentaient un bilan nutritionnel davantage équilibré que les semis des parcelles non amendées. Dans les deux dispositifs, tous traitements confondus, autant chez les semis que les arbres matures, une majorité des érables à sucre échantillonnés présentaient un état de carence nutritionnelle en K et un état de surplus en Mg, ce qui pourrait entraîner une

baisse marquée de la productivité dans les prochaines années si cet état nutritionnel n'est pas amélioré. Une augmentation de la croissance radiale des érables à sucre mature a été observée pour les trois années suivant l'application de la fertilisation en cendres. Par contre, dans les deux dispositifs, les amendements en cendres n'ont eu aucun effet significatif sur la taille des semis d'érables à sucre, possiblement car leur croissance était davantage limitée par la disponibilité de la lumière que par la fertilité du sol.

Nos résultats suggèrent que la fertilisation en cendres constitue une bonne pratique pour contrer l'acidification des sols et la perte de certains cations basiques engendrée par les dépôts atmosphériques acides qui ont particulièrement affecté la région étudiée et le sud du Québec en général. La fertilisation en cendres permet aussi de retourner progressivement les éléments nutritifs retirés par la récolte forestière vers le sol forestier. Malgré l'absence de N dans la cendre, l'analyse nutritionnelle DRIS indique que les cendres permettent d'équilibrer certains ratios nutritifs foliaires. Dans le contexte de l'aménagement forestier, cela signifie que la cendre pourrait être une alternative de choix à la chaux dans les forêts tempérées de l'Amérique du Nord. L'application de chaux demeure une pratique onéreuse en raison du coût grandissant lié à l'extraction et au transport de cet intrant. La forte concentration en Ca dans la cendre permet aux érables à sucre matures d'orienter leurs ressources davantage vers la croissance. L'augmentation en Ca est prometteuse pour éliminer ou diminuer la perte de croissance observée dans les peuplements d'érables à sucre en dépérissement dans plusieurs régions de l'est de l'Amérique du Nord. Nos résultats suggèrent que la fertilisation avec les cendres pourrait être utilisée afin d'accentuer la croissance des peuplements d'érables à sucre négativement affectés par les dépôts atmosphériques. L'interaction entre les coupes forestières communément préconisées en forêt feuillue et la fertilisation en cendres devrait être davantage étudiée, notamment pour connaître son effet sur la régénération des peuplements d'érables à sucre ainsi que sur les communautés de champignons mycorrhiziens.

Certaines limites inhérentes à notre approche méthodologique se doivent d'être soulignées. L'analyse DRIS privilégiée pour diagnostiquer le statut nutritionnel des semis d'érable à sucre a utilisé des normes nutritionnelles d'érables à sucre matures, car les normes pour les semis ne sont pas encore établies. Considérant que les semis et les arbres matures peuvent avoir des besoins nutritionnels différents, cette contrainte peut avoir apporté des biais dans les résultats de nos analyses. Il serait utile que des travaux de recherche futurs soient déployés pour développer des normes DRIS spécifiques aux semis. L'utilisation des méthodes d'analyse nutritionnelle CND et CND-*ilr*, pourrait être utilisée pour confirmer/infirmier les résultats des semis d'érable à sucre obtenus avec DRIS. Par ailleurs, nous reconnaissons que le nombre de sites et d'individus d'érables à sucre matures échantillonnés pour des fins d'analyses foliaires en nutriments est faible. Un suivi à moyen et long terme du dispositif 1, établi dans un contexte opérationnel, pourrait aussi apporter des résultats plus précis sur l'effet temporel de la fertilisation de la cendre dans les érablières. Différents taux d'amendement en cendres pourraient aussi être évalués dans de nouveaux dispositifs expérimentaux établis dans un contexte opérationnel afin de déterminer un dosage optimal pour la croissance des érables à sucre, à différents stades de leur développement. Il serait aussi intéressant de mieux connaître l'effet de la fertilisation en cendres sur la végétation de sous-bois, particulièrement sur les espèces envahissantes de la strate de sous-bois (e.g. fougères, hêtre à grandes feuilles) qui sont reconnues pour inhiber la croissance et la régénération des semis d'érables à sucre.

Dans le futur, il serait intéressant de valoriser le dispositif 1 afin de déterminer les effets de l'amendement en cendres sur certaines variables physiologiques des érables à sucre comme le statut hydrique, le taux de photosynthèse, la production printanière de sève brute (ou coulée), la production de samares et la régénération. Un suivi à moyen et long terme de la croissance des érables à sucre dans ce dispositif permettra de mieux mettre en perspective le potentiel de l'amendement en cendres en forêt tempérée

comparativement à celui dans d'autres biomes forestiers, notamment en forêt boréale, où les connaissances sont plus approfondies.

