



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

Rock Ouimet¹, François Guillemette, Steve Bédard et Martin-Michel Gauthier

Résumé

Dans le but d'expérimenter des traitements sylvicoles qui augmentent la productivité des forêts de feuillus, un dispositif d'éclaircie commerciale (EC) a été établi en 2009 dans des érablières équiennes âgées d'environ 35 ans, en Estrie (Québec, Canada). Il comprend des traitements d'EC modérée ou forte, accompagnés ou non d'un amendement de boue de chaux et de biosolides papetiers épandus mécaniquement, à la volée, depuis les sentiers de débardage. Les analyses du feuillage de l'érable à sucre (*Acer saccharum* Marsh.) et du sol indiquaient au départ des carences en calcium (Ca) et en potassium (K). Cinq ans après traitement, les remesurages indiquent que :

- 1) l'amendement a augmenté la disponibilité en Ca, la saturation en bases et le pH, et diminué l'acidité échangeable dans l'humus et dans les 10 premiers centimètres du sol minéral; le Ca n'était plus déficient;
- 2) l'amendement a considérablement modifié le statut nutritif de l'érable à sucre et du bouleau jaune (*Betula alleghaniensis* Britt.), principalement en augmentant les teneurs en Ca et en phosphore (P) du feuillage;
- 3) sans amendement, l'EC modérée ou forte n'a que peu ou pas modifié le statut nutritif foliaire des trois essences étudiées. Chez le bouleau jaune et le hêtre à grandes feuilles (*Fagus grandifolia* Ehrh.), elle a cependant créé un effet de dilution des éléments dans le feuillage;
- 4) l'EC a causé une augmentation de l'accroissement en surface terrière (AST) des arbres individuels chez les trois essences étudiées;
- 5) Chez l'érable à sucre seulement, l'amendement a causé une augmentation supplémentaire de l'AST des tiges dans les parcelles éclaircies, par rapport à l'EC seule.

Les effets à court terme de l'EC et de l'amendement dans de jeunes peuplements de décidus sont positifs. Cependant, le suivi du dispositif doit se poursuivre afin de confirmer si l'effet positif de l'amendement se maintient à plus long terme à l'échelle du peuplement.

Mots-clés : Amendement du sol, bouleau jaune, éclaircie commerciale, érable à sucre, hêtre à grandes feuilles, matières résiduelles fertilisantes.

¹ Correspondance : rock.ouimet@mffp.gouv.qc.ca



Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs
 Direction de la recherche forestière
 2700, rue Einstein
 Québec (Québec) G1P 3W8
 Téléphone : 418 643-7994
 Télécopieur : 418 643-2165
 Courriel : recherche.forestiery@mffp.gouv.qc.ca
 Site Internet : www.mffp.gouv.qc.ca

Abstract

To experiment silvicultural treatments aimed at increasing productivity of northern hardwood stands, a thinning experiment was established in 2009 in even-aged, 35-year-old sugar maple (*Acer saccharum* Marsh.) stands in Estrie (Quebec, Canada). In addition to an untreated control, the design included two thinning intensities (moderate and high), with or without the application of a fertilizing soil amendment consisting of lime mud and paper biosolids broadcast mechanically from the skid trails. Soil and sugar maple foliage analyses before the start of the experiment indicated calcium (Ca) and potassium (K) deficiencies. After 5 years, the treatments indicated that:

- 1) fertilization increased Ca availability, soil base saturation and pH, and reduced the soil exchange capacity of the forest floor and of the first 10 centimetres of mineral soil; Ca was no longer deficient;
- 2) fertilization considerably modified the nutritional status of sugar maple and yellow birch (*Betula alleghaniensis* Britt.), mainly by increasing foliar Ca and phosphorus (P);
- 3) without fertilization, the nutritional status of the 3 tree species studied was slightly or not modified by the two thinning treatments. However, thinning caused a dilution effect of the foliage nutrients for yellow birch and American beech (*Fagus grandifolia* Ehrh.);
- 4) the thinning treatments caused basal area growth of individual trees to increase for the 3 tree species studied;
- 5) for sugar maple, fertilization of the thinned forest plots further increased individual tree basal area growth compared to thinning only.

Both thinning and fertilizer application had positive short-term effects in young northern hardwood stands. However, further monitoring will be needed to confirm the longer-term effect of fertilization at the stand scale.

Keywords: American beech, thinning, residual fertilizers, soil fertilization, sugar maple, yellow birch

1. Introduction

Les jeunes peuplements naturels de structure équiennne à dominance d'érable à sucre (*Acer saccharum* Marsh.) et d'érable rouge (*Acer rubrum* L.) représentent une superficie d'environ 120 000 ha au Québec. Ces peuplements sont principalement situés dans la zone habitée des régions du sud du Québec. D'une part, cette situation géographique les rend faciles d'accès, grâce à un réseau de chemins bien développé. D'autre part, la proximité des usines et la présence d'un marché de bois de trituration favorisant l'utilisation des bois de plus faibles dimensions permettent de réduire les coûts de transformation de la fibre. De plus, les conditions climatiques de cette région permettent d'anticiper une forte production de bois de qualité supérieure. Ces facteurs sont propices au développement d'une sylviculture plus intensive.

Dans une note de recherche précédente (Bédard *et al.* 2018), nous avons rapporté les résultats après 5 ans d'inventaires forestiers dans un dispositif d'éclaircie commerciale (EC) mécanisée réalisé dans de jeunes érablières de 30 à 35 ans, avec ou sans amendement de matières résiduelles fertilisantes. Les principales hypothèses testées étaient que : 1) l'EC favorise le maintien d'un peuplement vigoureux, car elle réduit la mortalité et augmente l'accroissement net par rapport à des peuplements témoins sans intervention; 2) l'EC permet d'augmenter l'accroissement en diamètre des tiges par rapport aux peuplements témoins sans intervention; 3) l'accroissement en diamètre augmente avec l'intensité de l'EC; 4) l'EC combinée à un amendement du sol favorise davantage l'accroissement en diamètre des tiges que l'EC sans amendement.

Les hypothèses 1 et 2 ont été confirmées : après 5 ans, l'EC avait permis d'augmenter la surface terrière des arbres d'avenir ainsi que la production à l'échelle du peuplement, avec un gain d'AAN de l'ordre de 0,24 à 0,45 m²·ha⁻¹·an⁻¹ (Bédard *et al.* 2018). Cette augmentation était tributaire à la fois de l'effet positif de l'EC sur l'accroissement en diamètre des tiges et de la réduction de la mortalité. Cependant, les hypothèses 3 et 4 n'ont pu être confirmées clairement, en raison des faibles différences de croissance observées entre les traitements d'EC modérée et forte, d'une part, et entre les traitements d'EC avec ou sans amendement, d'autre part.

Dans la présente note, nous avons voulu vérifier plus en détail l'effet des traitements après cinq ans sur le statut nutritif des arbres résiduels, sur leur croissance individuelle dans le temps et sur les propriétés physicochimiques du sol, afin de tester les hypothèses suivantes : 1) l'EC et l'amendement modifient le statut nutritif des arbres; 2) l'EC permet d'augmenter l'accroissement en surface terrière (AST) des arbres; 3) l'augmentation de l'AST est proportionnelle à l'intensité de l'éclaircie; 4) l'EC avec amendement permet d'augmenter l'AST des arbres davantage que l'EC sans amendement chez l'érable à sucre, le bouleau jaune (*Betula alleghaniensis* Britt.) et le hêtre à grandes feuilles (*Fraxinus americana* L.), les trois principales essences présentes; et 5) l'amendement ajouté à l'EC modifie les propriétés physicochimiques du sol par rapport à l'EC seule.

2. Matériel et méthodes

2.1. Dispositif expérimental

Le dispositif expérimental est situé dans la forêt de Watopeka, près de la ville de Windsor, en Estrie (lat. 45° 35' 30" N., long. 71° 51' 0" O.). Cette forêt, propriété de la compagnie Domtar, se trouve dans le sous-domaine bioclimatique de l'érablière à tilleul de l'Est, dans la région écologique 2c-Coteaux de l'Estrie et dans la sous-région écologique 2c-T (Saucier *et al.* 1998). Dans cette région, les peuplements de feuillus représentent près de 50 % du couvert forestier et sont composés d'érablières. Le hêtre à grandes feuilles (HEG), le frêne d'Amérique (*Fraxinus americana* L.) et le bouleau jaune (BOJ) sont les principales essences compagnes de l'érable à sucre (ERS). La température annuelle moyenne de la région est de 5 °C, et les précipitations annuelles moyennes sont de 1 000 mm (Gosselin 2007).

Le dispositif a été établi en 2009 dans des érablières à bouleau jaune âgées d'environ 35 ans et issues d'une coupe totale. Une éclaircie précommerciale avait été réalisée dans ces érablières une quinzaine d'années après la coupe totale d'origine. Selon la carte écoforestière du ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs du Québec (MFFP 2015), les peuplements étudiés se situent sur un till épais (1A, classe modale de plus de 1 m) avec drainage modéré (classe de drainage 30) et sur de faibles pentes (classe de pente B, inclinaison de 4 à 8 %; figure 1). Un échantillonnage des sols avant traitement avait montré une carence en calcium (Ca, Bédard

