



Effet de l'entaillage sur la croissance de l'érable à sucre (*Acer saccharum* Marsh.) dans trois stations du RÉSEF dans les Appalaches

Rock Ouimet¹, Louis Duchesne et Jean-David Moore

Résumé

Des observations récentes indiquent que l'entaillage des érables à sucre (*Acer saccharum* Marsh.) pourrait causer une baisse de leur croissance. Nous avons voulu vérifier cette hypothèse dans 3 stations d'érablières du Réseau d'étude et de surveillance des écosystèmes forestiers du Québec (RÉSEF) dans les Appalaches, dans lesquelles il était possible de comparer des érables entaillés depuis plusieurs années et des érables non entaillés situés à proximité. Une carence en calcium, tant dans le sol que dans le feuillage des érables à sucre, a été observée dans une des stations. Les arbres ont été sondés en 2015, et les séries dendrochronologiques ont permis d'analyser l'évolution de l'accroissement en surface terrière des arbres individuels avant et après l'année présumée du premier entaillage. Après 15 ans, dans la station où les carences en calcium étaient observées, l'accroissement en surface terrière des arbres entaillés était 39 % moindre que celui des érables témoins. La réduction de croissance des arbres en réaction à l'extraction de sève traduirait leur vigueur plus faible. Dans certaines conditions, l'entaillage peut donc réduire la vigueur des érables. La détection rapide des érablières vulnérables permettrait de mettre en place une stratégie d'intervention afin d'éviter de compromettre le développement du potentiel de production acéricole.

Mots-clés : *Acer saccharum*, croissance, entaillage, érable à sucre, érablière sucrière, vigueur

Abstract

*Some studies suggest that tapping sugar maple (*Acer saccharum* Marsh.) trees can cause their growth to decline. We wanted to verify this hypothesis in 3 sugar bushes where it was possible to compare tapped trees with nearby non-tapped trees. All 3 stations are part of Québec's forest ecosystem study and monitoring network (RÉSEF in French) and located in the Appalachians. In one of them, deficiencies in soil and foliar calcium were observed. Trees were cored in 2015. The individual dendrochronology series were used to analyze trends in basal area growth before and after the presumed first occurrence of tapping. After 15 years, in the station with calcium deficiency, basal area growth of tapped sugar maples was 39% less than for the control trees. The decline in tree radial growth in response to tapping could reflect the trees' lower vigor. Under certain conditions, tapping can thus further reduce tree vigor. Early detection of vulnerable stands would allow the implementation of an action plan to ensure and maintain the potential for maple syrup production.*

Keywords: *Acer saccharum*, sugar bush, sugar maple, tapping, tree growth, vigor

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



1. Introduction

Le sirop d'érable est produit uniquement en Amérique du Nord, et le Québec compte pour 72 % de la production mondiale. On y retrouve 7 300 entreprises acéricoles détentrices d'un contingent. La production québécoise s'élève à 81,4 millions de livres (400 millions de kg) de sirop, ayant une valeur brute de 304,9 millions de dollars canadiens (moyennes 2011-2015; Statistique Canada 2016).

Le nombre d'entailles est en croissance constante depuis plusieurs années. Selon la Fédération des producteurs acéricoles du Québec (FPAQ), il est passé de 34,7 millions en 2006 à 43,2 millions en 2015 (MAPAQ 2016). En juin 2016, la Régie des marchés agricoles et agroalimentaires du Québec a accordé à la FPAQ un contingent supplémentaire de 5 millions d'entailles pour 2017.

Selon les normes d'entaille du Québec, on peut entailler un érable à sucre (*Acer saccharum* Marsh.) lorsque ce dernier atteint la classe de diamètre à hauteur de poitrine (DHP) de 20 cm (Québec 2004). Cependant, ailleurs en Amérique du Nord, cette norme varie selon les territoires ou la source (Tableau 1). Par exemple, le DHP minimal d'entaille est de 25 cm en Ontario et de 25 à 30 cm au Vermont — ce dernier en fonction du diamètre du chalumeau. De même, le *North American maple producers manual* (Heiligmann et al. 2006) préconise un DHP minimal de 30 cm si l'on veut adopter une approche conservatrice, afin de protéger la santé des arbres. Idéalement, le diamètre minimal d'entaille et le nombre d'entailles devraient être établis en fonction du diamètre de l'arbre et de son taux de croissance

en diamètre, afin de toujours permettre l'entaille du bois sain et d'éviter celui du bois compartimenté à la suite des entaillages précédents (Grenier et al. 2008b, van den Berg et Perkins 2014). Le compartimentage du bois est une réaction de l'arbre qui produit des substances chimiques pour contrer l'infiltration d'air et de microorganismes par la blessure causée par l'entaille (Rioux 2011, Walters et Shigo 1978); ainsi, le bois compartimenté n'est plus conducteur de sève.

Dans la plupart des régions écologiques du Québec, les érables à sucre n'ont pas un taux de croissance diamétral suffisant pour supporter un entaillage à partir d'un DHP de 20 cm sans risque de pertes de production acéricole à long terme (Grenier et al. 2008a). Au Vermont, dans des érabières où le DHP minimal d'entaille était de 25 cm, on a trouvé que 35 % des arbres n'avaient pas une croissance en diamètre suffisante pour maintenir la production de sirop à long terme (van den Berg et al. 2016). L'érable à sucre étant une essence relativement exigeante en éléments nutritifs, en particulier en calcium (Ca), sa croissance et sa vigueur sont fortement dépendantes de la disponibilité de cet élément dans le sol (Bal et al. 2015, Moore et al. 2012, Ouimet et Camiré 1995, Wilmot et al. 1996).

En plus du risque d'une baisse de la coulée à l'entaille occasionnée par l'entaille dans du bois compartimenté, l'entaille lui-même pourrait occasionner une baisse de croissance en diamètre de l'arbre et ainsi, en diminuer la productivité à long terme (Copenheaver et al. 2014, Isselhardt et al. 2016). Comme le rendement en sirop d'un érable est directement proportionnel au diamètre de sa cime (Morrow 1955), qui est lui-même fortement

Tableau 1. Normes d'entaille en fonction du diamètre à hauteur de poitrine (DHP) des érables, selon la juridiction ou la source. Les fractions entre parenthèses indiquent le diamètre des chalumeaux en pouces.