LISTE DES RÉFÉRENCES

- Aber, J.D., McDowell, W., Nadelhoffer, K., Magill, A., Berntson, G., Kamakea, M., McNulty, S., Currie, E., Rustad, L., et Fernandez, I. (1998). Nitrogen saturation in temperate forest ecosystems - Hypotheses revisited. *Bioscience*, 48, 921-934.
- Aber J.D., Goodale C.L., Ollinger S.V., Smith M.L., Magil, A.H., Martin, M.E., Richard, H., et John, S. (2003). Is nitrogen deposition altering the nitrogen status of northeastern forests? *Bioscience*, 53, 375–389.
- Adams, C.M., et Hutchinson, T.C. (1992). Fine-root growth and chemical composition in declining central Ontario sugar maple stands. *Canadian Journal of Forest Research*, 22, 1489-1503.
- Aherne, J., et Posch, M. (2013). Impacts of nitrogen and sulphur deposition on forest ecosystem services in Canada. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 5, 108-115.
- Augusto, L., Bakker, M.R., et Meredieu, C. (2008). Wood ash applications to temperate forest ecosystems - Potential benefits and drawbacks. *Plant and Soil*, 306, 181-198.
- Bailey, J.S., Beattie, J.A.M., et Kilpatrick, D.J. (1997). The diagnosis and recommendation integrated system (DRIS) for diagnosing the nutrient status of grassland swards: I. Model establishment. *Plant and Soil*, 197, 127-135.
- Bailey, S.W., Horsley, S.B., Long, R.P., et Hallett, R.A. (2004). Influence of edaphic factors on sugar maple nutrition and health on the Allegheny plateau. *Soil Science Society of America Journal*, 68, 243-252.
- Bailey, S.W., Long, R.P., et Horsley, S.B. (2019). Comment on “Long-term decline of sugar maple following forest harvest, Hubbard Brook Experimental Forest, New Hampshire”. *Canadian Journal of Forest Research*, 49, 861–862.
- Bang-Andreasen, T., Nielsen, J.T., Voriskova, J., Heise, J., Rønn, R., Kjøller, R., Hansen, H.C.B., et Jacobsen, C.S. (2017). Wood ash induced pH changes strongly affect soil bacterial numbers and community composition. *Frontiers in Microbiology*, 8, 1-14.
- Bauce, E., et Allen, D.C. (1991). Etiology of sugar maple decline. *Canadian Journal of Forest Research*, 21, 686-693.

- Baxter, L.L., Miles, T.T., Miles, Jr.T.R., Jenkins, B.M., Milne, T., Dayton, D., Bryers, R.W., et Oden, L.L. (1998). The behavior of inorganic material in biomass-fired power boilers: field and laboratory expériences. *Fuel Processing Technology*, 54, 47–78.
- Beaudet, M., et Messier, C. (1998). Growth responses of yellow birch, sugar maple and beech seedlings under a light gradient. *Canadian Journal of Forest Research*, 28, 1007-1015.
- Bélangier, N. Côté, B., Courchesne, F., Fyles J.W., Warfvinge, P., et Hendershot, W.H. (2002). Simulation of soil chemistry and nutrient availability in a forested ecosystem of southern Quebec — I. Reconstruction of the timeseries files of nutrient cycling using the Makedep model. *Environmental Modelling and Software*, 17, 427–445.
- Bélangier, N., et Van Rees, K.C.J. (2008). Chapter 2 : Sampling forest soils, soil sampling and methods of analysis, Dans Carter, M.R., et Gregorich, E.G., *Soil sampling and methods of analysis*, Taylor and Francis, Boca Raton, 15-24.
- Bernier, B., et Brazeau, M. (1988a). Foliar nutrient status in relation to sugar maple dieback and decline in the Quebec Appalachians. *Canadian Journal of Forest Research*, 18, 754-763.
- Bernier, B., et Brazeau, M. (1988b). Magnesium deficiency symptoms associated with sugar maple dieback in a Lower Laurentians site in southeastern Quebec. *Canadian Journal of Forest Research*, 18,1265-1275.
- Bernier B., et Brazeau, M. (1988c). Nutrient deficiency symptoms associated with sugar maple dieback and decline in the Quebec Appalachians. *Canadian Journal of Forest Research*, 18, 762–767.
- Beverly, R.B. (1987). Comparison of DRIS and alternative nutrient diagnostic methods for soybean. *Journal of Plant Nutrition*, 10, 901-920.
- Bigelow. S.W., et Canham, C.D. (2002). Community organization of tree species along soil gradients in a north-eastern USA forest. *Journal of Ecology*, 90, 188-200.
- Bishop, D.A., Beier, C.M., Perderson, N., Lawrence, G.B., Stella, J.C., et Sullvian, T.J. (2015). Community organization of tree species along soil gradients in a north-eastern USA forest. *Ecosphere*, 6, 1-24.
- Bobbink, R., Hicks, K., Galloway, J., Spranger, T., Alkemade, R., Ashmore, M., Bustamante, M., Cinderby, S., Davidson E., Dentener, F., Emmett, B., Erisman, J-W., Fenn, M., Gilliam, F., Nordin, A, Pardo, L., et De Vries, W. (2010). Global assessment of nitrogen deposition effects on terrestrial plant diversity. *Ecological Applications*, 20, 30-59.

