



Effet à court terme d'une coupe partielle suivie d'un épandage de matière résiduelle fertilisante sur la croissance des érables à sucre dans des érablières à vocation forestière en Estrie

Rock Ouimet, ing.f., Ph. D. et Gabriel L. D. Weiss, agr.^a

Résumé

Les matières résiduelles fertilisantes (MRF) constituent une solution de rechange intéressante à l'utilisation d'engrais de synthèse et de chaux, tant sur le plan économique qu'environnemental. Nous avons échantillonné 12 blocs expérimentaux dans des érablières en Estrie (Québec, Canada) où l'on avait effectué une coupe partielle et où, 1 à 4 ans après celle-ci, on avait épandu $25 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$ d'une MRF composée essentiellement de cendres de bois et de lie de liqueur verte, sur environ la moitié de la surface de chaque bloc. Les sols de ces blocs montraient généralement une carence en calcium. Nous avons mesuré la croissance en surface terrière des érables à sucre résiduels dans les 2 parcelles de chaque bloc avant l'application de la coupe partielle, après la coupe, puis de 2 à 6 ans après la fertilisation. La coupe partielle a entraîné une augmentation de croissance de 22 % par rapport à celle avant intervention. Les résultats indiquent que la réaction de croissance après fertilisation est très variable selon le bloc et la classe de diamètre à hauteur de poitrine (DHP) des arbres. C'est seulement chez 70 % des arbres dont le DHP était inférieur à 30 cm que nous avons détecté que l'accroissement en surface terrière tendait à augmenter (de l'ordre de $1 \text{ cm}^2\cdot\text{an}^{-1}$) après la fertilisation, par rapport aux arbres éclaircis seulement. Chez les arbres ayant un DHP de plus de 30 cm, la réponse observée à la fertilisation a plutôt été une baisse de croissance radiale.

Mots-clés : *Acer saccharum*, accroissement en surface terrière, cendres, coupe partielle, érable à sucre, liqueur verte

Abstract

Fertilizing residuals are an interesting alternative to synthetic fertilizers and lime, both economically and environmentally. We sampled 12 experimental blocks in various maple stands in the Eastern Townships (Québec, Canada) where partial cutting had been carried out and where, 1 to 4 years later, $25 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$ of a fertilizing residue composed mainly of wood ash and green liquor dreg had been applied on approximately half the area of each block. The soils in these blocks were generally calcium-deficient. We measured basal area growth of residual sugar maples in both plots of each block before partial cutting, after cutting and 2–6 years after fertilization. Partial cutting resulted in a 22% increase in growth compared with pre-intervention growth. Results show that tree growth response after fertilization is highly variable depending on block and tree diameter at breast height (DBH) class. Only in 70% of trees with a DBH smaller than 30 cm did we detect a tendency for basal area increment to increase (by around $1 \text{ cm}^2\cdot\text{yr}^{-1}$) after fertilization, compared with thinned trees only. In trees with a DBH greater than 30 cm, the observed response to fertilization was rather a decrease in radial growth.

Keywords : *Acer saccharum*, basal area increment, green liquor, partial cut, sugar maple, wood ash

Ministère des Ressources naturelles et des Forêts
Direction de la recherche forestière
2700, rue Einstein
Québec (Québec) G1P 3W8
Téléphone : 418 643-7994
Télécopieur : 418 643-2165
Courriel : recherche.forestiery@mrnf.gouv.qc.ca
Site Web : recherche.forestiery.gouvernementale

a Direction régionale de l'Estrie, ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation, 5527, rue Frontenac, bureau 308, Lac-Mégantic (Québec) G6B 1H6
Correspondance : gabriel.weiss@mapaq.gouv.qc.ca

1. Introduction

Les précipitations acides ont entraîné l'acidification des eaux de surface (Dupont 1992, Jeffries *et al.* 2005) et l'augmentation du lessivage des éléments minéraux des sols forestiers dans l'est de l'Amérique du Nord (Jeffries et Ouimet 2005, Likens *et al.* 1996). Entre autres, les modifications chimiques du sol associées aux dépôts acides, en particulier l'appauvrissement en calcium (Ca), et le réchauffement climatique ont contribué au déclin de l'érable à sucre (*Acer saccharum* Marshall) au Québec (Boakye *et al.* 2023, DRF 2017, Duchesne *et al.* 2002, Ouimet *et al.* 2006). Bien que la baisse des apports d'acidité ait permis d'observer certains signes de rétablissement chimique des sols (Lawrence *et al.* 2015), celui-ci sera lent et prendra plusieurs décennies. Le chaulage peut néanmoins accélérer ce processus (Moore *et al.* 2012, 2015).

Cependant, par rapport aux matières résiduelles fertilisantes (MRF), la chaux est un produit relativement dispendieux en raison de son coût d'extraction et de transport. L'exploitation des sources de chaux est également associée à l'émission importante de dioxyde de carbone (CO₂) dans l'atmosphère (de 1 à 1,9 Mg de CO₂ par Mg de chaux produite; Schorcht *et al.* 2013). De plus, les MRF produites qui ne sont pas valorisées doivent être acheminées dans un site d'enfouissement. Or, le gouvernement du Québec a pour objectif de réduire de moitié la quantité de résidus ultimes enfouis dans la province d'ici 2025 (RecycQuébec 2022). Par conséquent, ces MRF constituent une option intéressante pour remplacer la chaux, tant sur le plan économique qu'environnemental (da Costa *et al.* 2020).

Depuis près d'une décennie, la compagnie Domtar effectue des opérations d'épandage de MRF sur ses terres forestières en Estrie lors de travaux sylvicoles. Les travaux de recherche associés démontrent que l'érable à sucre réagit positivement à ce traitement (Arseneau *et al.* 2021, Ouimet *et al.* 2018). L'objectif de cette note de recherche est d'évaluer comment la croissance de l'érable à sucre réagit à court terme (sur 2 à 6 ans) à une coupe partielle suivie d'un épandage opérationnel de MRF. Nous posons les hypothèses 1) que la coupe partielle a entraîné une augmentation de l'accroissement en surface terrière des arbres résiduels, et 2) que la fertilisation subséquente avec la MRF a amélioré davantage la croissance de ces arbres.