DHP, en cm (Diamètre du chalumeau, en po.)						Nombre maximal d'entailles
Québec* (7/16)	Vermont† (7/16)	Vermont† (3/16 - 5/16)	Ontario‡ (7/16)	Ohio§ conservateur (7/16)	Ohio§ traditionnel (5/16 - 7/16)	
< 20	< 30	< 25	< 25	< 30	< 25	0
20 - 39	30 - 50	25 - 40	25 - 36	30 - 46	25 - 38	1
40 - 59	≥ 50	40 - 56	37 - 48	≥ 46	38 - 50	2
60 - 79	-	≥ 56	49 - 61	-	50 - 76	3
≥ 80	-	-	≥ 62	-	≥ 76	4

* Québec (2004).

† Vermont Agency of Natural Resources (2010).

‡ Coons (1987).

§ Heiligmann et al. (2006). Conservateur : guide d'entaille qui assure une grande surface d'entaille dans le temps; traditionnel : guide d'entaille employé traditionnellement.

lié à son DHP (Bechtold 2003, Lamson 1987), tout retard dans la croissance en diamètre de l'érable se répercutera sur son rendement potentiel.

Dans cette note de recherche forestière, nous avons voulu vérifier les effets de l'entaillage sur la croissance des érables dans trois érablières où l'on pouvait comparer des arbres non entaillés avec des arbres entaillés depuis plusieurs années et situés à proximité les uns des autres.

2. Matériel et méthodes

2.1. Sites d'étude

Les 3 stations investiguées (nos 102, 103 et 1202) font partie du Réseau d'étude et de surveillance des écosystèmes forestiers du Québec (RÉSEF), dont le principal objectif est de suivre l'évolution des peuplements en réaction aux stress environnementaux (Gagnon *et al.* 1994). Les placettes-échantillons ont été installées dans les stations à l'étude, respectivement en 1988, 1988 et 1987. Ce sont des érablières situées sur des terres publiques dans les Appalaches, entre Montmagny et Rimouski (Figure 1). Les placettes-échantillons occupent une superficie de 0,5 ha et sont entourées d'une bande de protection de 100 m, sauf à la station 102, où la bande de protection est de 15 m d'un côté. Ces placettes-échantillons et leur bande de protection sont protégées de tout aménagement. La densité varie de 374 à 594 tiges marchandes à l'hectare, et la surface terrière varie de 28 à 31 m²·ha⁻¹ aux 3 stations (Tableau 2). La majorité des tiges de taille marchande sont des érables à sucre dont le DHP moyen varie de 23 à 28 cm, selon la station.

Les sols de ces stations, qui tirent leur origine du till glaciaire composé du matériel local des Appalaches, sont des Podzols humo-ferriques orthiques (Gagnon *et al.* 1994). Les analyses foliaires indiquent que les érables à sucre ont une nutrition équilibrée aux stations 102 et 103 (Tableau 3; Ouimet et Camiré 1995). À la station 1202, par contre, la concentration du feuillage en Ca ($4,31 \pm 1,11$ g·kg⁻¹) est sous le seuil de carence de 6 g·kg⁻¹ (Moore *et al.* 2010), ce qui est corroboré par son indice DRIS (*Diagnostic and Recommendation Integrated System*) fortement négatif (-52). Le sol minéral de la station 102 est conforme à toutes les normes de fertilité de l'érable à sucre (Tableau 4; Ouimet *et al.* 2013a, b); celui de la station 103 se situe à la limite

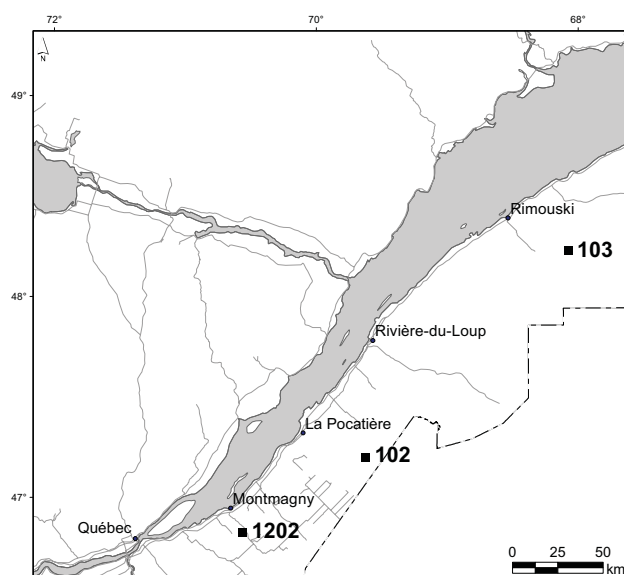


Figure 1. Carte de l'emplacement des trois sites d'étude.

Tableau 2. Caractéristiques dendrométriques du peuplement entier et des érables à sucre dans les 3 stations du RÉSEF en 2012-2013. DHP : Diamètre à hauteur de poitrine.

Station	Densité (nombre de tiges·ha ⁻¹) par classe de DHP				Surface terrière* (m ² ·ha ⁻¹)	DHP* (moyenne ± écart-type, en cm)
	de 2 à 9 cm	> 9 cm	≥ 20 cm	≥ 30 cm		
Peuplement entier						
102	1648	374	230	140	30,7	28,0 ± 16,2
103	474	594	358	170	36,7	25,0 ± 12,6
1202	1836	512	260	132	28,6	23,4 ± 12,8
Érable à sucre						
102	1404	366	228	138	30,2	28,1 ± 16,2
103	266	570	338	186	34,3	24,7 ± 12,5
1202	254	352	182	82	19,2	23,3 ± 12,4

* Arbres de taille marchande (DHP > 9 cm).

Tableau 3. Caractéristiques du statut nutritionnel de l'érable à sucre aux 3 stations du RÉSEF (moyennes de 6 années d'échantillonnage de 1987 à 2013 et écarts-types entre parenthèses). N : Azote; P : Phosphore; K : Potassium; Ca : Calcium; Mg : Magnésium.

Station	N	P	K	Ca	Mg
	Concentration foliaire (g·kg ⁻¹)				
102	21,0 (1,6)	1,86 (0,27)	7,72 (1,12)	9,14 (2,37)	1,25 (0,26)
103	20,7 (2,0)	1,97 (0,34)	9,29 (1,30)	11,10 (2,10)	1,71 (0,27)
1202	19,9 (2,2)	1,55 (0,26)	7,08 (1,26)	4,31 (1,11)	0,90 (0,20)
Seuil de carence*	15,0	1,2	7,0	6,0	1,0
Station	Indice DRIS†				
102	16 (6)	9 (9)	-12 (10)	-12 (12)	-1 (9)
103	8 (4)	1 (6)	-7 (7)	-8 (7)	7 (7)
1202	34 (11)	19 (8)	-4 (12)	-52 (18)	1 (10)

* D'après Moore et Ouimet (2010).