- Bougnom, B., Knapp, B., Francois, Z., et Insam, H. (2011). Possible use of wood ash and compost for improving acid tropical soils. Dans Heribert I., et Knapp, A.B. Recycling of biomass ashes. Springer, Berlin, Heidelberg, 87-105.
- Brais, S., Bélanger, N., et Guillemette, T. (2015). Wood ash and N fertilization in the Canadian boreal forest: Soil properties and response of jack pine and black spruce. *Forest Ecology and Management*, 248, 1-14.
- Brooks, M.E., Kristensen, K., Van Benthem, K.J., Magnusson, A., Berg, C.W., Nielsen, A., Skaug H.J., Maechler M., et Bolker, B.M. (2017). glmmTMB balances speed and flexibility among packages for zero-inflated generalized linear mixed modeling. *The R Journal*, 9, 378-400.
- Brunner, I., Zimmerman, S., Zingg, A., et Blaser, P. (2004). Wood-ash recycling affects forest soil and tree fine-root chemistry and reverses soil acidification. *Plant and Soil*, 267, 61–71.
- Burke, M.K., et Raynal, D.J. (1998). Liming influences growth and nutrient balances in sugar maple (*Acer saccharum*) seedlings on an acidic forest soil. *Environmental and Experimental Botany*, 39, 105-116.
- Callesen, I., Ingerslev, M. et Raulund-Rasmussen, K. (2007). Dissolution of granulated wood ash examined by in situ incubation: effects of tree species and soil type. *Biomass and Bioenergy*, 31, 693–699.
- Cann, D.B., et Lajoie, P.G. (1943). Étude des sols des comtés de Stanstead, Richmond, Sherbrooke et Compton dans la Province de Québec. *Bulletin Technique*, 45, 1-69.
- Chagnon, M., Paré, D., Hébert, C., et Camiré, C. (2001). Effects of experimental liming on collembolan communities and soil microbial biomass in a southern Quebec sugar maple (*Acer saccharum* Marsh.) stand. *Applied Soil Ecology*, 17, 81-90.
- Charron, G., Robichaud-Courteau, T., La Vigne, H., Weintraub, S., Hill, A., Justice, D., Bélanger N, et Lussier Desbiens, A. (2020). The DeLeaves: A UAV device for efficient tree canopy sampling, *Journal of Unmanned Vehicle*, *Accepté*, 20p.
- Collin, A., Messier, C., Côté, B., Fontana, M., et Bélanger, N. (2016). Contrasting nutritional acclimation of sugar maple (*Acer saccharum* Marsh.) and red maple (*Acer rubrum* L.) to increasing conifers and soil acidity as demonstrated by foliar nutrient balances. *Frontiers in Ecology and Evolution*, 4, 1-12.
- Collin, A., Messier, C., Kembel, S., et Bélanger, N. (2017) Low light availability associated with american beech is the main factor for reduced sugar maple seedling survival and growth rates in a hardwood forest of southern Quebec. *Forest*, 8, 1-13.