2. Matériel et méthodes

2.1. Sites d'étude

Les sites d'étude sont situés en Estrie, sur les terres de la compagnie Domtar (figure 1). Douze blocs d'une superficie de 10 à 17 ha chacun ont été sélectionnés sur la base du temps écoulé depuis l'épandage de la MRF, soit un minimum de 2 ans. Ils représentent plusieurs types d'érablières à feuillus tolérants à l'ombre, de classe de hauteur de 11,5 m et plus (classes 1, 2, 3) et d'âges divers (classe d'âge allant de jeune inéquienne à vieux inéquienne; tableau 1). Ils sont situés sur des pentes nulles à douces (classes A, B, C) et sur des dépôts de till glaciaire indifférencié de 50 cm et plus d'épaisseur (classes 1A et 1AY) à drainage modéré (classes 30 et 31). Le type écologique est l'érablière à tilleul sur dépôt minéral mince à épais, de texture moyenne et de drainage mésique (FE22), à l'exception du bloc n° 10, qui appartient plutôt au type écologique de l'érablière à bouleau jaune sur dépôt minéral mince à épais, de texture moyenne et à drainage subhydrique (FE35). Les sols sont principalement des podzols (Groupe de travail sur la classification des sols 2002).

Les peuplements sont situés à une altitude variant de 230 à 330 m. La température moyenne annuelle dans la région est de 5 °C, et les précipitations annuelles moyennes varient de 1 000 à 1 100 mm, dont 25 à 30 % tombent sous forme de neige (Gosselin 2007).

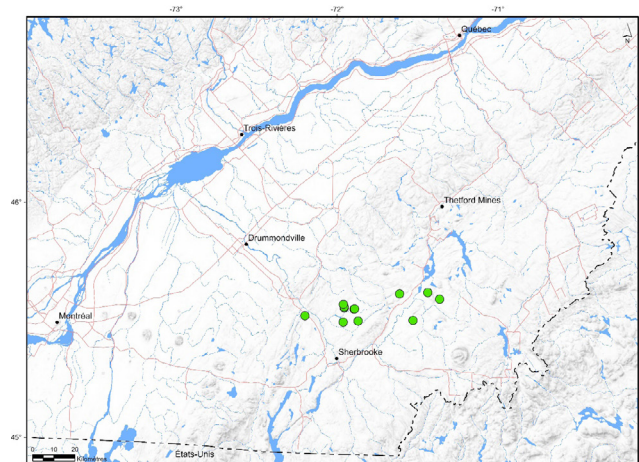


Figure 1. Carte de l'emplacement des 12 blocs d'érablières à l'étude dans la région de l'Estrie (Québec, Canada). À noter que certains symboles sont superposés, car les sites sont très proches les uns des autres.

Tableau 1. Caractéristiques des peuplements sélectionnés pour l'expérience. Sources : carte écoforestière du 4^e inventaire écoforestier décennal (MRNF) et données d'intervention fournies par Domtar.

Bloc	Groupement d'essences*	Classe de densité de couvert†	Classe de hauteur‡	Classe d'âge§	Classe de pente	Dépôt de surface¶	Classe de drainage#	Type éco-logique**	Superficie (ha)	Type de coupe partielle††	Année de la coupe	Surface terrière récoltée (%)	Année de fertilisation
1	ESFX	B	2	JIN	B	1AY	30	FE22	13,2	CJ	2015	28	2016
2	ESFT	B	1	VIN	B	1AY	30	FE22	16,7	CJ	2011	28	2014
3	ERFT	A	1	JIN	A	1A	30	FE22	9,8	CJ	2010	24	2014
4	ESFT	B	2	JIN	C	1AY	30	FE22	10,5	EC	2015	31	2016
5	ERFT	B	2	JIN	B	1A	30	FE22	10,6	CJ	2011	20	2014
6	ERFT	B	1	JIN	B	1A	30	FE22	10,2	CJ	2016	28	2017
7	ERFT	B	1	JIN	B	1A	30	FE22	11,0	CJ	2016	28	2017
8	FTES	A	2	JIN	B	1AY	30	FE22	17,4	EC	2014	27	2015
9	ESEO	B	3	30	C	1A	30	FE22	16,0	EC	2017	40	2018
10	ESFT	B	1	JIN	B	1A	30	FE22	10,6	CJ	2017	22	2018
11	ESFT	B	2	50	C	1A	30	FE22	11,7	EC	2016	33	2017
12	FTES	A	2	VIN	C	1A	31	FE35	11,4	CJ	2012	35	2015

* ESFX = érablière à sucre à feuillus; ESFT = érablière à sucre à feuillus tolérants; FTES = Peuplement de feuillus tolérants et érables à sucre; ESEO = érablière à sucre à érable rouge.

† A : ≥ 80 %, B : ≥ 60 % et < 80 %.

‡ ≥ 22 m pour la classe 1; ≥ 17 m et < 22 m pour la classe 2; ≥ 22 m pour la classe 3.

§ JIN = jeune inéquienne; VIN = vieux inéquienne; 30 = 21-40 ans; 50 = 41-60 ans.

|| Taux d'inclinaison : A = 0-3 %; B = 4-8 %; C = 9-15 %.

¶ 1A = till indifférencié d'épaisseur > 1 m; 1AY = till indifférencié d'épaisseur variant de 0,5 à 1 m.

30 = modéré; 31 = modéré avec drainage latéral.

** FE22 = érablière à tilleul sur station au dépôt de mince à épais, de texture moyenne et de drainage mésique; FE35 = érablière à bouleau jaune sur station au dépôt de mince à épais, de texture moyenne et de drainage subhydrique.

†† CJ = coupe de jardinage; EC = éclaircie commerciale.

2.2. Traitements sylvicoles

Les peuplements ont été traités par une coupe partielle (soit une coupe de jardinage, soit une éclaircie commerciale) entre 2010 et 2017, lors de laquelle 20 à 40 % (en moyenne, 29 %) de leur surface terrière a été prélevée (tableau 1). Un à deux ans plus tard (en moyenne, 2 ans), environ la moitié de la surface de ces peuplements (figure 2) a été fertilisée avec une MRF épandue de façon opérationnelle par des épandeurs mécaniques à plateaux, fabriqués par Domtar, en suivant les sentiers de débardage dans les peuplements. Cette MRF était essentiellement composée aux deux tiers de cendres et à un tiers de lie de liqueur verte, un résidu riche en carbonate de calcium issu de la fabrication de pâte à papier. Les deux matières sont produites par l'usine de Domtar à Windsor (Québec). La composition chimique moyenne de cette MRF est présentée au tableau 2.