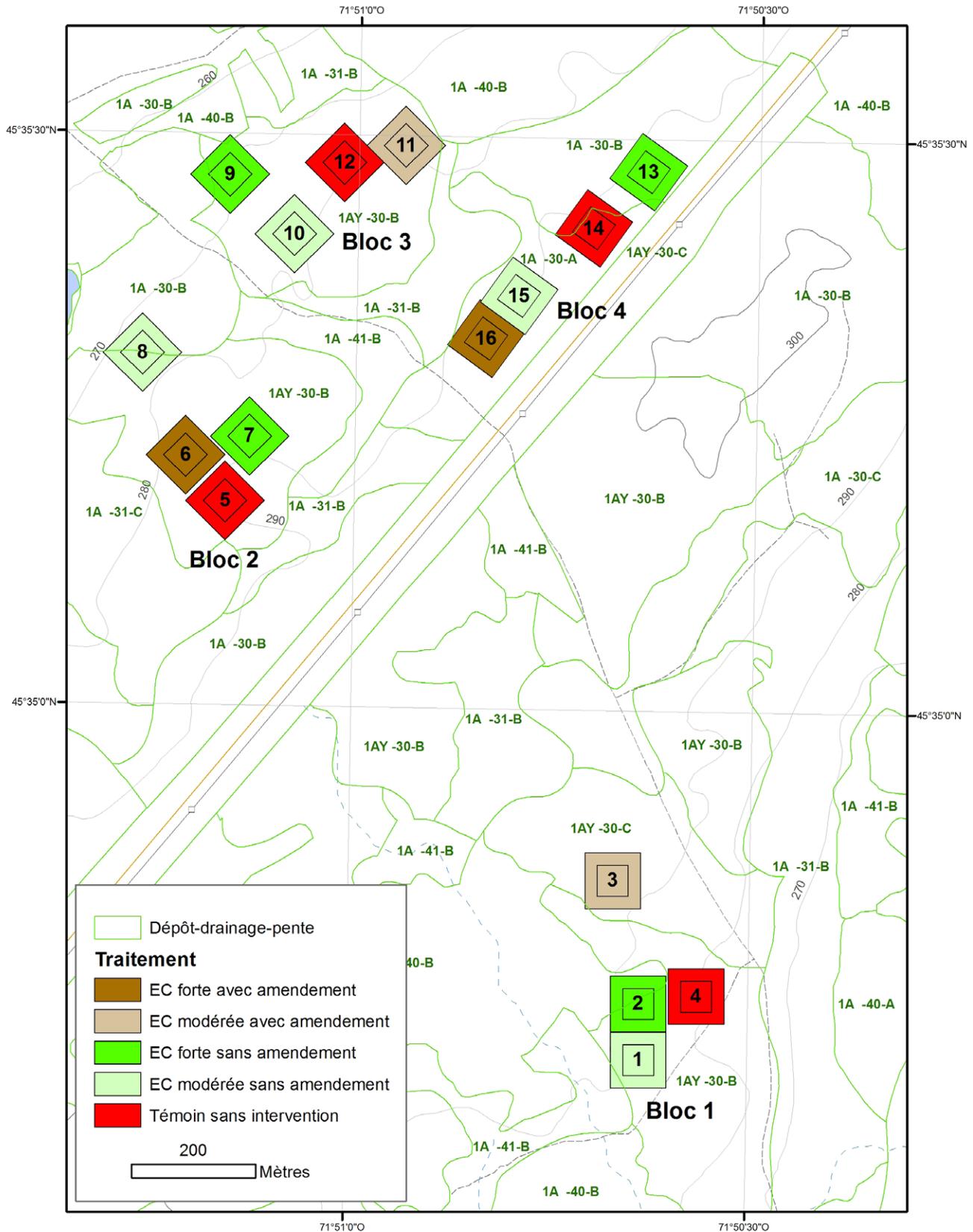


Figure 1. Plan du dispositif expérimental de Watopeka. La cartographie des dépôts de surface, du drainage et de la pente provient du quatrième programme d'inventaire écoforestier du ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs du Québec (MFFP 2015). EC = éclaircie commerciale.

et al. 2018) dans ce secteur, selon les normes de nutrition de l'érable à sucre proposées par Ouimet *et al.* (2013a) pour l'horizon B. Le dispositif compte 5 traitements répartis dans 16 unités expérimentales (UE) distribuées en 4 blocs formant un plan d'expérience à blocs aléatoires incomplets (figure 1) :

- témoin sans intervention (n = 4 UE);
- EC de forte intensité sans amendement (n = 4 UE);
- EC modérée sans amendement (n = 4 UE);
- EC forte avec amendement (n = 2 UE);
- EC modérée avec amendement (n = 2 UE).

Les unités expérimentales ont une superficie de 0,8 ha (90 m × 90 m) et comprennent une placette centrale de 0,25 ha (50 m × 50 m) dans laquelle est effectué le suivi dendrométrique (Bédard *et al.* 2018).

Les travaux de récolte se sont déroulés à l'hiver 2010 à l'aide d'une abatteuse multifonctionnelle et d'un porteur. Les surfaces terrières résiduelles obtenues après éclaircie étaient en moyenne de 13,5 m²·ha⁻¹ pour l'EC modérée et de 11,5 m²·ha⁻¹ pour l'EC forte. À l'été 2010, un épandeur a servi à appliquer

un amendement composé de 8 tonnes à l'hectare de boue de chaux et de 15 tonnes à l'hectare de biosolides papetiers. L'amendement avait un pH alcalin (pH ≥ 8,0) et fournissait 4 629 kg·ha⁻¹ de Ca, 161 kg·ha⁻¹ d'azote (N), 85 kg·ha⁻¹ de phosphore (P) et 13 kg·ha⁻¹ de potassium (K) (tableau 1). Compte tenu de l'équipement utilisé (épandage en mode opérationnel), la dose de produit reçue par chaque arbre variait en fonction de sa distance par rapport aux sentiers. La proportion d'amendement épandu a été maximale (20-23 %) dans les sentiers et à leur bordure, et diminuait à mesure qu'on s'en éloignait, pour atteindre environ 15 % à environ 10 m des sentiers.

À la fin août 2014, nous avons échantillonné à la mi-cime, à l'aide d'une perche télescopique, le feuillage de 3 essences (ERS, BOJ et HEG) d'arbres marchands dominants ou codominants sélectionnés au hasard en bordure de chaque placette centrale (n = 5 ERS, 3 BOJ et de 0 à 3 HEG par placette). Des carottes de sondage (2 par arbre) ont également été prélevées sur ces arbres à une hauteur de 1,3 m à l'aide d'une sonde de Pressler. Le diamètre à hauteur de poitrine (DHP) des 148 arbres sondés était de 22,4 ± 6,0 cm (moyenne ± écart-type). Les sols

Tableau 1. Composition chimique de l'amendement des sols.

Composé	Unité	Boue de chaux	Biosolides papetiers	Taux d'application (kg·ha ⁻¹)
Produit appliqué	t·ha ⁻¹	8	15	23 000
Carbone total (C)	%	2,0	26	4 060
Calcium (Ca)	kg·t ⁻¹	420	85	4 629
Aluminium (Al)	kg·t ⁻¹	0,8	10,6	165
Azote total (N Kjeldahl)	kg·t ⁻¹	0,04	10,71	161
Phosphore total (P)	kg·t ⁻¹	6,8	2,0	85
Sodium (Na)	kg·t ⁻¹	6,2	1,4	71
Magnésium (Mg)	kg·t ⁻¹	4,2	2,0	63
Fer (Fe)	kg·t ⁻¹	0,8	3,0	50
Potassium (K)	kg·t ⁻¹	0,3	0,7	13
Manganèse (Mn)	kg·t ⁻¹	0,4	0,4	9
Zinc (Zn)	kg·t ⁻¹	0,01	0,21	3
Bore (B)	kg·t ⁻¹	0,01	0,01	0,3
Chrome (Cr)	kg·t ⁻¹	0,01	0,02	0,3
Cuivre (Cu)	kg·t ⁻¹	0,002	0,020	0,3
Plomb (Pb)	kg·t ⁻¹	0,003	0,015	0,2
Nickel (Ni)	kg·t ⁻¹	0,01	0,01	0,2
Arsenic (As)	kg·t ⁻¹	0,005	0,004	0,1
Cadmium (Cd)	kg·t ⁻¹	0,001	0,004	0,1

Note : Les taux d'application pour le nitrate (N-NO₃), le mercure (Hg), le cobalt (Co), le molybdène (Mo) et le sélénium (Se) étaient de moins de 0,01 kg·ha⁻¹, et ceux pour les dioxines et les furannes étaient de 0,01 × 10⁻⁹ kg·ha⁻¹.

ont été échantillonnés à la tarière à 2 profondeurs différentes (humus et 0-10 cm), à 2 endroits dans chaque placette (lieux d'échantillonnage). Dans les placettes éclaircies, l'échantillonnage a eu lieu au centre du sentier de débardage et à 5 m de la bordure du sentier, pour prendre en compte l'hétérogénéité de l'épandage.

2.2. Analyses de laboratoire

Les carottes de sondage ont été séchées à l'air, collées sur des gabarits, puis sablées. Après avoir été détectés à l'aide d'une loupe binoculaire, les 25 derniers cernes annuels ont été mesurés au 0,001 mm près à l'aide du logiciel *Windendro* (Régent Instruments inc.).

Les échantillons de sol ont été séchés à l'air, puis passés dans un tamis à mailles de 2 mm. Le pH_{eau} [1:1 v/v] des sols et leurs éléments échangeables par extraction au sel neutre NH_4Cl 1 N (12 h) ont été mesurés. Une aliquote de ces échantillons a été broyée et passée dans un tamis de 250 μm afin de permettre de mesurer le taux d'humidité et de matière organique par perte au feu (Kalra et Maynard 1992) ainsi que la concentration en carbone (C) et en N total (les échantillons ne contenaient aucun carbonate) par combustion (appareil LECO, modèle TruMac). De plus, nous avons mesuré les concentrations totales des humus en P, en K, en Ca et en magnésium (Mg) par digestion dans l'acide sulfurique concentré.

Les échantillons foliaires ont été séchés à 65 °C, puis broyés dans un broyeur de type cyclone. Les teneurs en N des échantillons ont été mesurées par combustion sèche (LECO), tandis que celles en P, K, Ca et Mg ont été mesurées par digestion dans l'acide sulfurique concentré.

2.3. Traitement statistique

Les propriétés des humus et des sols ont été analysées à l'aide d'un modèle linéaire mixte afin de déterminer l'effet de deux facteurs : le traitement et le lieu d'échantillonnage. Les blocs et les unités expérimentales au sein de ceux-ci étaient considérés comme des sources aléatoires de variabilité dans ces analyses.

L'analyse de la variance d'un modèle linéaire mixte a été employée pour déterminer l'effet des deux facteurs (traitements \times essence) sur les analyses foliaires brutes et compositionnelles. Les blocs, les

unités expérimentales dans les blocs et les arbres dans les unités expérimentales étaient considérés comme des sources aléatoires de variabilité dans l'analyse. Les compositions foliaires ont été calculées en transformant les concentrations brutes en *log ratios* isométriques (LRI; Parent et al. 2012) pour analyser 6 contrastes binaires de rapports : matière organique/éléments, $(N + P)/(K + Ca + Mg + Mn)$, N/P , $(K + Ca + Mg)/Mn$, $(Ca + Mg)/K$ et Ca/Mg . Ces rapports LRI permettent de mieux détecter les déséquilibres nutritifs que les concentrations brutes (Parent et al. 2013). Le module *compositions* du logiciel R (van den Boogaart et al. 2014) a été employé pour calculer les valeurs LRI.

Les séries chronologiques de cernes annuels ont été converties en mesures d'AST à l'aide du module *dpLR* du logiciel R (Bunn et al. 2013). Les chronologies d'AST post-traitement (2010-2014) de chacune des 3 essences ont été analysées séparément à l'aide d'un modèle linéaire mixte ayant comme effets fixes les traitements d'EC et d'amendement, le temps et l'interaction entre ces 2 facteurs. L'AST moyen prétraitement (2000-2009) a été inclus comme covariable dans les effets fixes. Les blocs, les unités expérimentales dans les blocs et les arbres dans les unités expérimentales ont été considérés comme des sources aléatoires de variabilité dans l'analyse. Ces mesures temporelles n'étaient pas indépendantes les unes des autres; pour en tenir compte, nous avons intégré dans l'analyse une structure de covariance d'autocorrélation temporelle (processus autorégressif d'ordre 1).