- Compton, J.E., et Cole, D.W. (2001). Fate and effects of phosphorus additions in soils under N₂-fixing red alder. *Biogeochemistry*, 53, 225–247.
- Coughlan, A.P., Dalpé, Y., Lapointe, L., et Piché, Y. (2000). Soil pH-induced changes in root colonization, diversity, and reproduction of symbiotic arbuscular mycorrhizal fungi from healthy and declining maple forests. *Canadian Journal of Forest Research*, 30, 1543-1554.
- da Costa, T.P., Quinteiro, P., Tarelho, L.A., Arroja, L., et Dias, A.C. (2020). Life cycle assessment of woody biomass ash for soil amelioration. *Waste Management*, 101, 126-140.
- Deforest, J.L., Smemo, K.A., Burke, D.J., Elliott, H.L., et Becker, J.C. (2012) Soil microbial responses to elevated phosphorus and pH in acidic temperate deciduous forests. *Biogeochemistry*, 109, 189–202.
- Demeyer A., Voundi Nkana, J.C., et Verloo, M.G. (2001). Characteristics of wood ash and influence on soil properties and nutrient uptake: an overview. *Bioresource Technology*, 77, 287-295.
- Domes, K.A., Zeeuw, T.D., Massicotte, H.B., Elkin, C., McGill, W.B., Jull, M.J., Chisholm, C.E., et Rutherford, P.M. (2018). Short-term changes in spruce foliar nutrients and soil properties in response to wood ash application in the sub-boreal climate zone of British Columbia. *Canadian Journal of Soil Science*, 98, 246-263.
- Duarte, N., Pardo, L.H., et Robin-Abbott, M.J. (2013). Susceptibility of forests in the northeastern USA to nitrogen and sulfur deposition: Critical load exceedance and forest health. *Water, Air, and Soil Pollution*, 224, 1354-1372.
- Duchesne, L., Ouimet, R., et Houle, D. (2002). Basal area growth of sugar maple in relation to acid deposition, stand health, and soil nutrients. *Journal of Environmental Quality*, 31, 1676-1683.
- Duchesne L, Ouimet, R., Moore, J.M., et Paquin, R. (2005). Changes in structure and composition of maple-beech stands following sugar maple decline in Québec, Canada. *Forest Ecology and Management*. 208, 223-236.
- Ellsworth, D.S., et Liu, X. (1994). Photosynthesis and canopy nutrition of four sugar maple forests on acid soils in northern Vermont. *Canadian Journal of Forest Research*. 24, 2118–2127.
- Emilson, C.E., Hannam, K., Aubin, I., Basiliko, N., Bélanger, N., Brais, S., Diochon, A., Fleming, R.L., Jones, T., Kabzems, R., Laganière, J., Markham, J., Morris, D., Rutherford, P.M., Van Rees, K., Venier, L., Webster, K., et Hazlett, P.W. (2018). Synthèse des dispositifs et méthodes de recherche d'AshNet et

- recommandations en vue d'un protocole normalisé. Ressources naturelles Canada, Service canadien des forêts.
- European Commission. (2001). Integrated Pollution Prevention and Control (IPPC). Reference document on best available techniques in the cement and lime manufacturing industries.
- Gasser, D., Messier, C., Beaudet, M., et Lechowicz, M.J. (2010). Sugar maple and yellow birch regeneration in response to canopy opening, liming and vegetation control in a temperate deciduous forest of Quebec. *Forest Ecology and Management*, 259, 2006-2014.
- Gradowski, T., et Thomas, S.C. (2006). Phosphorus limitation of sugar maple growth in central Ontario. *Forest Ecology and Management*, 226, 104-109.
- Gendreau-Berthiaume, B., Kneeshaw, D.D., et Harvey, B.D. (2012). Effects of partial cutting and partial disturbance by wind and insects on stand composition, structure and growth in boreal mixedwoods. *Forestry*, 85, 551-565.
- Halman, J.M., Schaberg, P.G., Hawley, G.J., Pardo, L.H., et Fahey, T.J. (2013). Calcium and aluminum impacts on sugar maple physiology in a northern hardwood forest. *Tree Physiology*, 33, 1242-1251.
- Hane, E.N. (2003). Indirect effects of beech bark disease on sugar maple seedling survival. *Canadian Journal of Forest Research*, 33, 807-813.
- Hannam, K.D., Deschamps, C., Kwiaton, M., Venier, L. et Hazlett, P.W. (2016). Regulations and guidelines for the use of wood ash as a soil amendment in Canadian forests. Natural Resources Canada, Canadian Forest Service, 53p.
- Hannam, K.D., Venier, L., Allen, D., Deschamps, C., Hope, E., Jull, M., Kwiaton, M., McKenney, D., Rutherford, P.M., et Hazlett, P.W. (2018). Wood ash as a soil amendment in Canadian forests: what are the barriers to utilization? *Canadian Journal of Forest Research*, 48, 442-450.
- Hansen, M., Kepfer-Rojas, S., Bjerager, P.E.R., Holm, P. E., Skov, S., et Ingerslev, M. (2018). Effects of ash application on nutrient and heavy metal fluxes in the soil and soil solution in a Norway spruce plantation in Denmark. *Forest Ecology and Management*, 424, 494-504.
- Hébert, M., et Breton, B. (2008). Recyclage des cendres de bois. Impacts sur les sols et le rendement des grandes cultures. *Agro Solution*, 19, 18-33.
- Hendershot, W.H., et Jones, A.R.C. (1989). Maple decline in Quebec: a discussion of possible causes and the use of fertilizers to limit damage. *The Forestry Chronicle*, 4, 280-287.