La MRF a été appliquée dans les peuplements à un taux moyen de 25 Mg·ha⁻¹. En gros, à ce taux, son pouvoir neutralisant équivalait à 9 Mg·ha⁻¹ de chaux; elle fournissait 3,8 Mg·ha⁻¹ de matière organique, 2,5 Mg·ha⁻¹ de Ca, 176 kg·ha⁻¹ de magnésium (Mg), 74 kg·ha⁻¹ de phosphore (P₂O₅), 250 kg·ha⁻¹ de potassium (K₂O) et 344 kg·ha⁻¹ de sodium (Na), mais pour ainsi dire aucun azote (N). Cette MRF contenait cependant une certaine quantité d'éléments indésirables (p. ex., du manganèse [Mn], du cadmium [Cd] et du plomb [Pb])^b, mais à des teneurs respectant le critère C2 ou C2 alternatif^c des normes réglementaires sur les matières résiduelles fertilisantes (Hébert 2015). Il faut rappeler que ces normes sont relativement conservatrices par rapport aux exigences hors Québec. La distance d'épandage était d'environ 10 m de chaque côté du sentier. En revanche, l'application n'a pas semblé très uniforme, selon nos observations de l'épandeur en activité sur le terrain.

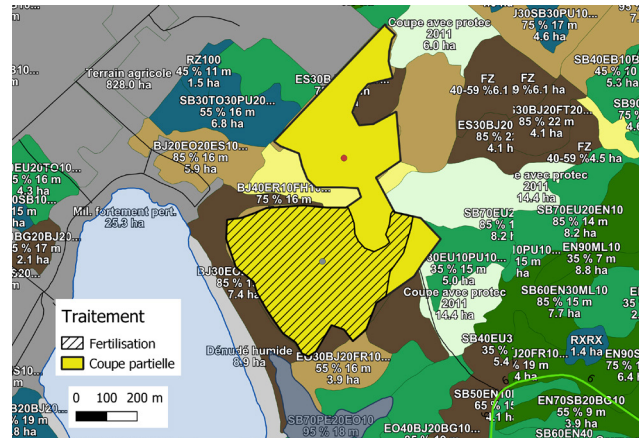


Figure 2. Exemple de l'un des blocs expérimentaux, comprenant deux traitements : 1) coupe partielle (aire en jaune avec point rouge au centre) et 2) coupe partielle suivie d'une fertilisation avec la matière résiduelle fertilisante (aire hachurée avec point gris au centre). Les points indiquent le centroïde des lieux d'échantillonnage.

2.3. Échantillonnage

Dans la dernière semaine de juillet 2020, soit de 3 à 10 ans après le traitement de coupe partielle (en moyenne, 6 ans) et de 2 à 6 ans après fertilisation (en moyenne, 4 ans), nous avons sélectionné au hasard 20 érables à sucre à l'apparence saine chacun des 12 blocs, soit 10 arbres dans la parcelle fertilisée et 10 arbres dans la parcelle témoin voisine dans chaque bloc. Les arbres sélectionnés étaient tous en position de dominant ou de codominant après la coupe et situés à une distance de 3 à 5 m des sentiers de débardage. Nous avons choisi cette distance des sentiers pour nous assurer que le sol à leur base avait bel et bien reçu de la MRF lors de l'épandage qui, selon nos observations, nous semblait avoir été plus homogène à cette distance du sentier.

Le diamètre à hauteur de poitrine (DHP, mesuré à 1,3 m du sol) des arbres a été mesuré, et une carotte de sondage a été prélevée à cette même hauteur. De plus, des échantillons composites de sol (10 sous-échantillons d'humus et 10 sous-échantillons de sol minéral à une profondeur de 0-20 cm dans chaque parcelle) ont été prélevés près des arbres sélectionnés à l'aide d'une pelle et d'une tarière.

^b Il n'est pas recommandé d'épandre des MRF dans des érablières à vocation acéricole, car l'absorption possible par les arbres de métaux lourds, comme le plomb, risque de contaminer la sève et ensuite le sirop d'érable.
^c Le critère C2 pour les MRF concerne les produits qui ont été abandonnés ou qui sont destinés à l'abandon, qu'ils aient été produits, utilisés ou mis au rebut. Il est basé sur les teneurs limites en contaminants chimiques, tandis que le critère C2 alternatif est basé sur le pouvoir neutralisant ou la teneur en phosphore (Hébert 2015).

Tableau 2. Composition chimique moyenne de la matière résiduelle fertilisante. Source : Domtar.

Variable	Concentration	Taux d'application* (kg·ha ⁻¹)
Composition — cendres	66,7 % m. h. [†]	17 000
Composition — lie de liqueur verte	33,3 % m. h.	8 000
Matière sèche (m. s. [†])	53 % m. h.	13 000
Carbone organique	5,42 % m. s.	2 872
Matière organique	7,24 % m. s.	3 837
pH (unités de pH)	11,5	s. o.
Pouvoir neutralisant (sans unité)	61,48	
Équivalent en chaux	2,75 t ha/t chaux	9

Élément minéral	Concentration (mg·kg ⁻¹)	Taux d'application* (kg·ha ⁻¹)
Arsenic (As)	32,22	0,43
Azote (N)	337	4
Bore (B)	139	1,84
Cadmium (Cd)	9,73	0,13
Calcium (Ca)	192 089	2 544
Chrome (Cr)	36,25	0,48
Cobalt (Co)	5,54	0,07
Cuivre (Cu)	106	1,41
Fer (Fe)	5 767	76
Magnésium (Mg)	13 287	176
Manganèse (Mn)	5 389	71
Mercuré (Hg)	0,14	0,002
Molybdène (Mo)	2,83	0,038
Nickel (Ni)	25,62	0,339
Phosphore total (P)	2 741	36
Phosphore total (P ₂ O ₅)	5 583	74
Plomb (Pb)	208	2,76
Potassium (K)	15 464	205
Potassium (K ₂ O)	18 939	251
Sélénium (Se)	1,04	0,014
Sodium (Na)	26 005	344
Zinc (Zn)	1 122	14,86

* Considérant l'application de 25 tonnes métriques humides de matière résiduelle fertilisante à l'hectare.