Les hypothèses sous-jacentes aux modèles (normalité, hétérogénéité, indépendance) ont été vérifiées grâce à l'examen visuel de graphiques. Des résidus hétérogènes étaient présents dans certaines analyses; nous les avons rendus homogènes en permettant aux variances de varier selon les facteurs fixes. Ces analyses ont été implémentées dans le module *nlme* du logiciel R (Pinheiro et al. 2015). Des contrastes spécifiques avec tests bilatéraux ont servi à : 1) comparer l'effet de l'EC seule avec le comportement des témoins; 2) comparer les effets de l'EC forte et de l'EC modérée (qu'il y ait ou non amendement); 3) départager l'effet de l'amendement dans un contexte d'EC, en comparant les parcelles avec EC seule aux parcelles avec EC et amendement; 4) comparer, dans le cas des sols, l'effet du lieu d'échantillonnage dans les parcelles qui ont reçu l'amendement. Les tests sur ces contrastes et les moyennes ajustées selon ceux-ci ont été calculés à l'aide du module *lsmeans* du logiciel R (Lenth 2016).

3. Résultats

3.1. Sols

Les moyennes ajustées montrent que les sols des parcelles sans amendement étaient carencés en Ca et en K pour l'érable à sucre, selon les normes de DELFES (Ouimet *et al.* 2013b; tableau 2). L'amendement dans les parcelles éclaircies a pallié la carence en Ca (saturation en Ca du sol minéral > 28,4 %), mais pas celle en K d'après les normes de DELFES (Ouimet *et al.* 2013b).

L'EC seule a eu peu d'effets sur les 2 couches supérieures du sol après 5 ans. Dans l'humus, seul le rapport C/N a légèrement diminué par rapport aux parcelles témoins, tandis que les concentrations en Mg total et en Ca échangeable ont augmenté ($p \leq 0,008$; tableaux 2 et 3). L'EC seule n'a eu aucun effet sur les variables mesurées dans les 10 premiers centimètres de sol minéral, à l'exception du rapport Ca/Mg, qui a légèrement augmenté dans l'une ou l'autre intensité d'EC par rapport au témoin (augmentation de $0,768 \pm 0,143$ [moyenne \pm erreur type]; $p = 0,027$). L'intensité d'EC a seulement influencé la teneur en Mg total dans l'humus, cette dernière tendant à être plus élevée dans l'EC modérée par rapport à l'EC forte ($p = 0,001$), ainsi que la capacité d'échange cationique (CEC) dans la couche 0-10 cm du sol minéral, celle-ci tendant à être plus basse dans l'EC forte que dans l'EC modérée ($p = 0,002$).

Après 5 ans, dans la couche d'humus des parcelles éclaircies avec amendement, les concentrations totales en P, en Mg et surtout en Ca ($p \leq 0,005$; tableau 3) étaient plus élevées, le rapport C/N avait légèrement augmenté et le pH avait augmenté d'environ 2 unités ($p < 0,001$; tableaux 2 et 3). La concentration en Ca échangeable, la CEC, la saturation en bases, celle en Ca et le rapport Ca/Mg avaient également augmenté, alors que l'acidité échangeable avait considérablement diminué ($p < 0,001$; tableau 2). Cependant, les teneurs en matière organique, en C, en N et en K total n'avaient pas changé ($p \geq 0,548$, tableau 3).

Dans le sol minéral, l'amendement des parcelles éclaircies a causé, d'une part, l'augmentation du pH d'environ 0,3 unité ($p = 0,004$, tableau 2), et d'autre part, l'augmentation de la concentration en Ca échangeable et du rapport Ca/Mg ($p \leq 0,003$). L'amendement n'a pas eu d'effet sur le taux de matière organique, le C total, le N total ou le rapport C/N dans les 10 premiers centimètres du sol minéral ($p \geq 0,673$; tableau 3).

Les propriétés physicochimiques du sol diffèrent relativement peu en fonction du lieu d'échantillonnage des sols (au centre et à 5 m du bord des sentiers d'épandage) dans les parcelles ayant reçu l'amendement. Seules les concentrations en P total contre en Mg total dans l'humus étaient plus élevées respectivement de 50 et 60 % au centre des sentiers après 5 ans ($p \leq 0,002$, tableau 3; $1,47 \pm 0,15$ g P·kg⁻¹ contre $0,97 \pm 0,03$ g P·kg⁻¹ et $1,38 \pm 0,11$ g Mg·kg⁻¹ contre $0,86 \pm 0,03$ g Mg·kg⁻¹). Dans les 10 premiers centimètres du sol minéral, seul le rapport Ca/Mg échangeable a varié selon le lieu d'échantillonnage dans les parcelles amendées ($p < 0,001$, tableau 2; $1,70 \pm 0,19$ au centre du sentier contre $1,24 \pm 0,19$ à 5 m du bord du sentier).

3.2. Statut nutritif

Dans les parcelles témoins, les érables à sucre affichaient des concentrations foliaires en K sous le seuil de carence et des concentrations faibles en Ca (tableau 4). La carence en K était d'ailleurs présente dans toutes les parcelles du dispositif.

Après 5 ans, le traitement d'EC seule a influencé le statut foliaire du bouleau jaune et du hêtre, mais pas celui de l'érable (tableau 4). Chez le bouleau jaune, les teneurs en K et en Mn dans le feuillage avaient diminué dans les parcelles éclaircies par rapport aux témoins ($p \leq 0,034$), tandis que chez le hêtre, ce sont les teneurs en N, en P, en K et en Mg qui ont diminué ($p \leq 0,049$). L'analyse compositionnelle du feuillage montre que ces diminutions sont associées en grande partie à l'augmentation du rapport matière organique/éléments, c'est-à-dire à la production supplémentaire de matière sèche par le feuillage de ces essences (effet de dilution; $p \leq 0,015$; tableau 5). Le traitement d'EC seule a aussi augmenté le rapport (N + P)/(K + Ca + Mg + Mn) dans le feuillage du bouleau jaune ($p = 0,021$). Aucune différence significative dans la composition du feuillage ou ses concentrations élémentaires n'a été notée en fonction de l'intensité de l'EC pour l'une ou l'autre des essences ($p \geq 0,077$).

Le traitement d'amendement dans les parcelles éclaircies a considérablement modifié le statut nutritif de l'érable à sucre et du bouleau jaune, mais peu celui du hêtre. Chez l'érable, les concentrations en P et en Ca ont augmenté au-delà des concentrations considérées comme optimales pour l'érable à sucre, et celles en Mn ont diminué ($p \leq 0,011$; tableau 4). Ces changements s'expliquent par une meilleure nutrition en P et en Ca, le rapport N/P du feuillage ayant diminué et les rapports (K + Ca + Mg)/Mn, (Ca + Mg)/K et

Tableau 2. Effets après 5 ans des traitements d'éclaircie commerciale (EC) et d'amendement du sol sur le pH, les concentrations échangeables en éléments, l'acidité, la capacité d'échange cationique (CEC), la saturation en bases et en calcium (Ca) ainsi que les rapports K/Mg et Ca/Mg dans la couche d'humus et dans les 10 premiers centimètres du sol minéral. Les éléments pour lesquels une carence est détectée sont aussi mentionnés dans la dernière colonne. Les moyennes ajustées sont accompagnées de l'erreur type entre parenthèses. Pour les contrastes, les valeurs de *p* inférieures à 0,05 apparaissent en gras. K : potassium; Ca : calcium; Mg : magnésium; Mn : manganèse.

Couche	Traitement	pH _{eau}	Concentration échangeable (cmol [+] ⁻¹ kg ⁻¹)					Saturation en bases (%)	Saturation en Ca (%)	K/Mg	Ca/Mg	Carence*	
			K	Ca	Mg	Mn	Acidité						CEC
Moyennes ajustées (erreur type)													
	Témoin	4,34 (0,04)	0,97 (0,20)	8,7 (1,8)	21,4 (2,2)	23,4 (3,7)	1,78 (0,62)	16,1 (2,4)	81,0 (10,0)	62,4 (6,0)	0,045 (0,002)	0,499 (0,022)	Ca, K
	EC modérée sans amendement	4,50 (0,14)	1,07 (0,20)	15,2 (0,6)	30,3 (2,4)	16,8 (3,6)	1,77 (0,42)	21,5 (2,1)	91,0 (1,6)	71,0 (3,8)	0,034 (0,002)	0,477 (0,036)	Ca, K
	EC modérée avec amendement	6,74 (0,45)	0,64 (0,20)	57,0 (10,1)	22,1 (3,1)	8,6 (5,9)	0,05 (0,50)	60,6 (10,2)	100,0 (0,4)	94,5 (4,8)	0,029 (0,003)	2,462 (0,535)	K
	EC forte sans amendement	4,55 (0,15)	1,19 (0,20)	13,5 (2,0)	23,2 (2,4)	17,3 (3,6)	1,45 (0,37)	20,6 (2,1)	91,4 (1,5)	71,7 (3,7)	0,044 (0,002)	0,513 (0,101)	Ca, K
	EC forte avec amendement	6,55 (0,37)	0,81 (0,27)	55,3 (13,9)	21,6 (3,1)	7,3 (6,0)	0,05 (0,50)	58,9 (14,5)	100,0 (0,4)	94,2 (4,8)	0,037 (0,003)	2,588 (0,471)	K
Valeur de <i>p</i> des contrastes													
	Effet EC seule	0,092	0,525	0,008	0,058	0,156	0,798	0,076	0,310	0,204	0,077	0,944	
	Effet EC forte vs modérée	0,814	0,543	0,843	0,175	0,931	0,721	0,883	0,857	0,958	0,009	0,826	
	Effet amendement dans EC	< 0,001	0,087	< 0,001	0,079	0,066	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	0,082	< 0,001	
	Effet du lieu d'échantillonnage	0,087	0,626	0,185	0,998	0,124	0,683	0,195	0,925	0,092	0,427	0,111	
Moyennes ajustées (erreur type)													
	Témoin	4,33 (0,10)	0,11 (0,01)	0,45 (0,07)	1,93 (0,13)	0,44 (0,08)	10,1 (1,5)	9,5 (1,1)	8,8 (4,2)	5,8 (3,7)	0,061 (0,006)	0,330 (0,136)	
	EC modérée sans amendement	4,24 (0,11)	0,09 (0,01)	0,58 (0,28)	1,94 (0,13)	0,41 (0,08)	9,1 (1,8)	8,4 (1,0)	24,0 (7,5)	20,7 (7,5)	0,048 (0,006)	0,948 (0,240)	
	EC modérée avec amendement	4,78 (0,14)	0,10 (0,01)	3,03 (0,78)	2,06 (0,15)	0,44 (0,08)	6,0 (1,5)	10,9 (1,2)	45,8 (13,3)	41,8 (13,3)	0,038 (0,007)	1,649 (0,269)	
	EC forte sans amendement	4,50 (0,11)	0,10 (0,01)	0,66 (0,17)	2,01 (0,14)	0,44 (0,08)	7,7 (1,2)	5,9 (1,0)	22,8 (13,2)	18,4 (12,5)	0,048 (0,005)	0,587 (0,156)	
	EC forte avec amendement	4,74 (0,17)	0,10 (0,01)	2,18 (0,45)	2,09 (0,15)	0,42 (0,08)	4,7 (2,6)	6,2 (1,3)	41,9 (8,7)	37,2 (8,2)	0,046 (0,010)	1,298 (0,250)	
Valeur de <i>p</i> des contrastes													
	Effet EC seule	0,766	0,351	0,347	0,540	0,593	0,365	0,059	0,094	0,093	0,086	0,027	
	Effet EC forte vs modérée	0,435	0,702	0,419	0,523	0,929	0,452	0,002	0,816	0,746	0,579	0,127	
	Effet amendement dans EC	0,004	0,753	< 0,001	0,203	0,895	0,096	0,210	0,064	0,062	0,405	0,003	
	Effet du lieu d'échantillonnage	0,531	0,372	0,676	0,063	0,491	0,253	0,341	0,696	0,625	0,725	< 0,001	

