

# Évaluation des effets de l'entailage de l'érable à sucre sur la production de bois d'œuvre

par François Guillemette<sup>1\*</sup>, Sébastien Michaud-Larochelle<sup>1</sup>, Steve Bédard<sup>1</sup> et Stéphane Tremblay<sup>1</sup>

## RÉSUMÉ

La demande croissante des produits confectionnés à partir de la sève d'érable amène à revoir les objectifs de production pour certains peuplements qui étaient jusqu'à présents destinés à une production prioritaire de bois d'œuvre d'érable à sucre (*Acer saccharum* Marshall). Il est donc pertinent d'estimer les impacts que la production acéricole pourrait avoir sur la production de bois d'œuvre d'érable à sucre. Nous avons d'abord mis au point un modèle permettant de prévoir la perte de bois d'œuvre dans un érable à sucre causée par l'entailage pour la collecte de la sève. Nous avons ensuite utilisé ce modèle pour simuler deux scénarios d'aménagement : un pour la production de bois d'œuvre seule et un pour la co-production de bois et de sève dans un même peuplement. Les résultats obtenus suggèrent que le volume net de bois d'œuvre récolté d'érable à sucre est diminué d'environ 40 % dans le scénario de co-production comparativement au scénario de production de bois.

**Mots-clés :** acérico-forestier, acériculture, bois d'œuvre feuillu, coupe de jardinage, entailage

## ABSTRACT

Production goals for certain stands previously used mainly to produce sugar maple (*Acer saccharum* Marsh.) lumber are being revised due to the growing demand for products made from maple sap. This paper therefore estimates the impacts that maple sap production may have for maple lumber production. We began by developing a model able to predict sugar maple lumber losses due to tapping for sap collection. We then used the model to simulate two management scenarios: one for timber production alone, and one for production of both lumber and maple sap in the same stand. The results suggest that the net harvested volume of lumber declines by roughly 40% in the co-production scenario, compared to the timber production scenario.

**Key words:** maple syrup, hardwood lumber, selection cutting, tapping



François Guillemette



Sébastien Michaud-Larochelle



Steve Bédard



Stéphane Tremblay

## Introduction

Le Canada possède une superficie forestière de 3,6 millions de km<sup>2</sup> dont environ 2,6 % (95 500 km<sup>2</sup>) est constituée d'érablières (IFNC 2021), soit des peuplements dominés par l'érable à sucre (*Acer saccharum* Marsh.) et l'érable rouge (*Acer rubrum* L.). Les forêts et les terres boisées des États-Unis, quant à elles, représentent un peu plus du tiers de leur

territoire avec une superficie estimée à 3,3 millions de km<sup>2</sup>. Plus de 13 % de cette superficie est occupée par des peuplements dominés par des érables, soit environ 440 000 km<sup>2</sup>, que l'on retrouve principalement dans le nord-est du pays (Oswalt *et al.* 2019).

C'est dans les érablières de ces deux pays que se fait la récolte de la sève d'érable (production acéricole), soit princi-

<sup>1</sup>Direction de la recherche forestière, ministère des Ressources naturelles et des Forêts, 2700 Einstein, Québec, (Qc), G1P 3W8

\*courriel : francois.guillemette@mffp.gouv.qc.ca

palement dans les provinces de l'est du Canada (Ontario, Québec, Nouveau-Brunswick) et dans les États américains du nord-est (Maine; Wisconsin; Michigan; New Hampshire; New York; Pennsylvanie; Vermont). Le principal produit acéricole est le sirop d'érable, mais il se vend aussi de l'eau d'érable pure et un grand nombre de produits dérivés du sirop, comme du sucre ou des confiseries. En 2018, la valeur marchande mondiale du sirop d'érable était de 1,24 milliard de dollars (USD) et devrait atteindre 1,7 milliard de dollars (USD) en 2023 (Atlantic Corporation 2019). Le Québec, qui produit 92 % du sirop d'érable canadien, est le plus grand producteur au monde avec 71 % de la production mondiale pour la période 2016–2020 (MAPAQ 2021). La demande alimentaire croissante pour les produits de l'érable supporte une hausse de la production (MAPAQ 2021).