[†] m. s. = matière sèche; m. h. = matière humide.

2.4. Traitement des échantillons

Au laboratoire, les 240 carottes de sondage ont été séchées à l'air, collées sur des gabarits et sablées. Après détection à l'aide d'un microscope stéréoscopique, la largeur des cernes annuels a été mesurée au 1 µm près à l'aide du logiciel WinDENDRO^{MD} (Régent Instruments inc.). Les datations des mesures ont ensuite été vérifiées et corrigées à l'aide du logiciel COFECHA (Grissino Mayer 2001).

Les sols ont été séchés à l'air et tamisés (mailles de 2 mm). Ensuite, les éléments dits disponibles ont été extraits par la méthode Mehlich-III (Tran et Simard 1993). La concentration en carbone (C) et en N total a été mesurée par combustion sèche (LECO CR412, LECO Corporation, Saint-Joseph, MI, États-Unis). À partir de ces données, nous avons utilisé l'application DELFES 1.3 pour évaluer la présence ou l'absence de carences nutritives chez les érables à sucre dans chaque bloc non fertilisé (Ouimet *et al.* 2012).

2.5. Analyses statistiques

Les mesures des cernes annuels (en mm·an⁻¹) ont été converties en mesure d'accroissement en surface terrière (AST, en cm²·an⁻¹) à l'aide des mesures de DHP et de la fonction *bai.out* du module *dpIR* (Bunn *et al.* 2013) dans l'environnement R, version 4.0.3 (R Core Team 2021). Les calculs de ce module se basent sur l'hypothèse que les arbres ont un pourtour circulaire.

Dans un premier temps, nous avons analysé l'effet de la coupe partielle sur l'AST des arbres à l'aide du module *CausalImpact* dans l'environnement R (Brodersen *et al.* 2015). Ce module permet d'évaluer l'inférence causale à l'aide de modèles structurels bayésiens de séries temporelles, ici pour l'AST des arbres. En bref, à partir d'une série temporelle de réponses (dans le cas présent, l'AST de chaque arbre après coupe partielle) et d'un ensemble de séries temporelles témoins (dans le cas présent, l'AST de chaque arbre 5 ans avant coupe partielle), le module construit un modèle structurel bayésien de séries temporelles (moyenne et intervalle de confiance à 95 %). Ce modèle est ensuite utilisé pour prédire la situation contrefactuelle, c'est-à-dire comment l'AST de l'arbre aurait évolué après l'application du traitement si celui-ci n'avait pas été appliqué. La figure 3 illustre cette démarche statistique. Comme résultat, le module quantifie l'effet du traitement sur chacun des arbres (moyenne, erreur type et intervalle de confiance à 95 %). Étant donné l'absence de témoin, puisque les 2 parcelles de chaque bloc ont subi une coupe partielle, nous avons choisi de

modéliser les séries temporelles d'AST sur 5 ans avant coupe, puis de les projeter pour la période après celle-ci. Pour déterminer si la coupe partielle avait modifié l'AST des arbres, nous avons comparé cette projection aux mesures après coupe observées sur les cernes annuels. Finalement, nous avons réalisé une méta-analyse sur les résultats pour chaque arbre, afin de déterminer l'effet global de la coupe partielle. Dans cette méta-analyse, nous avons aussi évalué l'effet de la classe de DHP ($n = 68$ pour la classe de 10-20 cm; $n = 117$ pour la classe de 20-30 cm et $n = 54$ pour la classe de 30-45 cm) sur la réaction d'AST à la coupe partielle, à l'aide de la fonction *rma* du module *metafor* 3.8-1 (Viechtbauer 2010) dans l'environnement R, version 4.0.3. Les classes de DHP étaient bien réparties dans chaque bloc ($p = 0,157$).

Dans un deuxième temps, nous avons comparé les séries temporelles d'AST de chaque arbre des parcelles ayant fait l'objet d'une coupe partielle suivie d'une fertilisation à ceux des parcelles voisines dans le même bloc qui avaient été traitées par coupe partielle, mais sans fertilisation. L'ensemble témoin de séries temporelles dans l'analyse était les séries temporelles d'AST de tous les arbres de la parcelle traitée par coupe partielle seulement (sans fertilisation) dans un bloc donné. Nous avons choisi de comparer les séries temporelles d'AST sur 20 ans avant fertilisation et pour toute la période après fertilisation afin d'augmenter la variabilité de l'AST dans le temps avant le traitement de fertilisation, dans une tentative de réduire le biais causé par la coupe partielle. L'ensemble de ces résultats sur les arbres traités par coupe suivie d'une fertilisation a fait l'objet d'une méta-analyse globale et par bloc afin de déterminer l'effet de la fertilisation. Dans cette analyse, nous avons également évalué l'effet de la classe de DHP (10-20 cm, 20-30 cm et 30-45 cm) sur le changement d'AST des arbres à la suite de la fertilisation en MRF.

Les hypothèses sous-tendant ces analyses sont qu'il existe un ensemble témoin de séries temporelles qui n'ont pas été influencées par l'intervention. On suppose également que la relation établie entre les covariables pendant la période prétraitement (c'est-à-dire l'AST des séries prétraitement ou celles dites témoins) et les séries temporelles des arbres traités reste stable pendant toute la période post-traitement.