† Un indice DRIS (*Diagnostic and Recommendation Integrated System*) sous la valeur de -15 indique une carence.

Tableau 4. Caractéristiques des sols aux 3 stations du RÉSEF (moyennes de 6 années d'échantillonnage de 1987 à 2013 et écart-types entre parenthèses).

Couche	Station	Saturation en bases	Saturation en Ca	Saturation en Mg	Ca/Mg (eq/eq)	K/Mg (eq/eq)
		(%)				
Humus	102	99,68 (0,41)	79,24 (5,74)	13,18 (3,14)	3,259 (0,867)	0,543 (0,115)
	103	99,92 (0,05)	81,26 (2,36)	13,15 (1,31)	3,208 (0,429)	0,416 (0,059)
	1202	99,94 (0,07)	69,67 (5,19)	17,15 (3,62)	2,183 (0,518)	0,783 (0,177)
Horizon B (15 premiers cm)	102	29,62 (5,99)	24,15 (5,08)	3,74 (0,78)	3,350 (0,497)	0,464 (0,067)
	103	38,16 (8,79)	29,60 (6,93)	6,50 (1,91)	2,403 (0,390)	0,345 (0,145)
	1202	7,39 (2,28)	4,63 (1,90)	1,33 (0,28)	1,855 (0,549)	0,954 (0,261)

du seuil de saturation en Ca (valeur de 29,6 %; seuil : 28,4 %) dans l'horizon B du sol minéral (Ouimet *et al.* 2013a, b); à la station 1202, la saturation en Ca dans le sol minéral (4,6 %) est nettement en deçà du seuil de carence en Ca.

2.2. Sélection des arbres

Dans la 2^e semaine d'août 2015, à chaque station, nous avons sélectionné un total de 20 érables à sucre, les plus semblables possible, avec un DHP de 20 à 35 cm et tous situés à moins de 10 m de la limite de la zone de protection de chaque station. Ces arbres devaient posséder les mêmes caractéristiques et être situés dans des conditions apparentes de croissance et de densité; ainsi, 10 érables ont été sélectionnés dans la zone de protection et 10 autres, dans la zone entaillée (présence de tubulure et

descente de chalumeaux à proximité, et traces d'entailles des années précédentes sur l'écorce). Leurs caractéristiques sont présentées au tableau 5.

2.3. Échantillonnage et mesures

Les mesures suivantes ont été prises pour chacun des arbres sélectionnés : DHP au millimètre près au gallon circonférentiel, hauteur du fût, hauteur totale au décimètre près à l'aide d'un hypsomètre (Vertex IV, Haglof Sweden inc.) et diamètre nord-sud et est-ouest de la cime. Nous avons également récolté 2 carottes de sondage à une hauteur de 80 cm (où les arbres ne sont pas entaillés) à l'est et à l'ouest à l'aide d'une sonde de Pressler, afin d'éviter l'effet des entailles qui peuvent créer des boursoufflures sur les arbres entaillés.

Tableau 5. Caractéristiques des arbres étudiés dans les 3 stations du RÉSEF.

Station	Traitement	Année présumée du début de l'entaillage*	Caractéristiques des arbres en 2015 (étendue)					Croissance 2001-2015 (moyenne ± écart-type)	
			DHP (cm)	Hauteur du fût (m)	Hauteur totale (m)	Diamètre de la cime (m)	Âge† (ans)	Largeur du cerne (mm·an ⁻¹)	Accroissement en surface terrière (cm ² ·an ⁻¹)
102	Témoin	1980-2010	21,7-33,8	5,6-10,5	19,2-25,8	6,0-7,5	53-128	1,60 ± 0,77	11,6 ± 6,5
	Entaillé	1970-2006	23,1-34,9	8,0-12,2	19,3-23,0	6,0-10,4	67-102	1,48 ± 0,49	12,5 ± 4,6
103	Témoin	1979-2001	22,6-30,2	10,3-13,2	21,3-24,8	4,3-7,8	53-94	1,21 ± 0,37	10,6 ± 3,4
	Entaillé	1979-2009	20,3-31,9	8,3-13,7	19,7-23,8	4,2-8,9	59-79	1,40 ± 0,56	10,8 ± 4,6
1202	Témoin	1974-2012	20,4-29,4	5,9-10,7	16,9-22,2	5,8-9,1	56-94	1,58 ± 0,72	10,5 ± 4,2
	Entaillé	1970-2006	20,7-31,1	6,5-10,0	16,6-22,6	5,8-9,2	58-102	1,10 ± 0,56	8,6 ± 4,2

* Étendue des années lors desquelles les arbres ont atteint un DHP > 19 cm. Celles-ci correspondent, respectivement pour chaque arbre, à l'année 0.

† Âge à 80 cm de hauteur.

Les carottes de sondage ont été séchées à l'air, collées sur des gabarits et sablées. Après avoir été détectés à l'aide d'une loupe binoculaire, les cernes annuels ont été mesurés au 1 µm près à l'aide du logiciel *Windendro* (Régent Instruments inc.). Les mesures d'accroissement radial ont ensuite été converties en mesures d'accroissement en surface terrière (AST) à l'aide du module *dpIR* du logiciel R (Bunn et al. 2013).

2.4. Analyses statistiques

Comme nous ne connaissions pas l'année exacte du début d'entaillage de chaque arbre dans la zone des stations où ceux-ci avaient été entaillés, nous avons présumé qu'elle correspondait à l'année où l'arbre a atteint le DHP minimal d'entaillage, soit > 19 cm, comme le recommande la norme québécoise d'entaillage qui s'applique en territoire public (Tableau 1). Cette façon d'attribuer une date de traitement correspond à la méthode d'« analyse d'intention de traiter » (*Intention to Treat Analysis*), laquelle consiste à analyser l'ensemble des individus auxquels on a attribué un traitement, même si pour certains d'entre eux, ce traitement n'a pas été appliqué correctement, que ce soit par non-conformité dans l'application du protocole, par fausse inclusion ou par l'absence de réponse (Hollis et Campbell 1999). Ainsi, dans nos analyses et à l'aide des mesures dendrochronologiques, nous avons déterminé l'année correspondant au diamètre

minimal d'entaillage comme celle de l'année où le DHP de l'arbre atteint au moins 19 cm, connaissant son diamètre en 2015.