* Seuils de carence selon DELFES (Quimet et al. 2013b) : Pour le Ca : Saturation en Ca (sol minéral) ≤ 28,4 % et Ca/Mg (humus) ≤ 5,322. Pour le K : K/Mg (humus) < 0,324, Ca/Mg (humus) < 4,382 et K/Mg (sol minéral) < 0,436.

Tableau 3. Effets des traitements d'éclaircie commerciale (EC) et d'amendement du sol sur les concentrations totales en matière organique et en éléments dans la couche d'humus et dans les 10 premiers centimètres du sol minéral après 5 ans. Les moyennes ajustées sont accompagnées de l'erreur type entre parenthèses. Pour les contrastes, les valeurs de *p* inférieures à 0,05 apparaissent en gras. C : carbone; N : azote; P : phosphore; K : potassium; Ca : calcium; Mg : magnésium.

Couche	Traitement	Concentration totale (g·kg ⁻¹)					C/N	Concentration totale (g·kg ⁻¹)			
		Matière organique		C	N			P	K	Ca	Mg
	Moyennes ajustées (erreur type)										
	Témoin	460 (67)	241 (34)	12,7 (1,7)	17,7 (0,2)	0,90 (0,08)	2,69 (0,24)	2,52 (0,56)	0,47 (0,06)		
	EC modérée sans amendement	548 (77)	286 (41)	15,1 (1,9)	17,4 (0,3)	0,94 (0,03)	2,54 (0,38)	3,45 (0,49)	0,75 (0,03)		
	EC modérée avec amendement	444 (85)	237 (42)	12,8 (3,7)	18,7 (0,2)	1,32 (0,11)	3,12 (0,18)	30,8 (8,1)	0,88 (0,04)		
	EC forte sans amendement	500 (65)	261 (33)	14,8 (1,5)	15,5 (0,3)	0,99 (0,03)	2,86 (0,33)	3,56 (0,52)	0,68 (0,05)		
Humus	EC forte avec amendement	502 (108)	271 (51)	14,3 (2,5)	18,4 (0,4)	1,10 (0,11)	2,56 (1,36)	20,5 (13,4)	1,36 (0,10)		
	Valeur de <i>p</i> des contrastes										
	Effet EC seule	0,445	0,442	0,281	< 0,001	0,424	0,962	0,141	< 0,001		
	Effet EC forte vs modérée	0,951	0,913	0,808	0,409	0,276	0,872	0,516	0,001		
	Effet amendement dans EC	0,548	0,632	0,577	< 0,001	0,002	0,852	0,005	< 0,001		
	Effet du lieu d'échantillonnage	0,221	0,170	0,442	0,858	0,002	0,880	0,184	< 0,001		
	Moyennes ajustées (erreur type)										
	Témoin	117 (16)	54 (7)	2,9 (0,4)	18,3 (1,0)	n.d.*	n.d.	n.d.	n. d.		
	EC modérée sans amendement	133 (16)	60 (7)	2,7 (0,3)	18,6 (1,0)	n.d.	n.d.	n.d.	n. d.		
	EC modérée avec amendement	127 (22)	60 (10)	3,3 (0,5)	16,8 (1,5)	n.d.	n.d.	n.d.	n. d.		
	EC forte sans amendement	113 (16)	52 (7)	2,8 (0,4)	17,1 (1,0)	n.d.	n.d.	n.d.	n. d.		
Sol minéral 0-10 cm	EC forte avec amendement	110 (22)	53 (10)	2,1 (0,4)	17,8 (1,4)	n.d.	n.d.	n.d.	n. d.		
	Valeur de <i>p</i> des contrastes										
	Effet EC seule	0,741	0,820	0,833	0,703						
	Effet EC forte vs modérée	0,335	0,412	0,238	0,850						
	Effet amendement dans EC	0,821	0,951	0,832	0,673						
	Effet du lieu d'échantillonnage	0,783	0,690	0,896	0,097						

* n. d. : non déterminé.

Tableau 4. Effets des traitements d'éclaircie commerciale (EC) et d'amendement du sol sur les concentrations foliaires des différents macroéléments des 3 essences. Les moyennes ajustées sont accompagnées de l'erreur type entre parenthèses. Pour les contrastes, les valeurs de *p* inférieures à 0,05 apparaissent en gras. N : azote; P : phosphore; K : potassium; Ca : calcium; Mg : magnésium; Mn : manganèse.

Essence	Traitement	Concentration foliaire (g·kg ⁻¹)					
		N	P	K	Ca	Mg	Mn
Érable à sucre	Moyennes ajustées (erreur type)						
	Témoin	19,43 (0,53)	1,28 (0,07)	5,22 (0,34)	6,28 (0,63)	1,36 (0,11)	1,52 (0,16)
	EC modérée sans amendement	18,14 (0,53)	1,24 (0,07)	4,72 (0,33)	6,26 (0,63)	1,26 (0,10)	1,16 (0,14)
	EC modérée avec amendement	17,09 (0,75)	1,50 (0,12)	4,85 (0,47)	15,23 (1,05)	1,32 (0,15)	0,56 (0,19)
	EC forte sans amendement	18,76 (0,53)	1,18 (0,07)	4,96 (0,33)	6,96 (0,64)	1,24 (0,10)	1,21 (0,15)
	EC forte avec amendement	18,53 (0,75)	1,43 (1,43)	5,15 (0,47)	14,79 (1,05)	1,36 (0,15)	0,53 (0,20)
	Seuil de carence*	16,0	1,2	6,0	6,0	1,2	
	Concentrations optimales*	19,9	1,3	7,7	9,5	1,5	
	Valeur de <i>p</i> des contrastes						
	Effet EC seule	0,131	0,417	0,354	0,672	0,419	0,074
	Effet EC forte vs modérée	0,111	0,520	0,509	0,881	0,948	0,932
Effet amendement dans EC	0,321	0,011	0,700	< 0,001	0,508	< 0,001	
Bouleau jaune	Moyennes ajustées (erreur type)						
	Témoin	23,73 (0,62)	1,62 (0,08)	8,05 (0,61)	9,07 (0,74)	2,24 (0,13)	2,04 (0,19)
	EC modérée sans amendement	23,89 (0,62)	1,55 (0,09)	6,54 (0,57)	9,28 (0,75)	2,50 (0,13)	1,40 (0,15)
	EC modérée avec amendement	22,97 (0,88)	1,58 (0,16)	6,17 (0,79)	12,61 (1,15)	1,93 (0,18)	0,57 (0,19)
	EC forte sans amendement	24,76 (0,62)	1,47 (0,08)	6,44 (0,57)	7,92 (0,72)	2,16 (0,13)	1,41 (0,17)
	EC forte avec amendement	24,75 (0,88)	1,71 (0,17)	6,91 (0,82)	11,56 (1,12)	2,01 (0,18)	0,54 (0,21)
	Valeur de <i>p</i> des contrastes						
	Effet EC seule	0,437	0,268	0,034	0,606	0,570	0,004
	Effet EC forte vs modérée	0,082	0,844	0,645	0,207	0,402	0,961
	Effet amendement dans EC	0,540	0,302	0,948	< 0,001	0,022	< 0,001
	Hêtre à grandes feuilles	Moyennes ajustées (erreur type)					
Témoin		24,59 (0,70)	1,53 (0,08)	7,89 (0,50)	5,52 (0,72)	1,53 (0,13)	0,78 (0,17)
EC modérée sans amendement		22,57 (0,78)	1,38 (0,09)	5,71 (0,50)	4,61 (0,74)	1,27 (0,13)	0,75 (0,15)
EC modérée avec amendement		25,15 (1,40)	1,72 (0,19)	6,69 (0,90)	7,00 (1,37)	1,35 (0,23)	0,38 (0,21)
EC forte sans amendement		21,70 (1,88)	1,21 (0,15)	6,61 (1,19)	4,96 (1,42)	1,03 (0,25)	0,50 (0,29)
EC forte avec amendement		22,40 (1,36)	1,33 (0,20)	6,13 (0,87)	8,89 (1,46)	2,07 (0,26)	0,56 (0,26)
Valeur de <i>p</i> des contrastes							
Effet EC seule		0,048	0,049	0,034	0,496	0,048	0,526
Effet EC forte vs modérée		0,199	0,077	0,848	0,385	0,281	0,894
Effet amendement dans EC		0,246	0,160	0,779	0,014	0,012	0,492

* D'après Ouimet et Moore (2013).

Tableau 5. Effets des traitements d'éclaircie commerciale (EC) et d'amendement du sol sur la composition foliaire (valeurs de log ratio isométrique, ou LRI) des 3 essences. Les moyennes ajustées sont accompagnées de l'erreur type entre parenthèses. Pour les contrastes, les valeurs de *p* inférieures à 0,05 apparaissent en gras. N : azote; P : phosphore; K : potassium; Ca : calcium; Mg : magnésium; Mn : manganèse.