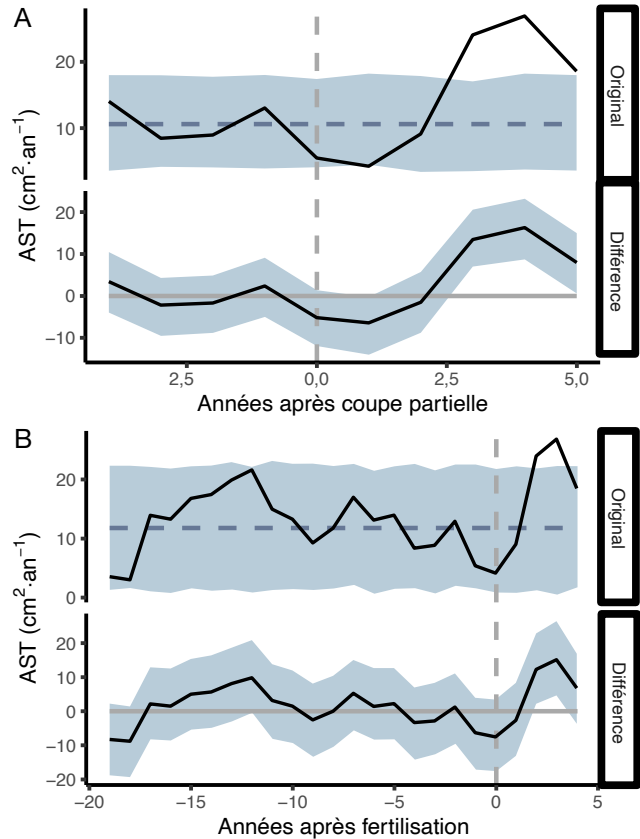


Figure 3. Illustration de la méthode de modélisation des séries temporelles d'accroissement en surface terrière (AST), avec comme exemple l'arbre n° 7, situé dans le bloc n° 1, et dont le diamètre à hauteur de poitrine est de 27,5 cm. A) Effet de la coupe partielle : modélisation de l'AST avant le traitement de coupe partielle, pour les 5 années qui précèdent le traitement, puis projection pour la période suivant la coupe partielle (ici de 5 ans). Dans le panneau « Original », la ligne noire continue correspond à l'AST mesuré, tandis que la ligne tiretée bleue et l'intervalle de confiance à 95 % correspondent à l'AST estimé si la coupe partielle n'avait pas eu lieu. La différence entre les valeurs mesurées et estimées d'AST est présentée dans le panneau « Différence ». B) Effet de la fertilisation après la coupe partielle : tous les arbres du bloc témoin ont servi à modéliser l'AST des arbres individuels du bloc fertilisé voisin avant la fertilisation (pour les 20 années qui précèdent le traitement), ainsi que l'AST prévu après celle-ci (ici 4 ans dans le cas de cet arbre). Dans le panneau « Original », la ligne noire continue correspond à l'AST mesuré, tandis que la ligne tiretée bleue et l'intervalle de confiance à 95 % correspondent à l'AST estimé si la fertilisation n'avait pas eu lieu. La différence entre les valeurs mesurées et estimées d'AST est présentée dans le panneau « Différence ».

3. Résultats

3.1. Caractéristiques des sols

Les humus, relativement minces (environ 5 cm), étaient constitués à $30,3 \pm 10,3$ % de carbone (C) (moyenne \pm erreur type), et leur rapport C/N était de $18,8 \pm 3,3$, ce qui indique une activité biologique assez bonne (tableau 3). Le pH était assez élevé ($5,1 \pm 0,9$ pour l'humus et $4,7 \pm 0,3$ pour les 20 premiers centimètres du sol minéral), et le sol minéral avait une teneur relativement faible en Ca (264 ± 227 mg·kg⁻¹). DELFES (Ouimet *et al.* 2012) a donc diagnostiqué une carence en Ca dans la majorité des blocs.

Lorsque la teneur en Ca dépassait les 400 mg·kg⁻¹, DELFES a diagnostiqué une carence en phosphore (P) dans 4 blocs et une carence en potassium (K) dans 2 blocs. Il n'y a qu'un bloc dans lequel aucune carence n'a été diagnostiquée.

3.2. Effet de la coupe partielle

La coupe partielle a augmenté significativement l'AST des érables de 3 à 10 ans après l'intervention (figure 4). En effet, la limite inférieure de l'intervalle de confiance à 95 % du changement d'AST est supérieure à 0, et ce, pour toutes les classes de DHP. L'augmentation de l'AST est de l'ordre de 2 cm²·an⁻¹, soit environ 22 % par rapport à la croissance avant intervention.

3.3. Effet de la fertilisation

Comparativement aux arbres dans les secteurs éclaircis seulement, les arbres éclaircis puis fertilisés avec la MRF n'ont pas montré de réaction forte de 2 à 6 ans après l'intervention, à l'exception des arbres du bloc 8 (figure 4). Le changement de l'AST après fertilisation varie beaucoup selon le bloc. Bien que les résultats indiquent globalement l'absence de réaction de l'AST dans 95 % des cas, ils montrent tout de même que 70 % des érables fertilisés dans les classes de DHP de 10-20 cm et 20-30 cm ont connu

une augmentation de croissance supplémentaire de l'ordre de 1 cm²·an⁻¹ par rapport aux arbres éclaircis seulement. Pour illustrer, ce gain en AST correspond à la production de cernes annuels plus larges d'environ 1 mm pendant 5 ans. Par contraste, pour 75 % des arbres dans la classe de DHP de 30-45 cm, une baisse de l'AST de 1,6 cm²·an⁻¹ est survenue à la suite de la fertilisation avec la MRF, comparativement aux arbres similaires éclaircis seulement.

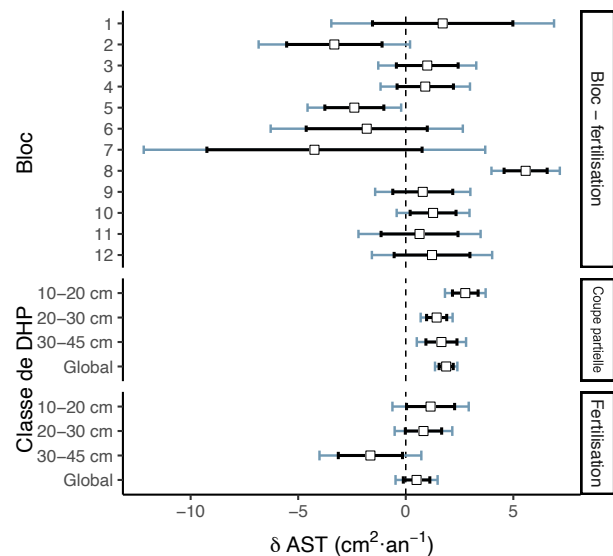


Figure 4. Résultats de la méta-analyse du changement de l'accroissement en surface terrière (δ AST) des arbres individuels après la coupe partielle suivie de l'application de matière résiduelle fertilisante composée de cendre et lie. Dans la portion supérieure, l'effet de la fertilisation seule sur la croissance des arbres est présenté par bloc. En dessous, l'effet de la coupe partielle seule pour l'intervalle de 3 à 10 ans après traitement (partie centrale) et celui de la fertilisation additionnée à la coupe partielle pour l'intervalle de 2 à 6 ans après traitement (partie inférieure) sont présentés par classe de diamètre à hauteur de poitrine (DHP) ainsi que globalement. Les barres d'erreur indiquent l'intervalle de confiance autour des moyennes à un seuil de 95 % (en bleu) ou de 70 % (en noir).