À l'aide d'un modèle linéaire mixte généralisé, les chronologies d'AST des arbres entaillés ont été comparées à celles des arbres non entaillés, par station, avec comme effets fixes le traitement (variable binaire : arbre entaillé ou non), la période post-entaillage (variable binaire : atteinte ou non du diamètre minimal d'entaillage), le temps (variable continue) et les interactions entre ces trois facteurs. Les arbres eux-mêmes étaient considérés comme facteur aléatoire dans l'analyse. Nous avons aussi considéré que les mesures de chaque année n'étaient pas indépendantes les unes des autres. Pour en tenir compte, nous avons intégré dans l'analyse une structure d'autocorrélation temporelle (processus autorégressif d'ordre 1). Lors de l'analyse, nous avons rendu homogènes des résidus hétérogènes présents, en permettant aux variances de varier selon les facteurs fixes. Ce modèle a été implémenté dans le module *nlme* du logiciel R (Pinheiro et al. 2015). Le taux de changement d'AST (pente de la courbe d'AST dans le temps, exprimée en mm²·an⁻²) a été calculé à partir des coefficients des effets fixes de ce modèle.

Pour chaque arbre, nous avons défini l'année 0 comme celle où l'arbre atteignait le diamètre minimal d'entaillage. Les analyses préliminaires ont montré

que la période qui comprenait au moins 5 arbres par traitement était de 20 ans avant (période pré-entaillage) et de 15 ans après (période post-entaillage). Les analyses ont donc porté sur la période $-20 \text{ ans} \leq \text{année } 0 \leq +15 \text{ ans}$.

3. Résultats et discussion

3.1. Analyses dendrochronologiques

A priori, les analyses dendrochronologiques montrent peu de variabilité entre les arbres. Selon la station, leur âge moyen varie de 65 à 84 ans à une hauteur de 80 cm du sol (Tableau 5). L'âge des arbres à une même station était très similaire entre les traitements. Selon la station, la largeur moyenne des 15 derniers cernes annuels (2001-2015) des arbres entaillés et des arbres témoins varie en moyenne de 1,10 à 1,60 mm·an⁻¹. Ces croissances se comparent à celles rapportées à travers le réseau d'inventaire des parcelles permanentes du MFFP (Grenier et al. 2008a). L'AST au cours de ces 15 ans ne montre pas non plus de variation majeure. Les différences entre les traitements sont légèrement plus marquées à la station 1202. Sur celle-ci, la croissance radiale et celle en surface terrière des arbres entaillés sont en moyenne légèrement plus faibles que celles des arbres témoins (Tableau 5), et l'on observe une carence en Ca à la fois dans le sol et dans le feuillage des arbres (Tableaux 3 et 4).

3.2. Effet de l'entaillage sur la croissance

Les années présumées du début de l'entaillage varient selon l'arbre et la station (Tableau 5). D'après l'analyse des données d'AST, l'évolution de la croissance des arbres entaillés (différence entre les 2 périodes) n'est pas significativement différente de celle des arbres témoins à la station 102 et 103, mais elle l'est à la station 1202 (interaction traitement × période post-entaillage × temps; tableau 6, annexe). La figure 2, qui présente les chronologies agrégées (données brutes) et l'analyse de variance, montre que c'est seulement à la station 1202 que l'on observe un effet négatif de l'entaillage sur la croissance radiale des érables. D'autres interactions sont cependant significatives aux stations 102 et 103.

À la station 102, l'interaction période post-entaillage × temps est significative ($-46,2 \pm 18,9 \text{ mm}^2\cdot\text{an}^{-2}$, $p = 0,015$, voir annexe). Cela indique que le taux de changement d'AST de tous les arbres échantillonnés à cette station, qu'ils aient été entaillés ou non, a diminué après l'année 0 où ils ont atteint le DHP minimal pour l'entaillage, comparativement à la période précédente. Ce résultat peut s'expliquer par le fait que les arbres de moins de 20 cm rencontraient probablement moins de compétition, et qu'une fois dans la strate des arbres codominants, leur taux d'accroissement en surface terrière, qui a atteint près

Tableau 6. Effet de l'entaillage sur le taux de changement de l'accroissement en surface terrière (AST) des érables à sucre aux 3 stations du RÉSEF avant et après l'année présumée du début de l'entaillage (année 0, à laquelle l'arbre atteint un DHP > 19 cm). Les données présentées sont les moyennes ajustées selon les modèles présentés en annexe.

Station	Traitement	Taux de changement d'AST (moyenne ± erreur type) (mm ² ·an ⁻²)		Différence entre les 2 périodes (moyenne ± erreur type) (mm ² ·an ⁻²)	
		Avant l'année 0	Après l'année 0		
102	Témoin	37,9 (7,0)	-8,3 (14,4)	-46,2 (18,9)	
	Entaillé	38,1 (7,3)	19,5 (14,2)	-18,6 (18,2)	n.s.
103	Témoin	4,9 (6,5)	-6,0 (8,3)	-10,9 (8,3)	
	Entaillé	29,5 (6,5)	14,2 (8,6)	-15,3 (8,5)	n.s.
1202	Témoin	16,4 (6,4)	16,8 (11,7)	0,4 (13,3)	
	Entaillé	33,2 (7,2)	-37,6 (11,4)	-70,9 (13,8)	***

n.s. différence non significative entre les arbres entaillés et les témoins.

*** Changement significatif (seuil de probabilité : $p < 0,001$) dans le taux de changement d'AST avant et après l'année 0.