- Hendershot, W.H., Lalonde, H., et Duquette, M. (2008). Soil reaction and exchangeable acidity. Dans. Carter, M.R., et Gregorich, E., Soil sampling and methods of analysis, CRC Press Publishers, p. 173-178.
- Herrero, C., San Martin, R., et Bravo, F. (2007). Effect of heat and ash treatments on germination of *Pinus pinaster* and *Cistus laurifolius*. *Journal of Arid Environments*, 70, 540–548.
- Horsley, S.B., Long, R.P., Bailey, S.W., Hallett, R.A., et Wargo, P.M. (2002). Health of eastern North American sugar maple forests and factors affecting decline. *Canadian Journal of Forest Research*, 30, 1365-1378.
- Houle, D., Tremblay, S. et Ouimet, R. (2007). Foliar and wood chemistry of sugar maple along a gradient of soil acidity and stand health. *Plants and Soil*, 300, 173-183.
- Houston, D.R. (1999). History of sugar maple decline. Sugar maple ecology and health: proceedings of an international symposium; 1998 June 2-4, Radnor, PA: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Northeastern Research Station, 19-26.
- Insam, H. et Knapp, B.A. (2011) Recycling of biomass ashes. Springer, New-York.
- Juice, SM, Fahey, T.J., Siccama, T.G., Driscoll, C.T., Denny, E.G., Eagar, C., Cleavitt, N.L., et Richardson, A.D. (2006). Response of sugar maple to calcium addition to northern hardwood forest. *Ecology*, 87, 1267-1280.
- Indiramma, P., Sudharani, C., et Needhidasa, S. (2020). Utilization of fly ash and lime to stabilize the expansive soil and to sustain pollution free environment – An experimental study. *Materials Today*, 22, 694-700.
- Jacobson, S. (2003). Addition of stabilized wood ashes to Swedish coniferous stands on mineral soils – effects on stem growth and needle nutrient concentrations. *Silva Fennica*, 37, 437–450.
- Klavina, D., Nikolajeva, V., Okmanis, M., Skranda, I., Gaitnieks, T., Menkis, A., Bardule, A., et Lazdins, A. (2016). Fine root development and mycorrhization in Norway spruce stands one year after fertilization with potassium sulphate and wood ash. *Journal of Forest Science*. 62. 17-23.
- Kolb, T.E., et McCormick, L.H. (1993). Etiology of sugar maple decline in four Pennsylvania stands. *Canadian Journal of Forest Research* 23, 2395–2402.
- Lawrence, G., Walter, S., Tukamushaba, S., Kevin, S., Richard, W., et Andrei, L. (2012). Early indications of soil recovery from acidic deposition in U.S. red spruce forests. *Soil Science Society of America Journal*, 76, 1407–1417.
- Lenth, R. (2019). emmeans: estimated marginal means, aka least-squares means. R package version 1.4.2.