Essence	Traitement	Matière organique		N + P		N P	K + Ca + Mg		Ca + Mg K	Ca Mg	
		Éléments		K + Ca + Mg + Mn			Mn				
Moyennes ajustées (erreur type)											
	Témoin	5,209 (0,033)		0,616 (0,045)		1,926 (0,032)		0,680 (0,129)		-0,468 (0,066)	1,084 (0,045)
	EC modérée sans amendement	5,296 (0,033)		0,687 (0,045)		1,901 (0,031)		0,893 (0,130)		-0,419 (0,066)	1,129 (0,045)
	EC modérée avec amendement	5,243 (0,047)		0,699 (0,064)		1,737 (0,058)		1,796 (0,193)		-0,065 (0,093)	1,732 (0,063)
Érable à sucre	EC forte sans amendement	5,269 (0,033)		0,623 (0,046)		1,963 (0,031)		0,877 (0,130)		-0,427 (0,066)	1,220 (0,045)
	EC forte avec amendement	5,217 (0,047)		0,680 (0,072)		1,817 (0,054)		1,793 (0,193)		-0,110 (0,093)	1,699 (0,063)
Valeur de <i>p</i> des contrastes											
	Effet EC seule	0,072		0,480		0,871		0,196		0,579	0,101
	Effet EC forte vs modérée	0,511		0,473		0,119		0,955		0,740	0,595
	Effet amendement dans EC	0,196		0,553		0,001		< 0,001		< 0,001	< 0,001
Moyennes ajustées (erreur type)											
	Témoin	4,876 (0,037)		0,387 (0,054)		1,902 (0,035)		0,827 (0,136)		-0,481 (0,086)	0,995 (0,040)
	EC modérée sans amendement	4,961 (0,038)		0,502 (0,051)		1,943 (0,033)		1,144 (0,140)		-0,283 (0,086)	0,927 (0,040)
	EC modérée avec amendement	5,101 (0,054)		0,761 (0,081)		1,895 (0,068)		1,967 (0,210)		-0,158 (0,122)	1,350 (0,056)
Bouleau jaune	EC forte sans amendement	5,014 (0,038)		0,577 (0,058)		2,005 (0,032)		1,040 (0,138)		-0,371 (0,086)	0,921 (0,040)
	EC forte avec amendement	5,063 (0,053)		0,746 (0,124)		1,901 (0,062)		1,879 (0,208)		-0,318 (0,122)	1,234 (0,056)
Valeur de <i>p</i> des contrastes											
	Effet EC seule	0,015		0,021		0,085		0,114		0,145	0,146
	Effet EC forte vs modérée	0,877		0,723		0,516		0,589		0,241	0,207
	Effet amendement dans EC	0,040		0,010		0,144		< 0,001		0,401	< 0,001
Moyennes ajustées (erreur type)											
	Témoin	5,164 (0,042)		0,864 (0,085)		1,964 (0,037)		1,301 (0,148)		-0,837 (0,091)	0,918 (0,057)
	EC modérée sans amendement	5,325 (0,047)		1,027 (0,075)		1,980 (0,037)		1,241 (0,157)		-0,696 (0,100)	0,922 (0,063)
	EC modérée avec amendement	5,274 (0,083)		1,220 (0,190)		1,911 (0,108)		1,904 (0,271)		-0,678 (0,175)	1,123 (0,115)
Hêtre à grandes feuilles	EC forte sans amendement	5,424 (0,110)		1,046 (0,282)		2,044 (0,067)		1,517 (0,299)		-0,914 (0,226)	0,072 (0,157)
	EC forte avec amendement	5,177 (0,080)		0,642 (0,314)		2,011 (0,093)		1,730 (0,265)		-0,309 (0,170)	1,029 (0,113)
Valeur de <i>p</i> des contrastes											
	Effet EC seule	0,004		0,307		0,374		0,726		0,835	0,438
	Effet EC forte vs modérée	0,991		0,233		0,311		0,840		0,665	0,814
	Effet amendement dans EC	0,072		0,653		0,528		0,084		0,072	0,499

Ca/Mg ayant augmenté ($p \leq 0,001$; tableau 5). Chez le bouleau jaune, les concentrations en Ca et en Mg du feuillage ont augmenté et celles en Mn ont diminué ($p \leq 0,022$). Ces changements s'expliquent par une meilleure nutrition en Ca et en Mg et par une augmentation des rapports (K + Ca + Mg)/Mn et Ca/Mg ($p \leq 0,001$). Chez le hêtre, seules les teneurs en Ca et en Mg du feuillage ont sensiblement augmenté en réponse à l'amendement ($p \leq 0,014$). Ces changements n'ont cependant pas modifié la composition du feuillage de façon significative ($p \geq 0,072$).

3.3. Croissance

L'analyse dendrochronologique montre que l'âge mesuré à une hauteur de 1,3 m sur les arbres dominants-codominants échantillonnés en 2014 était de 46 ± 15 ans chez l'érable à sucre (moyenne \pm écart-type), de 36 ± 6 ans chez le bouleau jaune et de 49 ± 17 ans chez le hêtre. Seuls l'érable et le hêtre

étaient donc déjà présents dans la strate arbustive supérieure au moment de la coupe totale, au milieu des années 1970.

L'inventaire 5 ans après la coupe a démontré que l'accroissement annuel périodique en DHP a été plus grand dans toutes les parcelles éclaircies que dans les parcelles témoins, et ce, pour toutes les classes de diamètres, qu'elles soient prises ensemble ou analysées séparément (tableaux 6 et 8 dans Bédard *et al.* 2018). L'analyse dendrochronologique concorde avec ces résultats et indique que les traitements n'ont commencé à avoir un effet marqué qu'à partir de 2011, soit au cours de la 2^e saison de croissance après l'amendement (figure 2).

Chez l'érable, l'EC seule a permis d'augmenter l'AST des arbres individuels de 33 % ($3,2 \pm 1,2$ cm²·an⁻¹; moyenne \pm erreur type) par rapport à celui des arbres des parcelles témoins pour la période de 5 ans après

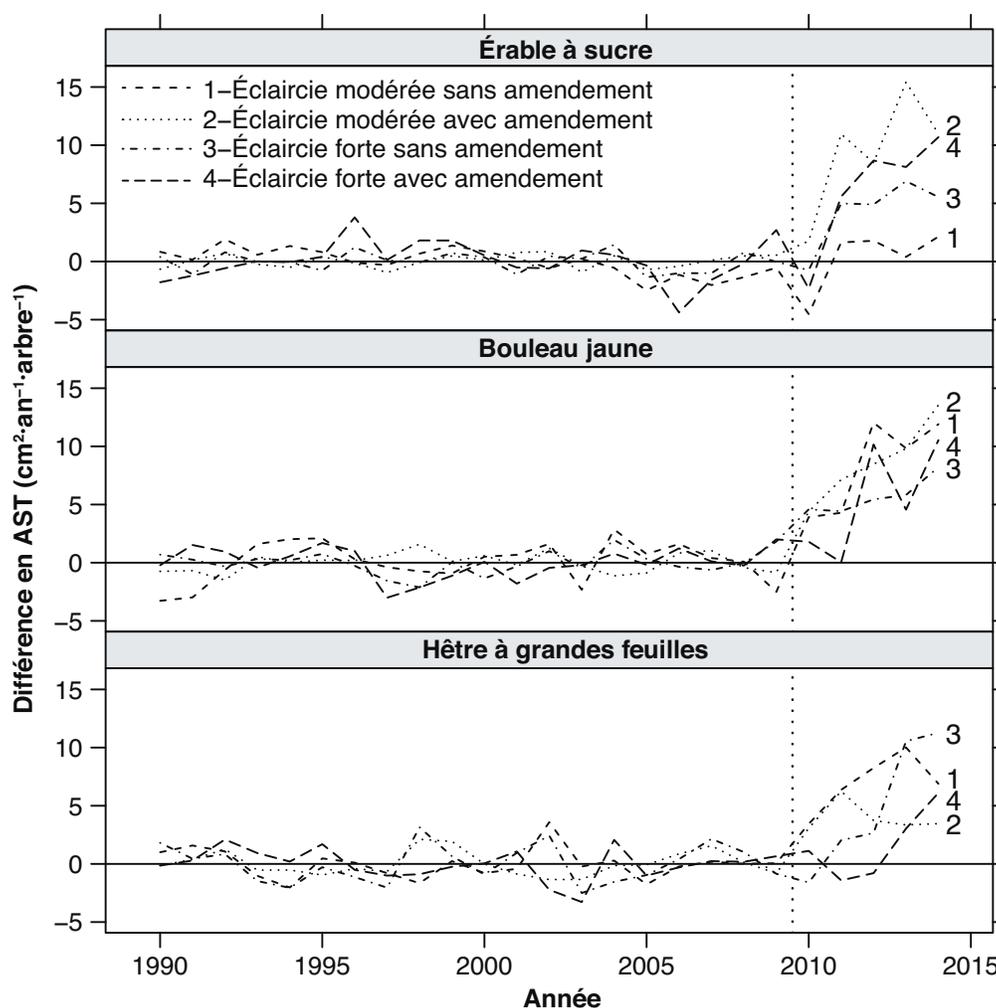


Figure 2. Différence moyenne de l'accroissement en surface terrière (AST) entre les arbres des parcelles témoins (valeur fixée à 0) et ceux des parcelles traitées, avant et après le traitement (ligne verticale pointillée) et selon l'essence.

traitement ($p = 0,008$; tableau 6; figure 2). L'intensité d'éclaircie n'a pas influencé la réaction de croissance de cette essence ($p = 0,260$). L'amendement combiné à l'EC a causé un gain d'AST supplémentaire chez l'érable de 35 % ($4,5 \pm 1,4 \text{ cm}^2\cdot\text{an}^{-1}$) par rapport à l'EC seule ($p = 0,001$), et un gain de 79 % ($7,7 \pm 1,5 \text{ cm}^2\cdot\text{an}^{-1}$) par rapport aux arbres dans les parcelles témoins ($p < 0,001$).

Chez le bouleau jaune, l'analyse dendrochronologique montre que l'EC seule a permis d'augmenter l'AST des arbres individuels de 30 % ($3,6 \pm 1,3 \text{ cm}^2\cdot\text{an}^{-1}$) par rapport à celui des arbres des parcelles témoins sur les 5 années après traitement ($p = 0,008$; tableau 6; figure 2). La réaction de croissance de cette essence à l'EC n'a cependant varié ni selon l'intensité d'EC ($p = 0,689$) ni selon l'amendement dans les parcelles éclaircies ($p = 0,564$).

Le hêtre à grandes feuilles, quant à lui, a réagi à l'EC seule, avec un AST moyen de 54 % ($5,9 \pm 3,1 \text{ cm}^2\cdot\text{an}^{-1}$) de plus que les arbres des parcelles témoins ($p = 0,055$; tableau 6; figure 2). La réaction de croissance de cette essence à l'EC n'a cependant varié ni selon l'intensité d'EC ($p = 0,508$) ni selon l'amendement dans les parcelles éclaircies ($p = 0,439$).