Tableau 3. Propriétés des sols : éléments totaux et disponibles (extraits Mehlich III) dans l'humus (LFH) et dans les 20 premiers centimètres de sol minéral des secteurs témoins (non fertilisés), par bloc et dans l'ensemble. Les carences minérales ont été déterminées avec l'outil DELFES 1.3. (Ouimet *et al.* 2012).

Bloc	Sol	C total (mg·kg ⁻¹)	N total (g·kg ⁻¹)	C/N	pH	P (mg·kg ⁻¹)	K (mg·kg ⁻¹)	Ca (mg·kg ⁻¹)	Mg (mg·kg ⁻¹)	Mn (mg·kg ⁻¹)	Al (mg·kg ⁻¹)	Fe (mg·kg ⁻¹)	Na (mg·kg ⁻¹)	Carence(s)
1	LFH	396	14,7	26,9	4,24	223	796	3 100	443	149	670	388	24	Ca
	0-20 cm	38	1,9	20	4,44	2	26	90	17	2	1 750	493	6	
2	LFH	237	12,5	19	6,9	128	363	13 800	797	316	1 190	420	81	P
	0-20 cm	55	2,9	19	4,72	3	41	572	70	2	1 880	477	5	
3	LFH	392	22,6	17,3	4,12	194	852	1 680	380	166	1 350	622	55	Ca
	0-20 cm	19	1,2	15,8	4,62	13	22	17	8	0,5	1 570	598	4	
4	LFH	220	12,9	17,1	4,27	109	379	2 390	259	179	627	616	19	Ca
	0-20 cm	35	2,1	16,7	4,4	3	29	151	21	2	1 720	550	5	
5	LFH	406	19,7	20,6	4,69	221	1 190	3 750	907	640	342	268	38	Ca
	0-20 cm	20	1,4	14,3	4,86	24	34	171	41	3	1 140	378	7	
6	LFH	352	19,6	18	5,8	145	744	8 170	688	243	995	407	68	Ca
	0-20 cm	28	1,9	14,7	4,4	8	35	71	19	0,5	1 530	452	9	
7	LFH	233	14,2	16,4	4,92	156	588	2 750	439	319	723	294	84	Ca
	0-20 cm	20	1,5	13,3	4,75	6	24	111	20	12	1 460	373	11	
8	LFH	297	19,6	15,2	4,48	185	477	1 030	248	34	3 110	568	75	Ca
	0-20 cm	14	1	14	4,66	39	18	21	8	0,5	1 290	295	5	
9	LFH	230	14,4	16	6,65	81	432	8 970	798	392	2 100	361	81	P
	0-20 cm	42	3,6	11,7	5,12	4	75	419	65	119	1 440	252	28	
10	LFH	85	4,9	17,3	5,73	20	94	2 190	343	55	1 230	740	5	K-Ca-P
	0-20 cm	38	2,6	14,6	5,08	7	33	538	77	13	1 160	390	4	
11	LFH	423	18,9	22,4	5,01	42	528	5 790	1 090	118	579	461	59	K-P
	0-20 cm	33	2,9	11,4	5,17	18	74	619	184	147	1 210	333	26	
12	LFH	370	18,4	20,1	4,68	62	379	5 310	365	182	294	262	11	Aucune
	0-20 cm	40	1,9	21,1	4,75	1	28	393	42	1	1 580	530	3	
Moyenne générale (erreur type)	LFH	303 (103)	16 (4,8)	18,8 (3,3)	5,1 (0,9)	131 (69)	569 (289)	4 911 (3 761)	563 (280)	233 (167)	1 101 (808)	451 (155)	50 (29)	
Moyenne générale (erreur type)	0-20 cm	32 (12)	2,1 (0,8)	15,5 (3,1)	4,7 (0,3)	11 (11)	37 (19)	264 (227)	48 (49)	25 (51)	1 478 (241)	427 (107)	9 (9)	

4. Discussion

La majorité des sols de ces érablières montraient des carences en éléments minéraux, particulièrement en Ca, de sorte que l'application de produit chaulant était recommandée. On devait donc s'attendre à ce que l'application de la MRF corrige cette carence et augmente la vigueur des arbres dans les blocs fertilisés de ces érablières. Même si une réaction positive à court terme à l'épandage opérationnel de la MRF n'a été détectée que chez 70 % des arbres ayant un DHP < 30 cm dans les blocs traités, d'autres expériences réalisées selon des protocoles de recherche mieux contrôlés montrent que l'application de cendres augmente généralement à court terme la croissance des arbres de certaines essences. Ainsi, dans une expérience réalisée dans la même région que la présente étude, Arseneau *et al.* (2021) ont mesuré une augmentation de l'ordre de 20 % de l'AST chez les érables à sucre, 3 ans après l'épandage de 20 Mg ha⁻¹ de cendres dans des peuplements non éclaircis récemment. Encore dans cette région, l'amendement avec une autre MRF (boue de chaux et de biosolides papetiers) a accru de 35 % l'AST des érables à sucre dans les parcelles traitées 5 ans plus tôt par coupe partielle, par rapport à ceux dans les parcelles traitées par coupe partielle seule (Quimet *et al.* 2018).