- Long, R.P., Horsley, S.B., et Lilja, P.R. (1997). Impact of forest liming on growth and crown vigor of sugar maple and associated hardwoods. *Canadian Journal of Forest Research*, 27, 1560-1573.
- Long, R.P., Horsley, S.B., Hallet, R.A., et Bailey, S.W. (2009) Sugar maple growth in relation to nutrition and stress in the northeastern United States. *Ecological Society of America*, 19, 1454-1466.
- Lozano, F.C., et Huynh, K.D. (1989). Foliar diagnosis of sugar maple decline by DRIS. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 20(17-18), 1895-1914.
- Lundström, U.S., Bain, D.C., Taylor, A.F S., Van Hees, P.A.W., Geibe, C.E., Holmström, S.J. M., Melkerud, P.-A., Finlay, R., Jones, D.L., Nyberg, L., Gustafsson, J.P., Riise, G., et Strand, L.T. (2003). Effects of acidification and its mitigation with lime and wood ash on forest soil processes in southern sweden. a joint multidisciplinary study. *Water, Air and Soil Pollution*, 3, 167-188.
- Mahmood, S, Finlay, R.D., Fransson, A.M., et Wallander, H. (2003). Effects of hardened wood ash on microbial activity, plant growth and nutrient uptake by ectomycorrhizal spruce seedlings. *FEMS Microbiology Ecology*, 43, 121–131.
- Mandre, M., Pärn, H., et Ots, K. (2006). Short-term effects of wood ash on the soil and the lignin concentration and growth of *Pinus sylvestris* L. *Forest Ecology and Management*, 223, 349-357.
- MAPAQ.(2011). Monographie de l'industrie acéricole du Québec. Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec (MAPAQ). 54 pages.
- Marschner, H. (2011). Chapter 8: Functions of mineral nutrients: macronutrients. *Mineral Nutrition of Higher Plants*, Academic Press, Londres, 229-312.
- Masson, E., Cogliastro, A., Houle, D., et Rivest D. (2019). Variation in soil and foliar nutrition status along a forest edge–interior gradient in sugar maple forest fragments. *Canadian Journal of Forest Research*, 49, 1463-1470.
- Matonis, M.S., Walters, M.B., et Millington, J.D.A. (2011). Gap-, stand-, and landscape-scale factors contribute to poor sugar maple regeneration after timber harvest. *Forest Ecology and Management*, 2, 286-298.
- Mellbo, P., Sarenbo, S., Stalnacke, O., et Claesson, T. (2018). Leaching of wood ash products aimed for spreading in forest floors – influence of method and L/S ratio. *Waste Management*, 28, 2235–2244.
- Ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs (MDDEP). (2011) Politique québécoise de gestion des matières résiduelles : Plan d'action 2011-2015. Québec, Canada.

- Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs (MFFP). (2018). Zone de végétation et domaine bioclimatique du Québec.
- Moore, J.-D., Ouimet, R., et Duchesne, L. (2012). Soil and sugar maple response 15 years after dolomitic lime application. *Forest Ecology and Management*, 281, 130-139.
- Moore, J.-D., et Ouimet, R. (2014). Effects of two types of Ca fertilizer on sugar maple nutrition, vigor and growth after 7 years. *Forest Ecology and Management*, 320, 1-5.
- Mourão Filho, F.D.A.A. (2004). DRIS : concepts and applications on nutritional diagnosis in fruit crops. *Scientia Agricola*, 61(5), 550-560.
- Nolet, P., Delagranché, S., Bannon, K., Messier, C., et Kneeshaw, D. (2015) Liming has a limited effect on sugar maple – American beech dynamics compared with beech sapling elimination and canopy opening. *Canadian Journal of Forest Research*, 45, 1376-1386.
- Noyce, G.L., Fulthorpe, R., Gorgolewskic, A., Hazlett P., Trane, H., et Basiliko, N. (2016) Soil microbial responses to wood ash addition and forest fire in managed Ontario forests. *Applied Soil Ecology*, 107, 368–380.
- Nyland, R.D., Bashant, A. L., Bohn, K.K., et Verostek, J.M. (2006). Interference to hardwood regeneration in northeastern north america: ecological characteristics of american beech, striped maple, and hobblebush. *Northern Journal of Applied Forestry*, 23, 53-61.
- Osman, K.T.(2013a). Chapter 1: Rocks, minerals, and soils, forest soils, Springer, New-York, 1-17.
- Osman, K.T.(2013b). Chapter 3: Chemical properties of forest soils. *Forest Soils*, Springer, New-York, 45-61.
- Ouimet, R., et Camiré, C. (1995). Foliar deficiencies of sugar maple stands associated with soil cation imbalances in the Quebec Appalachians. *Canadian Journal of Soil Science*, 75, 169-175.
- Ouimet, R., Camiré, C., et Furlan, V. (1996). Effect of soil base saturation and endomycorrhization on growth and nutrient status of sugar maple seedlings. *Canadian Journal of Soil Science*, 76, 109-115.
- Ouimet, R., Arp, P.A., et Watmough, S.A. (2006) Determination and mapping critical loads of acidity and exceedances for upland forest soils in eastern Canada. *Water, Air, and Soil Pollution*, 172, 57–66.
- Ouimet, R., Moore J.-D., et Duchesne, L. (2008). Effects of experimental acidification and alkalization on soil and growth and health of *Acer saccharum Marsh.* *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 171, 858-871.