4. Discussion

4.1. Effets de l'éclaircie

L'EC seule a réduit légèrement le rapport C/N de l'humus et a augmenté ses concentrations en Ca échangeable et en Mg total par un facteur d'environ 1,5. Ces changements peuvent s'expliquer par l'ouverture du couvert, qui a probablement fait augmenter la température du sol et favorisé la minéralisation de l'humus. L'augmentation de la température du sol après éclaircie dans les peuplements de feuillus a déjà été documentée (Gauthier et Jacobs 2009, 2010). Ce phénomène d'activation de la minéralisation de l'humus a duré plus de 22 ans après une coupe totale dans des érablières au New Hampshire (Covington 1981). Cependant, la saturation en Ca du sol minéral est demeurée la même, ce qui n'a pu influencer le statut nutritif de l'érable à sucre. L'EC seule a causé la réduction des concentrations foliaires en K et en Mn chez le bouleau jaune et de celles en N, en P, en K, et en Mg chez le hêtre. L'analyse compositionnelle a cependant indiqué que la majorité de ces changements étaient attribuables à un effet de dilution des éléments par l'augmentation de la biomasse de feuillage. Ces résultats sont semblables à ceux obtenus dans de

Tableau 6. Effets des traitements d'éclaircie commerciale (EC) et d'amendement du sol sur l'accroissement en surface terrière (AST) moyen des 3 essences sur 5 ans. Les moyennes ajustées sont accompagnées de l'erreur type entre parenthèses. Pour les contrastes, les valeurs de p inférieures à 0,05 apparaissent en gras.

Traitement	AST ($\text{cm}^2\cdot\text{an}^{-1}\cdot\text{arbre}^{-1}$)		
	Érable à sucre	Bouleau jaune	Hêtre à grandes feuilles
Moyennes ajustées (erreur type)			
Témoin	9,73 (0,94)	11,74 (1,04)	10,89 (1,09)
EC modérée sans amendement	11,84 (1,05)	14,40 (1,18)	17,45 (2,16)
EC modérée avec amendement	17,04 (1,65)	18,04 (2,15)	15,70 (2,34)
EC forte sans amendement	14,08 (1,07)	16,19 (1,32)	16,09 (5,30)
EC forte avec amendement	17,85 (1,58)	14,74 (2,55)	12,42 (3,30)
EC modérée ou forte	12,96 (0,75)	15,30 (0,91)	16,77 (2,86)
EC modérée ou forte avec amendement	17,44 (1,13)	16,39 (1,66)	14,06 (2,02)
Valeur de p des contrastes			
Effet EC seule	0,008	0,008	0,055
Effet EC forte vs modérée	0,260	0,689	0,508
Effet amendement dans EC	0,001	0,564	0,439

jeunes érablières du Michigan, où l'EC seule n'a eu qu'un effet de dilution sur la composition foliaire des arbres (Stone et Christenson 1975).

Il est bien connu que dans les érablières, l'EC entraîne l'augmentation de la croissance des arbres résiduels (Erdmann et Oberg 1973, Leak et Yamasaki 2012). Dans la présente expérience, le gain de croissance de chaque espèce durant les 5 premières années après EC seule était le plus grand chez le hêtre ($16,8 \pm 2,9 \text{ cm}^2 \cdot \text{an}^{-1}$, soit 30 % de plus que celui de l'érable), puis chez le bouleau jaune ($15,3 \pm 0,9 \text{ cm}^2 \cdot \text{an}^{-1}$; 19 % de plus que l'érable) et enfin chez l'érable à sucre ($12,9 \pm 0,8 \text{ cm}^2 \cdot \text{an}^{-1}$). Une tendance semblable a été observée dans la réaction de croissance des tiges de ces 3 espèces, 10 ans après une coupe de jardinage dans des érablières dans la région de Lanaudière au Québec (Forget *et al.* 2007).

4.2. Effets de l'amendement

Les analyses mettent en évidence l'effet positif de l'amendement du sol après EC sur le statut nutritif et la croissance de l'érable à sucre. Généralement réalisé dans les plantations forestières, l'apport d'amendement composé de matières résiduelles fertilisantes comme les biosolides papetiers a des effets bénéfiques sur la croissance à court et à long terme des arbres (Cogliastro *et al.* 2001, Jackson *et al.* 2000, Quimet *et al.* 2015, Wang *et al.* 2006). Cependant, dans la présente étude, le produit était combiné à de la boue de chaux, de sorte qu'on ne peut affirmer que les biosolides papetiers ont eux-mêmes joué un rôle dans la réaction de croissance de l'érable à sucre. Les analyses de sol et du feuillage indiquent que c'est la boue de chaux, riche en Ca et en P, qui aurait principalement influencé la fertilité du sol et la nutrition des arbres. Au Michigan, la croissance des érables à sucre dans un jeune peuplement éclairci a aussi augmenté après l'application de cendres, riches en Ca, mais n'a pas réagi à l'application de biosolides papetiers seuls (Feldkirchner *et al.* 2003). L'épandage de biosolides papetiers aurait donc peu d'effets sur les processus biogéochimiques du sol, du moins à court terme (Kraske et Fernandez 1993). Par contre, étant donné leur richesse relative en matière organique et en azote, les biosolides papetiers peuvent avoir des effets sur la fertilité et sur la capacité de rétention en eau des sols, en particulier ceux à texture grossière renfermant peu de matière organique (Larney et Angers 2012).

Le bouleau jaune n'a pas eu de réaction de croissance à l'amendement, malgré l'amélioration de son statut nutritif, tandis que le hêtre n'a pas du tout réagi à ce traitement, du moins en ce qui a trait à la composition foliaire et à la croissance. Il est reconnu que les feuillus durs augmentent leur croissance de 16 à 100 % après un traitement chaulant (Reid et Watmough 2014). L'érable à sucre et le bouleau jaune réagissent généralement au chaulage, le premier davantage que le second. Quant au hêtre à grandes feuilles, il ne réagit généralement pas à ce traitement. Par exemple, dans une érablière du New Hampshire traitée avec une application unique de $1,12 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$ de chaux dolomitique, l'érable et le bouleau jaune ont respectivement augmenté leur croissance en diamètre de 19 % et de 6 % après 8 ans, tandis que le hêtre n'a montré aucune réaction de croissance (Safford 1973). Dans la forêt expérimentale de Duchesnay, près de l'agglomération de Québec (Québec), la croissance en biomasse de gaules d'érables éclaircis a augmenté grâce au chaulage ($3 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$ de chaux calcique) pendant les 8 ans de suivi, mais pas celle du hêtre (Duchesne *et al.* 2013). Dans une expérience en Pennsylvanie, l'application de $22 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$ de chaux dolomitique a causé l'augmentation de la croissance de l'érable à sucre sur 23 ans, tandis que le hêtre a subi une légère décroissance durant cette période (Long *et al.* 2011). Ces derniers auteurs ont attribué en partie la baisse de croissance du hêtre à l'apparition de la maladie corticale du hêtre dans leur dispositif.

4.3. Différences avec l'inventaire complet des parcelles

Dans l'inventaire complet des parcelles après 5 ans, l'accroissement annuel périodique en DHP et en volume était plus grand dans toutes les parcelles éclaircies que dans les parcelles témoins (Bédard *et al.* 2018). Ce gain de production à l'échelle du peuplement était attribuable en partie au plus grand accroissement diamétral et à la mortalité plus faible des arbres dans les parcelles éclaircies que dans les parcelles témoins. En ce qui concerne les traitements d'EC avec amendement du sol, bien que les valeurs moyennes de l'AAN aient semblé plus élevées, aucune différence significative n'avait été obtenue comparativement à l'EC seule. Le résultat différent que nous présentons ici pour l'AST à l'échelle de l'arbre s'explique d'abord par le choix des arbres pour l'analyse dendrochronologique. En effet, nous avons sélectionné un nombre restreint d'arbres dominants ou codominants dont le diamètre se

situait généralement au-dessus du 75^e percentile de l'ensemble des arbres dans les unités expérimentales inventoriées (étages dominants, codominants, intermédiaires et opprimés) (figure 3). Cette sélection tend à faire mieux ressortir l'effet des traitements si les arbres d'un étage intermédiaire ou opprimé réagissent peu ou pas à court terme. Une autre explication possible est la grande variabilité entre les blocs et même entre les unités expérimentales à l'intérieur des blocs. Par exemple, pour l'érable à sucre, qui représente près de la moitié de la surface terrière des peuplements dans les unités expérimentales 5 ans après coupe (Bédard *et al.* 2018), les effets aléatoires (blocs, parcelles et arbres) expliquaient 29 % de la variation totale observée de l'AST de cette essence dans nos analyses, ce qui est considérable. Les effets fixes (traitement, temps et AST prétraitement) en expliquaient à peine un peu plus, soit 43 %.

Dans les parcelles éclaircies et amendées, il est possible que l'augmentation de croissance que nous avons détectée chez l'érable à sucre à l'échelle de l'arbre devienne mesurable à l'échelle de l'unité expérimentale d'ici une décennie (Long *et al.* 2011, Moore *et al.* 2012), puisque le risque de mortalité est faible. En effet, la surface terrière des peuplements éclaircis n'est pas encore très grande; cela laisse place à l'augmentation du diamètre des houppiers, qui minimise les pertes par mortalité attribuables à l'autoéclaircie. De plus, 73 % des tiges étaient classées vigoureuses dans les peuplements éclaircis, tandis qu'on en comptait 57 % dans les parcelles témoins (Bédard *et al.* 2018). Enfin, la carence en Ca étant comblée dans les parcelles ayant reçu l'amendement, les érables seront plus vigoureux à long terme (Long *et al.* 2011, Moore *et al.* 2012). Il reste à savoir jusqu'à quel degré la carence en K généralisée dans ces blocs limitera l'expression de ce potentiel de vigueur (Ouimet et Fortin 1992).