Cependant, la réaction de croissance à l'application de cendres dépend en partie de l'espèce et de sa stratégie d'acquisition des éléments nutritifs (Bélanger *et al.* 2021 ; Emilson *et al.* 2020). Par exemple, Brais *et al.* (2015) ont observé à court terme une baisse de croissance de 30 % suivant l'épandage de cendres chez les épinettes noires (*Picea mariana* (Mill.) B.S.P.) ayant un DHP égal ou supérieur à 10 cm. La baisse d'AST observée ici chez les érables à sucre ayant un DHP > 30 cm peut s'expliquer en partie par 1) davantage de bris des racines fines chez ces gros arbres, dont les racines s'étalent sur une plus grande distance, y compris dans les sentiers où l'épandeur est passé (Malo et Messier 2011); 2) le fait d'avoir procédé à une coupe partielle de 1 à 4 ans avant l'application de la MRF, et que la forte réaction positive des arbres à cette coupe a pu entraîner l'atteinte d'un plafond de croissance, empêchant l'effet de la MRF de se manifester à court terme; et 3) le fait d'avoir concentré l'échantillonnage sur des arbres situés en bordure des sentiers de débardage (et qui ont donc accès à plus de lumière), ce qui a pu contribuer à amplifier cette croissance accrue de l'érable avant l'application de la MRF.

Selon la démarche d'analyse que nous avons suivie, une proportion non négligeable des érables fertilisés avec la MRF ont montré une augmentation de croissance, surtout ceux de plus petit diamètre. Cette observation augure bien pour la réaction attendue à long terme des érables suivant l'application de ce traitement, en particulier dans les blocs qui montraient des carences en éléments minéraux.

5. Conclusion

L'analyse de l'accroissement en surface terrière a montré que les érables à sucre étudiés ont connu une augmentation de croissance de l'ordre de 22 % à la suite de la coupe partielle. De plus, 70 % des arbres dans les classes de DHP de 10-20 cm et de 20-30 cm éclaircis et fertilisés par la MRF ont montré une augmentation supplémentaire moyenne de 15 à 20 % sur 4 ans après traitement, par rapport à ceux des secteurs éclaircis seulement. L'épandage de MRF a cependant entraîné une baisse de l'accroissement en surface terrière chez 75 % des arbres ayant un DHP de plus de 30 cm.

Globalement, l'ampleur de l'effet indique que l'épandage d'une MRF composée d'un mélange de cendres de bois et de lie de liqueur verte entraîne une réponse mitigée à court terme chez l'érable à sucre. Les prochains travaux devraient s'attarder à quantifier l'impact de l'application de cette MRF sur les sols eux-mêmes.

Remerciements

Ce travail a été financé par le ministère des Ressources naturelles et des Forêts (projet n° 112332065 de la Direction de la recherche forestière [DRF]). Les auteurs tiennent à remercier, chez Domtar, MM. Éric Lapointe, ing.f. et coordonnateur de la gestion foncière et sylviculture, Félix Brochu Marier, ing.f. et superviseur des opérations forestières et M^{me} Mégan Côté, stagiaire, pour la sélection des blocs d'érablières; à la DRF, M. Simon Désalliers, qui a participé à l'échantillonnage des arbres, à la préparation et à la mesure des carottes de sondage, le laboratoire de chimie organique et inorganique pour les analyses de sol, ainsi que M. Steve Bédard, ing.f., M. Sc. qui a été responsable de la révision scientifique de ce document. Ils remercient également les réviseurs anonymes qui ont apporté des commentaires judicieux sur la note de recherche; M^{mes} Denise Tousignant, Armelle Ginet et Maude-Emmanuelle Hajjaj (DRF) pour l'édition ainsi que M^{me} Stéphanie Rivet (Pulsation graphique) pour le montage graphique du document.

Références bibliographiques

- Arseneau, J., N. Bélanger, R. Ouimet, S. Royer-Tardif, S. Bilodeau-Gauthier, B. Gendreau-Berthiaume et D. Rivest, 2021. *Wood ash application in sugar maple stands rapidly improves nutritional status and growth at various developmental stages*. For. Ecol. Manage. 489: 19062. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2021.119062>.
- Bélanger, N., G. Palma Ponce et S. Brais, 2021. *Contrasted growth response of hybrid larch (Larix × marschliinii), jack pine (Pinus banksiana) and white spruce (Picea glauca) to wood ash application in northwestern Quebec, Canada*. iForest—Biogeosciences and Forestry 14(2): 155-165. <https://doi.org/10.3832/ifer3597-014>
- Boakye, E.A., Y. Bergeron, I. Drobyshev, A. Beekharry, D. Voyer, A. Achim, J.G. Huang, P. Grondin, S. Bédard, F. Havreljuk, F. Gennaretti et M. P. Girardin, 2023. *Recent decline in sugar maple (Acer saccharum Marsh.) growth extends to the northern parts of its distribution range in eastern Canada*. For. Ecol. Manage. 545: 121304. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2023.121304>
- Brais, S., N. Bélanger et T. Guillemette, 2015. *Wood ash and N fertilization in the Canadian boreal forest: Soil properties and response of jack pine and black spruce*. For. Ecol. Manage. 348: 1-14. <http://dx.doi.org/10.1016/j.foreco.2015.03.021>
- Brodersen, K. H., F. Gallusser, J. Koehler, N. Remy et S. L.Scott, 2015. *Inferring causal impact using Bayesian structural time-series models*. Ann. Appl. Stat. 9(1): 247-274. <https://doi.org/10.1214/14-AOAS788>
- 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. <https://rdocumentation.org/packages/dplR/versions/1.5.7>
- da Costa, T.P., P. Quinteiro, L.A.C. Tarelho, L. Arroja et A.C. Dias, 2020. *Life cycle assessment of woody biomass ash for soil amelioration*. Waste Manage. 101: 126-140. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2019.10.006>.
- [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. <https://mffp.gouv.qc.ca/documents/forets/connaissances/recherche/AvisScientHEGERS.pdf>
- Duchesne, L., R. Ouimet et D. Houle, 2002. *Basal area growth of sugar maple in relation to acid deposition, stand health and soil nutrients*. J. Environ. Qual. 31(5): 1676-1683. <https://doi.org/10.2134/jeq2002.1676>
- Dupont, J., 1992. *Québec lake survey: II. Origin and extent of acidification*. Water Air and Soil Pollut 61: 125-137. <https://doi.org/10.1007/BF00478370>
- Emilson, C.E., N. Bélanger, S. Brais, C.E. Chisholm, A. Diochon, R. Joseph, J. Markham, D. Morris, K. Van Rees, M. Rutherford, L.A. Venier et P.W. Hazlett, 2020. *Short-term growth response of jack pine and spruce spp. to wood ash amendment across Canada*. GCB Bioenergy 12(2): 158-167. <https://doi.org/10.1111/gcbb.12661>
- 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. <https://mffp.gouv.qc.ca/documents/forets/inventaire/guide-ecologique-2c.pdf>
- Grissino Mayer, H.D., 2001. *Evaluating crossdating accuracy: A manual and tutorial for the computer program COFECHA*. Tree-Ring Research 57(2): 205-221.
- Groupe de travail sur la classification des sols, 2002. *Le système canadien de classification des sols*. Agriculture et Agroalimentaire Canada. Troisième édition, publication n° 1646. 196 p. https://publications.gc.ca/collections/collection_2016/aac-aafc/A53-1646-2002-fra.pdf
- Hébert, M., 2015. *Guide sur le recyclage des matières résiduelles fertilisantes: Critères de référence et normes réglementaires*. Édition 2015. Québec. ISBN-978-2-550-72954-9. 216 p. https://www.environnement.gouv.qc.ca/matieres/mat_res/fertilisantes/critere/guide-mrf.pdf