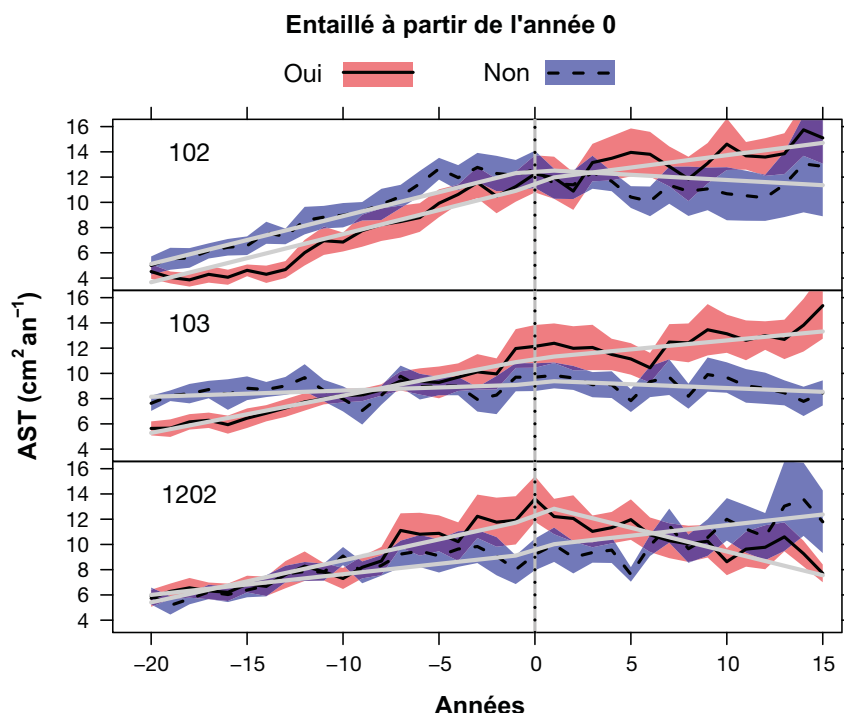


Figure 2. Comparaison de l'évolution des séries chronologiques agrégées (moyennes brutes) de l'accroissement en surface terrière (AST) des érables à sucre entaillés et non entaillés (moyennes avec intervalles colorés représentant ± 1 erreur type) dans les 3 stations du RÉSEF, durant les 20 années avant et les 15 années après que les arbres aient atteint le DHP minimal d'entaillage (> 19 cm). La ligne verticale pointillée à l'année 0 représente l'année présumée où les arbres ont atteint le DHP minimal pour l'entaillage. Les lignes grises représentent les valeurs d'AST (moyennes ajustées) selon les modèles d'analyse de variance présentés en annexe.

de $31 \text{ m}^2 \cdot \text{ha}^{-1}$, a diminué en raison de la compétition et de la densité très élevée des tiges marchandes (Tableau 2).

À la station 103, les arbres qui ont été sélectionnés dans la zone entaillée (interaction arbre entaillé $\times$ temps) avaient un taux de changement d'AST plus grand ($+24,6 \pm 7,9 \text{ mm}^2 \cdot \text{an}^{-2}$, $p = 0,002$, voir annexe) que ceux dans la zone non entaillée au cours de toute la période analysée (de -20 à $+15$ ans). Autrement dit, les arbres entaillés de cette station ont crû plus rapidement que les arbres témoins, tant avant qu'après l'année 0. Ce résultat peut s'expliquer en grande partie par les travaux d'éclaircie qui ont été faits dans la zone entaillée du peuplement et qui ont favorisé la croissance des arbres de cette zone.

À la station 1202, le taux de changement d'AST des arbres entaillés au fil des ans est passé de positif ($+33,2 \pm 7,2 \text{ mm}^2 \cdot \text{an}^{-2}$) avant l'année 0, à négatif ($-37,6 \pm 11,4 \text{ mm}^2 \cdot \text{an}^{-2}$) après celle-ci (Tableau 6). Un taux de changement d'AST positif indique que les érables sont en santé, tandis qu'un taux négatif indique un passage à l'état de dépérissement

(Duchesne *et al.* 2003). Depuis qu'ils ont été entaillés, l'AST des arbres de la station 1202 a diminué en moyenne de 43 % sur 15 ans, pour atteindre une valeur 39 % plus faible que celle des arbres témoins (Figure 2). Le début de cette réduction de croissance est tout à fait synchrone avec l'année présumée du début d'entaillage, comme le montre la figure 2. Avant l'entaillage, ces arbres avaient un taux de changement d'AST positif. Chez les arbres témoins, la valeur du taux de changement d'AST au cours des ans est demeurée positive et constante ($16,4 \text{ mm}^2 \cdot \text{an}^{-2}$ avant l'année 0, et $16,8 \text{ mm}^2 \cdot \text{an}^{-2}$ après) d'une période à l'autre (Tableau 6). Ces derniers ont augmenté leur croissance de 26 % en moyenne en 15 ans. La différence de croissance après l'entaillage à la station 1202 ne peut donc être attribuable ni à l'âge des arbres (Tableau 5) ni aux conditions climatiques, car les arbres témoins et entaillés auraient été affectés simultanément (à moins que des travaux d'aménagement aient eu lieu dans la zone entaillée et aient été dommageables aux arbres; cependant, nous n'y avons noté aucune trace d'aménagement particulier).

Aucun effet de l'entaille n'a été rapporté pendant 15 années consécutives durant les années 1974-1994 sur la croissance en DHP des érables dans une expérience de coupe d'éclaircie à Duchesnay (Pothier 1996). Par ailleurs, dans d'autres études, on a rapporté une baisse significative de la croissance radiale chez des arbres entaillés comparativement aux arbres non entaillés. Par exemple, une baisse de 50 % a été observée dans 2 érablières situées l'une en Pennsylvanie et l'autre en Ontario (Copenheaver *et al.* 2014), et une baisse de 57 % a été observée dans une érablière située au Vermont (Isselhardt *et al.* 2016). En comparaison, l'entaille a causé la baisse de la croissance en surface terrière des érables à sucre de l'ordre de 39 % à la station 1202. Parmi les mécanismes susceptibles d'expliquer la baisse de croissance après entaille, il y a l'utilisation des ressources par l'arbre pour activer le processus de compartimentage dans le xylème autour de la blessure causée par l'entaille (Walters et Shigo 1978). Un second mécanisme possible est la réaction de l'arbre à l'exportation de la sève. Étant donné que le carbone (C) de la cellulose formant les cernes annuels provient majoritairement des produits de la photosynthèse effectuée l'année précédente (Carbone *et al.* 2013), l'exportation de sève des arbres au printemps semble modifier la proportion des sucres synthétisés par la photosynthèse qui est acheminée durant l'été vers les organes d'entreposage plutôt que vers la croissance radiale. Si tel est le cas, les arbres peu vigoureux, lorsqu'ils sont entaillés, n'accumuleraient pas suffisamment de sucres pour développer une pleine croissance radiale.