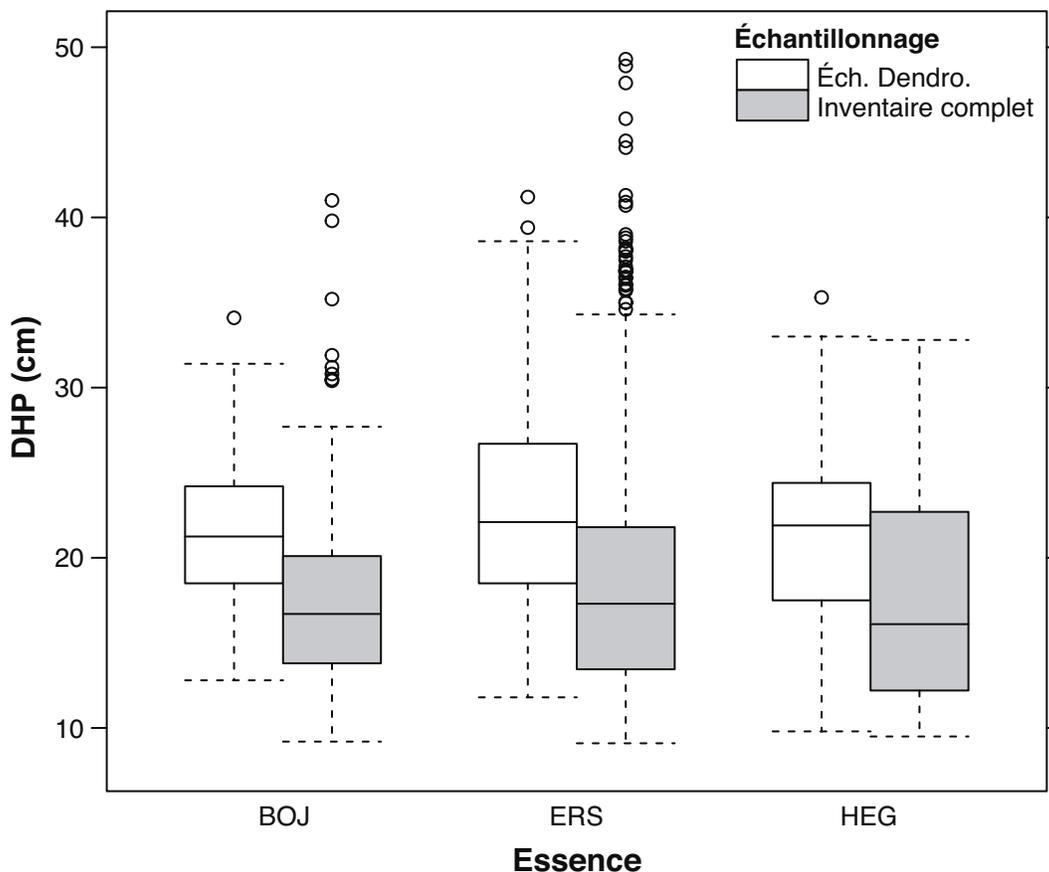


Figure 3. Comparaison, pour les 3 essences, de la distribution de valeurs des diamètres à hauteur de poitrine (DHP) des arbres échantillonnés par dendrochronologie (éch. dendro.) et de l'ensemble des arbres marchands mesurés dans l'inventaire complet des unités expérimentales du dispositif, 5 ans après traitement. Les boîtes de chaque série correspondent à l'intervalle interquartile (du 25^e au 75^e percentile); les lignes dans les boîtes correspondent à la médiane (50^e percentile); les moustaches correspondent à 1,5 fois l'interquartile (99^e percentile) et les cercles représentent les valeurs extrêmes. BOJ : bouleau jaune; ERS : érable à sucre; HEG : hêtre à grandes feuilles.

4.4. Implication pour l'aménagement des érablières

D'après l'ordre de grandeur des valeurs observées, l'amendement combiné à l'EC a permis à l'érable à sucre d'avoir le plus grand gain de croissance. Ce gain est comparable à celui du hêtre dans les parcelles d'EC seule, et à celui du bouleau jaune dans les parcelles d'EC amendées. Dans les parcelles d'EC sans amendement, l'érable à sucre était l'essence avec le plus faible gain de croissance à l'échelle de l'arbre. Ces résultats montrent que l'amendement combiné à l'EC a permis à l'érable à sucre de demeurer l'essence à croissance dominante dans les érablières à l'étude. Bien que l'EC seule permette de réduire la densité de tiges de hêtre afin de favoriser l'érable et le bouleau jaune, ce traitement n'améliore pas suffisamment la disponibilité du Ca dans le sol pour combler les carences observées.

L'érable à sucre connaît un déclin de croissance depuis 20 à 30 ans, contrairement au hêtre à grandes feuilles (Bedison *et al.* 2007, DRF 2017, Pontius *et al.* 2016). Il apparaît que la diminution de la disponibilité du Ca dans les sols, un héritage des précipitations acides (Driscoll *et al.* 2001), contribue à la réduction de la vigueur des érables à sucre et cause des changements dans la dynamique forestière des érablières (Duchesne et Ouimet 2009, Sullivan *et al.* 2013). Ces changements ont des effets négatifs à long terme sur leur valeur économique (Beier *et al.* 2017, Caputo *et al.* 2016). L'apport d'amendements riches en Ca permet de renverser cette acidification. Il y a tout de même certains risques d'ordre écologique associés à cette pratique, en particulier la possibilité d'invasion par des vers de terre exotiques (Homan *et al.* 2016, Moore *et al.* 2015). Dorénavant, l'ingénieur forestier devra considérer la saturation en Ca du sol, si ses objectifs comprennent le maintien de l'érable à sucre. Cependant, si le peuplement contient une proportion relativement forte de bouleau jaune ou de hêtre, l'apport d'amendement riche en Ca apparaît moins pertinent.

5. Conclusion

Les analyses dendrochronologiques et celles du statut nutritif du feuillage et des sols cinq ans après traitement permettent de tirer les conclusions suivantes :

- 1) L'EC à elle seule modifie peu ou pas le statut nutritif des trois essences étudiées, mais cause seulement un effet de dilution. Par contre, l'amendement du sol a considérablement modifié le statut nutritif de l'érable et du bouleau jaune.
- 2) L'EC seule a augmenté l'AST des tiges dans les parcelles traitées par rapport aux parcelles témoins.
- 3) L'augmentation de l'AST des tiges n'a pas été influencée par l'intensité d'éclaircie.
- 4) L'EC avec amendement a causé l'augmentation de l'AST des tiges chez l'érable à sucre seulement; l'augmentation a été plus grande que dans le traitement d'EC sans amendement.
- 5) L'amendement du sol dans les parcelles éclaircies a grandement amélioré les propriétés physico-chimiques du sol, en particulier la disponibilité en Ca.

À court terme, les effets de l'EC et de l'amendement du sol dans de jeunes peuplements de feuillus dont les sols montraient une carence importante en Ca sont positifs. D'abord, à l'échelle des peuplements, l'EC a permis d'augmenter la surface terrière des arbres d'avenir et la production. Ensuite, à l'échelle de l'arbre, les effets positifs anticipés de l'amendement du sol sur l'AST sont significatifs pour les érables à sucre dominants et codominants. Ainsi, les résultats indiquent que l'amendement dans les parcelles éclaircies a permis de maintenir la croissance dominante de l'érable à sucre dans ces érablières. Le suivi de ce dispositif permettra de mieux estimer les effets à plus long terme et à l'échelle du peuplement de l'EC et de l'amendement du sol sur la croissance, la qualité et la vigueur des arbres dans ces jeunes érablières.

Remerciements

Nous tenons à remercier les équipes techniques de la DRF composées de MM. Benoît Toussaint et Simon Désalliers pour les prélèvements foliaires, dendrochronologiques et du sol, et de MM. Jocelyn Hamel, Étienne Boulay, Pierre Laurent, Pierrot Boulay, Éric Labrecque et Jean-François Leblond pour l'établissement du dispositif. Nous remercions aussi les étudiants et les consultants embauchés par la compagnie Domtar pour l'aide fournie lors du mesurage des unités expérimentales. De plus, des remerciements s'adressent à MM. Patrick Cartier, Christian Guimond, Éric Lapointe, Raymond Vanier et André Gravel de la compagnie Domtar, pour leur collaboration et leur appui. Nous remercions Mme Lise Charette, responsable de la révision scientifique, ainsi que M. Philippe Nolet et un autre réviseur anonyme pour leurs commentaires judicieux sur la version préliminaire du document. Nous remercions également Mmes Denise Tousignant, Viviane St-Arnaud, Nathalie Langlois et Maripierre Jalbert pour l'édition, la mise en page et la conception graphique de cette note de recherche. Cette publication est une contribution du projet n° 142332023 sur le développement de traitements sylvicoles alternatifs à la coupe de jardinage par pied d'arbre dans des peuplements de la sous-zone de la forêt décidue.

Références bibliographiques

- Bédard, S., M.M. Gauthier, F. Guillemette et R. Ouimet, 2018. *Effets après 5 ans de l'éclaircie commerciale mécanisée et de l'amendement du sol sur la production de jeunes érablières en Estrie*. Gouvernement du Québec, ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs, Direction de la recherche forestière. Note de recherche forestière n° 149. 18 p. [<https://www.mffp.gouv.qc.ca/documents/forets/recherche/Note149.pdf>]
- Bedison, J.E., A.H. Johnson, S.A. Willig, S.L. Richter et A. Moyer, 2007. *Two decades of change in vegetation in Adirondack spruce-fir, northern hardwood and pine-dominated forests*. J. Torrey Bot. Soc. 134(2): 238-252.
- Beier, C.M., J. Caputo, G.B. Lawrence et T.J. Sullivan, 2017. *Loss of ecosystem services due to chronic pollution of forests and surface waters in the Adirondack region (USA)*. J. Environ. Manage. 191: 19-27. dx.doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.12.069
- Bunn, A., M. Korpela, F. Biondi, F. Campelo, P. Mérian, M. Mudelsee, F. Qeadan, M. Schulz et C. Zang, 2013. *dplR: Dendrochronology Program Library in R*. R package version 1.5.7.
- Caputo, J., C.M. Beier, T.J. Sullivan et G.B. Lawrence, 2016. *Modeled effects of soil acidification on long-term ecological and economic outcomes for managed forests in the Adirondack region (USA)*. Sci. Total Environ. 565: 401-411. doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.04.008
- Cogliastro, A., G. Domon et S. Daigle, 2001. *Effects of wastewater sludge and woodchip combinations on soil properties and growth of planted hardwood trees and willows on a restored site*. Ecol. Eng. 16: 471-485.
- Covington, W.W., 1981. *Changes in forest floor organic matter and nutrient content following clear cutting in northern hardwoods*. Ecology 62: 41-48.
- [DRF] Direction de la recherche forestière, 2017. *Expansion du hêtre à grandes feuilles et déclin de l'érable à sucre au Québec : portrait de la situation, défis et pistes de solution*. Avis scientifique du comité chargé d'étudier l'écologie et la sylviculture des peuplements contenant du hêtre et de l'érable. Gouvernement du Québec, ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs, Direction de la recherche forestière. Avis scientifique. 146 p. [<http://mffp.gouv.qc.ca/publications/forets/connaissances/recherche/AvisScientHEG-ERS.pdf>]
- Driscoll, C.T., G.B. Lawrence, A.J. Bulger, T.J. Butler, C.S. Cronan, C. Eagar, K.F. Lambert, G.E. Likens, J.L. Stoddard et K.C. Weathers, 2001. *Acidic deposition in the northeastern United States: Sources and inputs, ecosystems effects, and management strategies*. BioScience 51(3): 180-198.
- Duchesne, L. et R. Ouimet, 2009. *Present-day expansion of American beech in northeastern hardwood forests: Does soil base status matter?* Can. J. For. Res. 39(12): 2273-2282. doi:10.1139/X09-172.
- Duchesne, L., J.-D. Moore et R. Ouimet, 2013. *Partitioning the effect of release and liming on growth of sugar maple and American beech saplings*. North. J. Appl. For. 30(1): 28-36.