- Jeffries, D. S. et R. Ouimet, 2005. « Chapitre 8. Les charges critiques sont-elles dépassées? » Dans : Direction de l'évaluation de la science et intégration (éd.) *Évaluation scientifique 2004 des dépôts acides au Canada*. Environnement Canada, Service météorologique du Canada. Downsview, ON. Numéro de catalogue En4-46/2004F-MRC. p. 341-369. <https://publications.gc.ca/collections/Collection/En4-46-2004F.pdf>
- Jeffries, D.S., R. Ouimet, J. Aherne, P.A. Arp, V. Baland, I. Demerchant, J. Dupont, J. Franklyn, D.C.L. Lam, F. Norouzian, S. Watmough et I. Wong, 2005. « 8.4 — Charges critiques et dépassements ». Dans : Direction de l'évaluation de la science et intégration (éd.) *Évaluation scientifique 2004 des dépôts acides au Canada*. Environnement Canada, Service météorologique du Canada. Downsview, ON. Numéro de catalogue En4-46/2004F-MRC. p. 350-365. <https://publications.gc.ca/collections/Collection/En4-46-2004F.pdf>
- Lawrence, G.B., P.W. Hazlett, I.J. Fernandez, R. Ouimet, S.W. Bailey, W.C. Shortle, K.T. Smith et M.R. Antidormi, 2015. *Declining acidic deposition begins reversal of forest-soil acidification in the northeastern U.S. and eastern Canada*. Environ. Sci. Technol. 49(22): 13103-13111. <https://doi.org/10.1021/acs.est.5b02904>.
- Likens, G.E., C.T. Driscoll et D.C. Buso, 1996. *Long-term effects of acid rain: response and recovery of a forest ecosystem*. Science 272(5259): 244-246. <https://doi.org/10.1126/science.272.5259.244>
- Malo, C. et C. Messier, 2011. *Impact of primary and secondary machinery tracks on fine root growth of sugar maple after selection cutting*. Can. J. For. Res. 41(4): 892-897. <https://doi.org/10.1139/x10-245>
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2012.06.026>
- 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(1): 66-77. <https://doi.org/10.1139/er-2014-0048>
- Ouimet, R., P.A. Arp, S.A. Watmough, J. Aherne et I. DeMerchant, 2006. *Determination and mapping critical loads of acidity and exceedances for upland forest soils in Eastern Canada*. Water Air Soil Pollut. 172: 57-66. <https://doi.org/10.1007/s11270-005-9050-5>
- Ouimet, R., L. Duchesne et J.-D. Moore, 2012. *Diagnostic des éléments limitatifs à partir du feuillage et du sol (DELFEs)*. Version 1.3. Application Excel. Gouvernement du Québec, ministère des Ressources naturelles, Direction de la recherche forestière. <https://mffp.gouv.qc.ca/nos-publications/delfes-diagnostic-elementes-limitatifs-feuillage-erable-sucre-sol-v1-3/>
- 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. 18 p. <https://mffp.gouv.qc.ca/documents/forets/recherche/Note150.pdf>
- R Core Team, 2021. *R: A language and environment for statistical computing*. R Foundation for Statistical Computing, Vienne (Autriche). Version 4.1.2. <https://www.R-project.org>
- Recyc-Québec, 2022. *En action pour réduire. Plan stratégique 2022-2025*. Gouvernement du Québec. vi + 29 p. <https://www.recyc-quebec.gouv.qc.ca/sites/default/files/documents/plan-strategique-2022-2025.pdf>
- Schorcht, F., I. Kourti, B.M. Scalet, S. Roudier et L. Delgado Sancho, 2013. *Best Available Techniques (BAT) reference document for the production of cement, lime and magnesium oxide - Industrial emissions directive 2010/75/EU - (Integrated Pollution Prevention and Control)*. Publications Office of the European Union. Publication n° JRC 83006. Luxembourg (Luxembourg). xxii + 475 p. https://eippcb.jrc.ec.europa.eu/sites/default/files/2019-11/CLM_Published_def_0.pdf
- Tran, T.S. et R.R. Simard, 1993. « Mehlich-III-extractable éléments ». Dans: Carter, M.L. (éd.) *Soil sampling and methods of analysis*. Société canadienne de la science du sol. Lewis Publishers. Boca Raton, FL (États-Unis). p. 43-49.
- Viechtbauer, W., 2010. *Conducting meta-analyses in R with the metafor package*. J. Stat. Softw. 36(3): 1-48. <https://doi.org/10.18637/jss.v036.i03>

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. et G. Weiss, 2024. *Effet à court terme d'une coupe partielle suivie d'un épandage de matière résiduelle fertilisante sur la croissance des érables à sucre dans des érablières à vocation forestière en Estrie*. Gouvernement du Québec, ministère des Ressources naturelles et des Forêts, Direction de la recherche forestière. Note de recherche forestière n° 163, 12 p.

ISSN 0834-4833

ISBN (PDF) : 978-2-550-97269-3

G.F.D.C. : 237.4 242 (714)

L.C. : S657 SD396.5 SD397.S775

Dépôt légal 2024

Bibliothèque nationale du Québec

© 2024 Gouvernement du Québec

**Ressources naturelles
et Forêts**

Québec 