3.3. Lien avec la fertilité du sol

Des trois stations à l'étude, une seule a montré une baisse de croissance liée à l'entaille : la station 1202, dont le sol présente des carences nutritionnelles, principalement en Ca. La sensibilité de l'érable à sucre à la faible disponibilité du Ca dans le sol est bien documentée, tant dans des conditions naturelles que contrôlées (Bal *et al.* 2015, Ouimet *et al.* 2008). Il est fort probable, en raison de la carence en Ca observée à la station 1202, que la vigueur des arbres soit insuffisante pour qu'ils puissent tolérer l'entaille sans que leur croissance soit réduite. L'apport de Ca permettrait probablement de régler ce problème de vigueur. Le chaulage des sols acidifiés a démontré des effets nettement positifs sur la croissance en diamètre, la vigueur et la santé de l'érable, ainsi que sur la survie, l'abondance et la

vigueur de la régénération de cette essence (Long *et al.* 2011, Moore et Ouimet 2014, Moore *et al.* 2008, 2012, Ouimet *et al.* 2017, Wilmot *et al.* 1996).

3.4. Conséquences sur la durabilité de l'acériculture

Dans une des 3 stations d'érablières étudiées, nos résultats montrent que l'entaille a causé une réduction de la croissance en diamètre des arbres, comparativement à celle des arbres non entaillés. Comme le rendement en sirop d'un érable est proportionnel, *grosso modo*, à son diamètre, son rendement potentiel dans le futur risque fort d'être amoindri dans une station comme la 1202, dont le sol est acide et peu fertile pour l'érable à sucre. Par exemple, selon les paramètres estimés du modèle d'AST à cette station (voir annexe), un érable que l'on commence à entailler à un DHP de 20 cm aura un AST moyen de $13,2 \pm 1,18 \text{ cm}^2 \cdot \text{an}^{-1}$ à l'an 0 d'entaille. Si l'on présume que la largeur des cernes annuels ne diminuera pas en dessous de 0,75 mm (sinon le modèle, calibré sur 15 ans d'entaille, prévoit que les arbres cesseront de croître complètement après 35 ans), il lui faudra environ 56 ans, en moyenne, pour atteindre un DHP de 30 cm. Toujours selon le même modèle, le même arbre non entaillé prendra seulement 31 ans, en moyenne, pour que son DHP passe de 20 à 30 cm; cette croissance plus rapide peut se traduire en un gain théorique de rendement en sirop atteignant 1,3 lb (0,6 kg) par entaille après 30 ans (Cloutier 2010).

Est-ce que les normes d'entaille établies au Québec devraient être mises à jour? À la lumière des résultats de cette étude et de ceux rapportés récemment dans la littérature (Copenheaver *et al.* 2014; Isselhardt *et al.* 2016; van den Berg *et al.* 2016), il apparaît qu'elles devraient être modifiées pour certaines stations afin d'assurer le maintien de la production de sirop (Grenier 2008b). À cet effet, l'évaluation de la croissance des arbres dans les érablières sucrières permettrait de déterminer le diamètre minimal pour lequel les arbres dans une station donnée devraient être entaillés. De plus, un tel diagnostic permettrait d'envisager des mesures pour augmenter la vigueur des arbres selon l'état de l'érablière, comme le chaulage en cas de carence en Ca (Moore *et al.* 2012) ou l'éclaircie en cas de densité trop élevée (Bédard *et al.* 2014). Ce suivi permettrait également d'évaluer la vigueur de l'érablière en réaction aux travaux d'aménagement effectués.

La récolte de données sur la croissance des arbres rend les normes d'entaillage plus complexes. Une fois que le taux de changement d'AST est connu dans une érablière donnée, il devient possible de calculer la profondeur et l'espacement des entailles, le diamètre minimal d'entaillage et le nombre d'entailles dont un arbre peut s'accommoder (van den Berg et Perkins 2014). Une méthode conservatrice plus simple, visant à assurer la durabilité de l'acériculture, est de suivre les lignes directrices d'entaillage suivantes proposées par Chabot (2005) et Heiligmann et al. (2006) :

1. DHP minimal d'entaillage : 30 cm (12 po).
2. Une seule entaille par arbre.
3. Profondeur d'entaillage maximale : 2,5 cm (1 po), en particulier chez les arbres entaillés depuis longtemps; ainsi, l'arbre doit avoir crû de 5 cm de DHP avant qu'on puisse pratiquer une nouvelle entaille au même endroit. Augmenter la profondeur de l'entaille exigerait d'attendre plus longtemps pour éviter d'entailler du bois compartimenté.
4. Étendre la zone verticale d'entaillage sur l'arbre de 30 à 40 cm de part et d'autre des entailles précédentes. Cette façon de faire augmente la probabilité d'entailler dans du bois clair et allonge le temps avant le retour au même endroit pour entailler, ce qui permet au xylème de croître suffisamment par-dessus les anciennes entailles.
5. Suivre un patron d'entaillage, afin de savoir où l'arbre a été entaillé jusqu'à 20 ans auparavant.

4. Conclusion

Dans la station 1202, la seule des 3 stations étudiées où des signes de carence en Ca étaient évidents, l'entaillage a causé une baisse de 39 % de la croissance en surface terrière des érables à sucre par rapport aux témoins après 15 ans. La réduction de croissance des arbres en réaction à l'extraction de sève traduirait leur vigueur plus faible, ainsi que la réduction de leur rendement potentiel en sirop. Cette étude de cas démontre que des travaux de recherche devraient être poursuivis afin de mieux documenter l'effet de l'entaillage sur la croissance des érables et les facteurs qui l'influencent. De plus, un nombre d'arbres plus élevé serait nécessaire pour bien tenir compte de la diversité génétique des différentes sources génétiques des érablières. L'évaluation de la croissance des arbres dans les érablières sucrières permettrait de poser un diagnostic précis sur les

effets de l'entaillage, afin de modifier, au besoin, le diamètre minimal auquel les arbres dans une station donnée devraient être entaillés. Cette évaluation guiderait l'aménagiste dans le choix des mesures à prendre afin de maintenir la vigueur des arbres et d'éviter de compromettre le développement de leur potentiel de production acéricole.

Remerciements

Les auteurs tiennent à remercier MM. Benoît Toussaint et Simon Désalliers, techniciens principaux à la DRF, pour leur aide aux travaux de mesure sur le terrain et pour l'échantillonnage dendrochronologique. Ils remercient également M. Mohammed S. Lamhamedi, éditeur associé, les trois réviseurs anonymes pour leurs commentaires sur le contenu et Mmes Denise Tousignant, Viviane St-Arnaud, Maripierre Jalbert et Nathalie Langlois pour l'édition de cette note de recherche forestière. Cette note est le fruit du projet 142332065 sur le suivi du RÉSEF.