- Erdmann, G.G. et R.R. Oberg, 1973. *Fifteen-year results from six cutting methods in second-growth northern hardwoods*. U.S.D.A, Forest Service, North Central Forest Experiment Station, St. Paul, MN (États-Unis). Research Paper NC-100. 12 p. [<https://www.fs.usda.gov/treearch/pubs/10621>]
- Feldkirchner, D.C., C. Wang, S.T. Gower, E.L. Kruger et J. Ferris, 2003. *Effects of nutrient and paper mill biosolids amendments on the growth and nutrient status of hardwood forests*. For. Ecol. Manage. 177(1-3): 95-116.
- Forget, É., P. Nolet, F. Doyon, S. Delagrangé et Y. Jardon, 2007. *Ten-year response of northern hardwood stands to commercial selection cutting in southern Quebec, Canada*. For. Ecol. Manage. 242(2-3): 764-775.
- Gauthier, M.M. et D.F. Jacobs, 2009. *Short-term physiological responses of black walnut (Juglans nigra L.) to plantation thinning*. For. Sci. 55(3): 221-229. doi: 10.1093/forestscience/55.3.221.
- Gauthier, M.M. et D.F. Jacobs, 2010. *Morphological and physiological responses of hardwood trees to plantation thinning*. Dans : Stanturf, J.A. (éd.). *Proceedings of the 14th biennial southern silvicultural research conference*. U.S.D.A., Forest Service, Southern Research Station. General Technical Report SRS-121. Athens, GA (États-Unis). p. 427-429. [<https://www.srs.fs.usda.gov/pubs/35131>]
- Gosselin, J., 2007. *Guide de reconnaissance des types écologiques de la région écologique 2c - Coteaux de l'Estrie*. Gouvernement du Québec, ministère des Ressources naturelles et de la Faune, Forêt Québec, Direction des inventaires forestiers. 186 p. [<http://mffp.gouv.qc.ca/publications/forets/connaissances/guide-ecologique-2c.pdf>]
- Homan, C., C. Beier, T. McCay et G. Lawrence, 2016. *Application of lime (CaCO₃) to promote forest recovery from severe acidification increases potential for earthworm invasion*. For. Ecol. Manage. 368: 39-44. dx.doi.org/10.1016/j.foreco.2016.03.002
- Jackson, M.J., M.A. Line, S. Wilson et S.J. Hetherington, 2000. *Application of composted pulp and paper mill sludge to a young pine plantation*. J. Environ. Quality 29(2): 407-414. doi: 10.2134/jeq2000.00472425002900020006x.
- Kalra, Y.P. et D.G. Maynard, 1992. *Méthodes d'analyse des sols forestiers et des tissus végétaux*. Forêts Canada, Région du Nord-Ouest, Centre de Foresterie du Nord, Edmonton (Alberta). Rapport d'information NOR-X-319F. 129 p. [<https://cfs.nrcan.gc.ca/publications?id=11844>]
- Kraske, C.R. et I.J. Fernandez, 1993. *Biogeochemical responses of a forested watershed to both clearcut harvesting and papermill sludge application*. J. Environ. Quality 22(4): 776-786. doi 10.2134/jeq1993.00472425002200040020x.
- Larney, F.J. et D.A. Angers, 2012. *The role of organic amendments in soil reclamation: A review*. Can. J. Soil Sci. 92(1): 19-38. doi: 10.4141/cjss2010-064.
- Leak, W.B. et M. Yamasaki, 2012. *80 years of thinning research on northern hardwoods in the Bartlett Experimental Forest, New Hampshire*. U.S.D.A., Forest Service, Northern Research Station, Newtown Square, PA. (États-Unis). Res. Pap. NRS-20. 8 p. [<https://www.nrs.fs.fed.us/pubs/40927>]
- Lenth, R.V., 2016. *Least-Squares Means: The R Package lsmeans*. J. Stat. Softw. 69(1): 1-33. doi:10.18637/jss.v069.i01. [<http://CRAN.R-project.org/package=lsmeans>]
- Long, R.P., S.B. Horsley et T.J. Hall, 2011. *Long-term impact of liming on growth and vigor of northern hardwoods*. Can. J. For. Res. 41(6): 1295-1307.
- [MFFP] Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs, 2015. *Norme de stratification écoforestière quatrième inventaire écoforestier du Québec méridional*. Gouvernement du Québec, ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs, Direction des inventaires forestiers. 101 p. [<https://www.mffp.gouv.qc.ca/forets/inventaire/pdf/norme-stratification.pdf>]
- Moore, J.-D., R. Ouimet et L. Duchesne, 2012. *Soil and sugar maple response 15 years after dolomitic lime application*. For. Ecol. Manage. 281: 130-139.
- Moore, J.-D., R. Ouimet, R.P. Long et P.A. Bukaveckas, 2015. *Ecological benefits and risks arising from liming sugar maple dominated forests in north-eastern North America*. Environ. Rev. 23: 66-77.
- Ouimet, R. et J.M. Fortin, 1992. *Growth and foliar nutrient status of sugar maple: incidence of forest decline and reaction to fertilization*. Can. J. For. Res. 22(5): 699-706.

- Ouimet, R., J.-D. Moore et L. Duchesne, 2013a. *Mise à jour des seuils de fertilité des sols pour diagnostiquer les carences en calcium, potassium et phosphore chez l'érable à sucre*. Gouvernement du Québec, ministère des Ressources naturelles, Direction de la recherche forestière. Note de recherche forestière n° 137. 18 p. [<http://mffp.gouv.qc.ca/publications/forets/connaissances/recherche/Ouimet-Rock/Note137.pdf>]
- Ouimet, R., J.-D. Moore et L. Duchesne, 2013b. *Soil thresholds update for diagnosing foliar calcium, potassium, or phosphorus deficiency of sugar maple*. *Comm. Soil Sci. Plant Anal.* 44(16): 2408-2427. doi: 10.1080/00103624.2013.803563.
- Ouimet, R., A.P. Pion et M. Hébert, 2015. *Long-term response of forest plantation productivity and soils to a single application of municipal biosolids*. *Can. J. Soil Sci.* 95(2): 187-199. doi:10.4141/cjss-2014-048.
- Parent, S.É., L.É. Parent, D.E. Rozanne, A. Hernandez et W. Natale, 2012. *Nutrient balance as paradigm of plant and soil chemometrics*. Dans : Issaka, R.N. (éd.). *Soil fertility*. doi: 10.5772/53343 p. 83-114. [<https://www.intechopen.com/books/soil-fertility/nutrient-balance-as-paradigm-of-plant-and-soil-chemometrics>]
- Parent, S.É., L.É. Parent, J.J. Egozcue, D.E. Rozane, A. Hernandez, L. Lapointe, V.H. Gentile, K. Naess, S. Marchand, J. Lafond, D. Mattos, Jr., P. Barlow et W. Natale, 2013. *The plant ionome revisited by the nutrient balance concept*. *Front. Plant Sci.* 4: Art. 39. doi 10.3389/fpls.2013.00039.
- Pinheiro, J., D. Bates, S. DebRoy, D. Sarkar et R Core Team, 2015. *nlme: Linear and nonlinear mixed effects models. Package R version 3.1-120*. [<http://CRAN.R-project.org/package=nlme>]
- Pontius, J., J.M. Halman et P.G. Schaberg, 2016. *Seventy years of forest growth and community dynamics in an undisturbed northern hardwood forest*. *Can. J. For. Res.* 46(7): 959-967. doi: 10.1139/cjfr-2015-0304.
- Reid, C. et S.A. Watmough, 2014. *Evaluating the effects of liming and wood-ash treatment on forest ecosystems through systematic meta-analysis*. *Can. J. For. Res.* 44(8): 867-885. doi:10.1139/cjfr-2013-0488.
- Safford, L.O., 1973. *Fertilization increases diameter growth of birch-beech-maple trees in New Hampshire*. U.S.D.A., Forest Service, Northeastern Forest Experiment Station, Research Note NE-182. Upper Darby, PA. (États-Unis) 4 p. [<https://www.fs.usda.gov/treearch/pubs/19481>]
- Saucier, J.P., J.F. Bergeron, P. Grondin et A. Robitaille, 1998. *Les régions écologiques du Québec méridional (3^e version) : un des éléments du système hiérarchique de classification écologique du territoire mis au point par le ministère des Ressources naturelles du Québec*. Supplément de l'Aubelle 124: 12 p.
- Stone, D.M. et D.R. Christenson, 1975. *Effects of thinning and fertilization on foliar nutrient concentrations of sugar maple*. *Can. J. For. Res.* 5(3): 410-413.
- Sullivan, T.J., G.B. Lawrence, S.W. Bailey, T.C. McDonnell, C.M. Beier, K.C. Weathers, G.T. McPherson et D.A. Bishop, 2013. *Effects of acidic deposition and soil acidification on sugar maple trees in the Adirondack Mountains, New York*. *Environ. Sci. Technol.* 47(22): 12687-12694.
- van den Boogaart, K.G., R. Tolosana et M. Bren, 2014. *Compositions : Compositional data analysis. R package version 1.40-1*. [<http://CRAN.R-project.org/package=compositions>]
- Wang, H., M.O. Kimberley, G.N. Magesan, R.B. McKinley, J.R. Lee, J.M. Lavery, P.D.F. Hodgkiss, T.W. Payn, P.J. Wilks, C.R. Fisher et D.L. McConchie, 2006. *Midrotation effects of biosolids application on tree growth and wood properties in a Pinus radiata plantation*. *Can. J. For. Res.* 36(8): 1921-1930. doi: 10.1139/x06-084.



La Direction de la recherche forestière a pour mandat de participer activement à l'orientation de la recherche et à l'amélioration de la pratique forestière au Québec, dans un contexte d'aménagement forestier durable, en réalisant des travaux de recherche scientifique appliquée. Elle développe de nouvelles connaissances, du savoir-faire et du matériel biologique et contribue à leur diffusion ou leur intégration au domaine de la pratique. Elle subventionne aussi des recherches en milieu universitaire, le plus souvent dans des créneaux complémentaires à ses propres travaux.

On peut citer ce texte en indiquant la référence.

Citation recommandée :

Ouimet, R., F. Guillemette, S. Bédard et M.-M. Gauthier, 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*. Gouvernement du Québec, ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs, Direction de la recherche forestière. Note de recherche forestière n° 150. 20 p.

ISSN 0834-4833

ISBN : 978-2-550-80788-9

ISBN (pdf) : 978-2-550-80789-6

G.F.D.C. 237.4 242--015(714)

L.C. SD 396.5 408

Dépôt légal 2018

Bibliothèque nationale du Québec

© 2018 Gouvernement du Québec

**Forêts, Faune
et Parcs**

Québec 