- Ouimet, R., et Duchesne, L. (2009). Dépôts atmosphériques dans les forêts au Québec : retombées actuelles en forêt et tendances au cours des 20 à 30 dernières années. *Naturaliste Canadien*, 133, 56-64.
- Ouimet, R., et Duchesne, L. (2010). Évolution du dépassement de la charge critique d'acidité des écosystèmes forestiers du Québec (période de 1994-1998 à 1999-2002). *Note de recherche forestière*, 134, 10p.
- Ouimet, R., Moore, J.-D., Duchesne, L., Aherne, J., et Demerchant, I. (2013). Soil thresholds update for diagnosing foliar calcium, potassium, or phosphorus deficiency of sugar maple. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 44, 2408-2427.
- Ouimet, R., Guillemette, F., Bédard, S., et Gauthier, M. M. (2018). Effets après 5 ans de l'amendement en matière résiduelle fertilisante sur le sol, le statut nutritif et l'accroissement des arbres dans de jeunes érablières éclaircies en Estrie. *Ministère des forêts, de la faune et des parcs, Direction de la recherche forestière*, 18p.
- Paré, D., Meyer, W.L., et Camiré, C. (1993). Nutrient availability and foliar nutrient status of sugar maple saplings following fertilization. *Soil Science Society of America Journal*, 57, 1107-1114.
- Parkinson, J.A., et Allen, S.E. (1975). A wet oxidation procedure suitable for the determination of nitrogen and mineral nutrients in biological material. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 6, 1-11.
- Payette, S., Fortin, M.J., et Morneau, C.,(1996) The recent sugar maple decline in southern Quebec: probable causes deduced from tree rings. *Canadian Journal of Forest Research*, 26, 1069-1078.
- Pitel, N.E., et Yanai, R.D. (2014). Abiotic and biotic factors influencing sugar maple health: soils, topography, climate, and defoliation. *Soil Science Society of America Journal*, 78, 2061-2070.
- Pitman, R.M.(2006). Wood ash use in forestry – a review of the environmental impacts. *Forestry: An International Journal of Forest Research*, 79, 563-588.
- Aherne, J., et Posch, M. (2013). Impacts of nitrogen and sulphur deposition on forest ecosystem services in Canada. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 5, 108-115.
- Pugliese, S., Jones, T., Preston, M. D., Hazlett, P., Tran, H., et Basiliko, N. (2014). Wood ash as a forest soil amendment: The role of boiler and soil type on soil property response. *Canadian Journal of Soil Science*, 94, 621–634.
- R Core Team (2019). *R: A language and environment for statistical computing*. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria.

- Royer-Tardif, S., Whalen, J., et Rivest, D. (2019). Can alkaline residuals from the pulp and paper industry neutralize acidity in forest soils without increasing greenhouse gas emissions? *Science of the Total Environment*, 663, 537-547.
- Richard, R.P., Potvin, L.R., Kane, E.S., Handler, S.D., Smith, P.J., et Peterson, D. (2018). Biochar and wood ash amendments for forestry in the lake states: Field report and initial results. *Journal of Forestry*, 116, 222-227.
- Reid, C., et Watmough, S. (2014). Evaluating the effects of liming and wood-ash treatment on forest ecosystems through systematic meta-analysis. *Canadian Journal of Forest Research*. 44, 867-885.
- Saarsalmi, A., Mälkönen, E., et Kukkola, M. (2004). Effect of wood ash fertilization on soil chemical properties and stand nutrient status and growth of some coniferous stands in Finland. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 19, 217–233.
- Saarsalmi, A., Derome, J., et Levula, T.(2005) Effect of wood ash fertilisation on stand growth, soil, water and needle chemistry, and berry yields of lingonberry (*Vaccinium vitis-idaea* L.) in a Scots pine stand in Finland. *Forestry Studies*, 42, 13–33.
- Saarsalmi, A., Smolander, A., Kukkola, M., Moilanen, M., et Saramäki, J.(2012). 30-Year effects of wood ash and nitrogen fertilization on soil chemical properties, soil microbial processes and stand growth in a Scots pine stand. *Forest Ecology and Management*, 278, 63-70.
- Sarenbo, S.L., et Claesson, T. (2004). Limestone and dolomite powder as binders for wood ash agglomeration. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 63,191–207.
- Serra, A.P., Marchetti, M.E., Bungenstab, D.J., da Silva, M.A.G., Serra, R.P., Guimarães, F. C.N., Do Amaral, V., et de Moraes, H. S. (2013). Chapter 5: Diagnosis and recommendation integrated system (DRIS) to assess the nutritional state of plants. Dans Matovic, M.D., *Biomass now-sustainable growth and use*, InTech, Rijeka, Croatia.
- Schaberg, P.G., Tilley, J.W., Hawley, G.J., DeHayes, D.H., et Bailey, S.W. (2006). Associations of calcium and aluminum with the growth and health of sugar maple trees in Vermont. *Forest Ecology and Management*, 223, 159–169.
- Sharpe, W.E. (2002) Acid deposition explains sugar maple decline in the east. *Bioscience*, 52, 4–5.
- St.Clair, S.B., Sharpe W.E., et Lynch, J.P. (2008) Key interactions between nutrient limitation and climatic factors in temperate forests: a synthesis of the sugar maple literature. *Canadian Journal of Forest Research*, 38, 401-414.