Références bibliographiques

- Bal, T.L., A.J. Storer, M.F. Jurgensen, P.V. Doskey et M.C. Amacher, 2015. *Nutrient stress predisposes and contributes to sugar maple dieback across its northern range: a review*. *Forestry* 88(1): 64-83.
- Bechtold, W., 2003. *Crown-diameter prediction models for 87 species of stand-grow trees in the eastern United States*. *South. J. Appl. For.* 27(4): 269-278.
- Bédard, S., F. Guillemette, P. Raymond, S. Tremblay, C. Larouche et J. DeBlois, 2014. *Rehabilitation of northern hardwood stands using multicohort silvicultural scenarios in Québec*. *J. For.* 112(3): 276-286.
- 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.
- Carbone, M.S., C.I. Czimczik, T.F. Keenan, P.F. Murakami, N. Pederson, P.G. Schaberg, X. Xu et A.D. Richardson, 2013. *Age, allocation and availability of nonstructural carbon in mature red maple trees*. *New Phytol.* 200(4): 1145-1155.
- Chabot, B.F., 2005. *New tapping guidelines*. *Maple Syrup Digest* 17A(3): 13-18.

- Cloutier, M., 2010. *Comment améliorer le rendement de son érablière*. Le Supplément : Le bulletin forestier, avril 2010 : 1-3.
- Coons, C.F., 1987. *Sugar bush management for maple syrup producers*. Forest Resources Branch, Ontario Ministry of Natural Resources. 48 p.
- Copenheaver, C.A., R.C. McCune, E.A. Sorensen, M.F.J. Pisarcic et B.J. Beale, 2014. *Decreased radial growth in sugar maple trees tapped for maple syrup*. For. Chron. 90(6): 771-777.
- Duchesne, L., R. Ouimet et C. Morneau, 2003. *Assessment of sugar maple health based on basal area growth pattern*. Can. J. For. Res. 33(11): 2074-2080.
- Gagnon, G., C. Gravel, R. Ouimet, N. Dignard, R. Paquin et G. Jacques, 1994. *Le réseau de surveillance des écosystèmes forestiers (RESEF). II – Description des places d'étude et données de base*. Gouvernement du Québec, ministère des Ressources naturelles, Direction de la recherche forestière. Mémoire de recherche forestière n° 116. 187 p. [<https://www.mffp.gouv.qc.ca/publications/forets/connaissances/recherche/Ouimet-Rock/Memoire116.pdf>]
- Grenier, Y., J. Lavoie et G. Boudreault, 2008a. *Vers la formulation de nouvelles normes d'entailage pour conserver la production acéricole à long terme. Volet A : détermination de la quantité de bois sain basée sur les taux de croissance régionaux*. Centre ACER. n° 742-FIN-0608. St-Norbert d'Arthabaska. 50 p. [http://gestion.centreacer.qc.ca/fr/UserFiles/publications/14_Fr.pdf]
- Grenier, Y., J. Lavoie et G. Boudreault, 2008b. *Vers la formulation de nouvelles normes d'entailage pour conserver la production acéricole à long terme. Volet B : détermination du nombre d'entailles par arbre*. Centre ACER. n° 741-FIN-0608. St-Norbert d'Arthabaska. 27 p. [http://gestion.centreacer.qc.ca/fr/UserFiles/publications/15_Fr.pdf]
- Heiligmann, R.B., M.R. Koelling et T.D. Perkins, 2006. *North American maple syrup producers manual*. Ohio State University. Extension, 2^e édition. Columbus, OH. 329 p.
- Hollis, S. et F. Campbell, 1999. *What is meant by intention to treat analysis? Survey of published randomised controlled trials*. BMJ 319(7211): 670-674.
- Isselhardt, M.L., T.D. Perkins, A.K. van den Berg et P.G. Schaberg, 2016. *Preliminary results of sugar maple carbohydrate and growth response under vacuum and gravity sap extraction*. For. Sci. 62(2): 125-128.
- Lamson, N.I., 1987. *D.b.h./crown diameter relationships in mixed Appalachian hardwood stands*. U.S.D.A. Forest Service, Northeastern Forest Experiment Station. Broomall, PA (États-Unis). Res. Pap. NE-610. 3 p. [https://www.fs.fed.us/ne/newtown_square/publications/research_papers/pdfs/scanned/OCR/ne_rp610.pdf]
- 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.
- [MAPAQ] Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec, 2016. *Monographie de l'industrie acéricole du Québec 2011-2015*. Gouvernement du Québec, ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation, Direction du développement des secteurs agroalimentaires. 22 p. [https://www.mapaq.gouv.qc.ca/fr/Publications/Monographie_acericole.pdf]
- Moore, J.-D. et R. Ouimet, 2010. *Effects of two Ca fertilizer types on sugar maple vitality*. Can. J. For. Res. 40(10): 1985-1992.
- Moore, J.-D. et R. Ouimet, 2014. *Effects of two types of Ca fertilizer on sugar maple nutrition, vigor and growth after 7 years*. For. Ecol. Manage. 320: 1-5.
- Moore, J.-D., L. Duchesne et R. Ouimet, 2008. *Soil properties and maple-beech regeneration a decade after liming in a northern hardwood stand*. For. Ecol. Manage. 255(8-9): 3460-3468.
- 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.
- Morrow, R.R., 1955. *Influence of tree crowns on maple sap production*. Cornell University Agricultural Experiment Station. Bulletin n° 916. 30 p.
- Ouimet, R. et C. Camiré, 1995. *Foliar deficiencies of sugar maple stands associated with soil cation imbalances in the Quebec Appalachians*. Can. J. Soil Sci. 75: 169-175. [<https://mffp.gouv.qc.ca/publications/forets/connaissances/recherche/Ouimet-Rock/Can-J-Soil-Sci-75-169-175.pdf>]

- Ouimet, R., J.-D. Moore et L. Duchesne, 2008. *Effects of experimental acidification and alkalization on soil and growth and health of Acer saccharum Marsh.* J. Plant Nutr. Soil Sci. 171(6): 858-871.
- 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. 17 p. [<https://www.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.* Commun. Soil Sci. Plant Anal. 44(16): 2408-2427.
- Ouimet, R., L. Duchesne et J.-D. Moore, 2017. *Response of northern hardwoods to experimental soil acidification and alkalization after 20 years.* For. Ecol. Manage. 400: 600-606.
- Pinheiro, J., D. Bates, S. DebRoy, D. Sarkar et R Core Team, 2015. *nlme: Linear and non-linear mixed effects models.* R Package version 3.1-120.
- Pothier, D., 1996. *Accroissement d'une érablière à la suite de coupes d'éclaircie : résultats de 20 ans.* Can. J. For. Res. 26:543-549.
- Québec, 2004. *Règlement sur la culture et l'exploitation d'une érablière dans les forêts du domaine de l'État. Chapitre A-18.1, r. 2, à jour au 1^{er} juin 2017.* Gouvernement du Québec, Gazette Officielle 2 : 3734. [<http://legisquebec.gouv.qc.ca/fr/ShowDoc/cr/A-18.1,%20r.%202>]
- Rioux, D., 2011. *Le compartimentage : un moyen de défense des arbres.* L'éclaircie, Service canadien des forêts, Centre de foresterie des Laurentides n° 65. 2 p. [<http://cfs.nrcan.gc.ca/pubwarehouse/pdfs/32542.pdf>]
- Statistique Canada, 2016. *Tableau 001-0008. Production et valeur à la ferme des produits de l'érable, annuel, CANSIM (base de données).* [<http://www5.statcan.gc.ca/cansim/a26?id=10008>]
- van den Berg, A.K. et T.D. Perkins, 2014. *A model of the tapping zone.* Maple Syrup Digest 26A(1): 18-27.
- van den Berg, A.K., T.D. Perkins, M.L. Isselhardt et T.R. Wilmot, 2016. *Growth rates of sugar maple trees tapped for maple syrup production using high-yield sap collection practices.* For. Sci. 62(1): 107-114.
- Vermont Agency of Natural Resources, 2010. *Use Value Appraisal Program manual.* Vermont Department of Forests, Parks and Recreation, Forestry Division, County Forester Program. 143 p. [http://fpr.vermont.gov/sites/fpr/files/Forest_and_Forestry/Your_Woods/Library/UVA%20Manual71814.pdf]
- Walters, R.S. et A.L. Shigo, 1978. *Tapholes in sugar maples: what happens in the tree.* U.S.D.A. Forest Service, Northeast. Forest Experiment Station. Broomall, PA (États-Unis). For. Serv. Gen. Techn. Rep. NE-47. 12 p. [https://www.nrs.fs.fed.us/pubs/gtr/gtr_ne47.pdf]
- Wilmot, T.R., D.S. Ellsworth et M.T. Tyree, 1996. *Base cation fertilization and liming effects on nutrition and growth of Vermont sugar maple stands.* For. Ecol. Manage. 84: 123-134.

Annexe

Analyse de variance de l'effet de l'entaillage sur l'accroissement en surface terrière (AST, mm²·an⁻¹) de l'érable à sucre dans chacune des trois stations du RÉSEF étudiées.

Effets fixes	Coefficient estimé	Erreur type	Écart-type	d.l.	t	P
Station 102						
Origine	1 269,9	92,0		671	13,810	< 0,001
Traitement (arbre entaillé)	-140,4	129,7		9	-1,083	0,307
Période post-entaillage (DHP > 19 cm)	-10,1	90,4		671	-0,112	0,911
Temps (années)	37,9	7,0		671	5,402	< 0,001
Interaction (traitement × période post-entaillage)	58,7	127,7		671	0,460	0,646
Interaction (traitement × temps)	0,2	9,9		671	0,025	0,980
Interaction (période post-entaillage × temps)	-46,2	18,9		671	-2,452	0,015
Interaction (traitement × période post-entaillage × temps)	27,6	26,2		671	1,054	0,292
Effets aléatoires						
Arbres/traitement	Origine		2,276			
	Résidus		316,2			
Structure d'autocorrélation						
Temps arbres/traitement	Phi		0,816			
Structure de variance						
Entaillage	Pré		1,000			
	Post		1,579			
Station 103						
Origine	913,0	89,4		684	10,207	< 0,001
Traitement (arbre entaillé)	205,6	102,0		9	2,016	0,075
Période post-entaillage (DHP > 19 cm)	31,1	66,8		684	0,465	0,642
Temps (années)	4,9	6,5		684	0,753	0,451
Interaction (arbre entaillé × période post-entaillage)	-30,7	94,6		684	-0,324	0,746
Interaction (arbre entaillé × temps)	24,6	7,9		684	3,095	0,002
Interaction (période post-entaillage × temps)	-10,9	8,3		684	-1,321	0,187
Interaction (arbre entaillé × période post-entaillage × temps)	-4,4	11,9		684	-0,368	0,713
Effets aléatoires						
Temps arbres	Origine		167,3			
	Temps		10,5			
	Corr.		0,982			
Temps arbres/traitement	Origine		166,6			
	Temps		12,3			
	Résidus		230,0			
	Corr.		0,771			
Structure d'autocorrélation						
Temps arbres/traitement	Phi		0,468			
Structure de variance						
Entaillage	Pré		1,000			
	Post		1,187			

Effets fixes	Coefficient estimé	Erreur type	Écart-type	d.l.	t	P
Station 1202						
Origine	928,3	93,9		649	9,889	< 0,001
Traitement (arbre entaillé)	277,9	138,6		9	2,004	0,076
Période post-entaillage (DHP > 19 cm)	56,9	73,2		649	0,777	0,437
Temps (années)	16,4	6,4		649	2,555	0,011
Interaction (traitement × période post-entaillage)	57,3	113,4		649	0,506	0,613
Interaction (traitement × temps)	16,8	9,6		649	1,745	0,082
Interaction (période post-entaillage × temps)	0,4	13,3		649	0,029	0,977
Interaction (traitement × période post-entaillage × temps)	-71,3	19,2		649	-3,720	< 0,001
Effets aléatoires						
Temps arbres	Origine		0,0			
	Temps		0,0			
	Corr.		0,0			
Temps arbres/traitement	Origine		222,4			
	Temps		12,6			
	Résidus		247,6			
	Corr.		0,941			
Structure d'autocorrélation						
Temps arbres/traitement	Phi		0,7			
Structure de variance						
Entaillage	Témoin		1,000			
	Entaillé		1,195			
	Pré		1,000			
	Post		1,323			

Note : L'absence d'un niveau de facteur ou d'interaction dans les effets fixes signifie que son coefficient est égal à zéro.



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.

**Forêts, Faune
et Parcs**

Québec 

ISSN 0834-4833
ISBN : 978-2-550-79587-2
ISBN (PDF) : 978-2-550-79588-9
F.D.C. : 284.4 (714)
L.C. : SD 297.S775
Dépôt légal 2017
Bibliothèque nationale du Québec
© 2017 Gouvernement du Québec