- Thornton, F.C., Schaedle, M., et Raynal, D.J. (1986) Effect of aluminum on the growth of sugar maple in solution culture. *Canadian Journal of Forest Research*, 16, 892-896.
- Tran, S. T., et Simard, R. R. (2008). MehlichIII – Extractable elements. Dans M. R. Carter et E. G. Grgorich (dir.), *Soil Sampling and Methods of Analysis* (2e éd., p. 81-88). Lewis Publishers.
- Treasure, T., Watmough, S., Eimers, C., et Hayley, M. (2019). Impact of selection harvesting on the foliar chemistry of sugar maple seedlings established on base-poor soils in central Ontario, Canada. *Forest Ecology and Management*. 435. 1-7.
- Tripler, C., Canham, C., Inouye, R., et Schnurr, J. (2002). Soil nitrogen availability, plant luxury consumption, and herbivory by white-tailed deer. *Oecologia*, 133, 517-524.
- Trudelle, M., Gélinas, N., et Beaugard, R. (2009). Estimation des retombées économiques directes engendrées par le réseau de création de valeur de la filière bois de feuillus durs au Québec. *The Forestry Chronicle*, 85, 538-547.
- Vadeboncoeur, M.A. (2010). Meta-analysis of fertilization experiments indicates multiple limiting nutrients in northeastern deciduous forests. *Canadian Journal of Forest Research*, 40, 1766-1780.
- Vassilev, S.V., Baxter, D., Andersen, L.K., et Vassileva, C.G. (2013). An overview of the composition and application of biomass ash. Part 1. Phase–mineral and chemical composition and classification. *Fuel*, 105, 40–76.
- Vitousek, P.M., Aber, J.D., Howarth, R.W., Likens, G.E., Matson, P.A., Schindler, D.W., Schlrdsinger, Q.H., et Tilman, D.G. (1997). Human alteration of the global nitrogen cycle: sources and consequences. *Ecological Applications*, 7, 737-750.
- Wallace, Z.P., Lovett, G.M., Hart, J.E., et Machona, B. (2007). Effects of nitrogen saturation on tree growth and death in a mixed-oak forest. *Forest Ecology and Management*, 243, 210-218.
- Walter, M.B., et Reich, P.B. (1997). Growth of *Acer saccharum* seedlings in deeply shaded understories of northern Wisconsin: effects of nitrogen and water availability. *Canadian Journal of Forest Research*, 27, 237-347.
- Walter, M.B., et Reich, P.B. (2000). Seed size, nitrogen supply, and growth rate affect tree seedling survival in deep shade. *Ecology*, 81, 1887–1901.
- Walworth, J.L., et Sumner, M.E. (1987). The diagnosis and recommendation integrated system (DRIS). Dans *Advances in soil science* (p. 149-188). New York : Springer.

- Wargo, P.M., Minocha, R., Wong, B.L., Long, R.P, Horsley, S.B., et Hall, T.J. (2002). Measuring changes in stress and vitality indicators in limed sugar maple on the Allegheny Plateau in north-central Pennsylvania. *Canadian Journal of Forest Research*, 32, 629-641.
- Watmough, S.A. (2010). Assessment of the potential role of metals in sugar maple (*Acer saccharum Marsh*) decline in Ontario, Canada. *Plant and Soil*, 232, 463-474.
- Wilmot, T.R, Elisworth, D.S., et Tyree, M.T. (1996). Base cation fertilization and liming effects on nutrition and growth of Vermont sugar maple stands. *Forest Ecology and Management*, 84, 123-134.
- Zechmeister-Boltenstern, S., Michel, K., et Pfeffer, M. (2011). Soil microbial community structure in European forests in relation to forest type and atmospheric nitrogen deposition. *Plant and Soil*, 343, 37-50.
- Zidia, N., et Tran, T. S. (2008). Mehlich III – Extractable elements. Dans M. R. Carter et E. G. Gregorich (dir.), *Soil sampling and methods of analysis* (2e éd., p. 81-88). CRC Press Publishers.