L'industrie forestière occupe également une place importante dans l'économie de l'Amérique du Nord, de ce fait ces peuplements d'érables sont aussi très convoités pour la production de bois d'œuvre feuillu. En 2020, le Québec en produisait 922 000 m<sup>3</sup>, soit 93 % de la production canadienne (Delisle 2021), tandis qu'aux États-Unis, cette production s'élevait à 18 millions de m<sup>3</sup> en 2019 (HMR 2020). Malgré la demande pour les billes de bois d'œuvre d'érable, il serait plus profitable pour un propriétaire forestier de produire du sirop d'érable que du bois avec son érablière (Ouimet *et al.* 2018).

Un propriétaire privé ou l'État propriétaire d'un terrain public peut choisir la production mise de l'avant : bois d'œuvre feuillu, produit acéricole ou encore une autre ressource. Pour la production acéricole, il est nécessaire d'entailler chaque année l'arbre en perçant un trou dans le tronc afin de récolter la sève. Cela crée des blessures qui ont un impact sur le potentiel de bois d'œuvre au niveau de la bille de pied. En effet, les trous d'entaille sont considérés comme des défauts qui dégradent la valeur des planches pour l'usage manufacturier (NHHLA 2007). De plus, l'entaillement entraîne la coloration du bois au pourtour de l'entaille, car l'arbre réagit à ces blessures en produisant des substances chimiques afin de se protéger contre l'infiltration d'air et de micro-organismes (Houston *et al.* 1990). Cette coloration se forme sur une largeur d'environ 1,25 cm de chaque côté et s'étend sur une distance pouvant atteindre 46 cm et parfois plus au-dessus et en dessous de l'entaille (Houston *et al.* 1990). Cette coloration entraîne ainsi une réduction de la valeur des planches de l'érable à sucre, puisque celle-ci passe du simple au double au Québec selon que la planche est colorée (bois brun, cœur foncé) ou qu'elle est pâle (aubier, source : Bureau de mise en marché des bois, ministère des Ressources naturelles et des Forêts). À ce phénomène s'ajoute un processus de compartimentage qui se résume par l'édification de barrières anatomiques (Shigo et Marx 1977). Ces barrières visent à limiter la propagation des micro-organismes responsables de la coloration et de la carie du bois sur les plans longitudinal, radial et tangentiel. Elles empêchent aussi la circulation de la sève rendant la zone compartimentée inutilisable pour sa récolte.

Le volume de bois d'œuvre perdu par l'entaillement a été très peu étudié (Farrell 2012). Sendak *et al.* (1982) ont réalisé une étude au Vermont en 1975 dans quatre peuplements pour lesquels l'historique d'entaillement semblait variable; un peuplement avait été entaillé pendant seulement 3 années et l'historique d'entaillement des trois autres peuplements n'a pas été

publié. En sciant la bille de pied, ils ont évalué une perte moyenne d'environ 5 % dans la valeur des planches. De plus, ils précisent que leur évaluation ne couvre pas les situations où la bille de pied est rejetée du lot de billes de sciage afin de réduire le risque d'endommager les équipements en cas d'inclusion d'objets métalliques issus des activités d'acériculture dans la bille.

Dans le contexte actuel où des érablières vouées à la production exclusive de bois pourraient être destinées à une co-production acéricole, il est pertinent d'estimer les impacts que cette dernière pourrait avoir sur la production de bois d'œuvre d'érable à sucre. La question se pose principalement pour des territoires forestiers publics et pour des entreprises forestières possédant de grandes forêts. En effet, ces territoires sont souvent associés à des usines de transformation de bois qui ont des attentes d'approvisionnement spécifiques, ils sont quand même convoités pour l'exploitation d'érablières à des fins de récolte de sève. La question se pose aussi dans un contexte d'aménagement de peuplements matures de structure inéquienne à l'aide de coupes de jardinage (CJ), lesquelles consistent à éclaircir le peuplement en récoltant une partie des arbres afin de stimuler la croissance des arbres résiduels, tout en favorisant l'installation et le développement de la régénération (Chapeskie *et al.* 2006; Guillemette *et al.* 2013). Les objectifs de cette étude sont : 1) d'estimer l'impact de l'entaillement des érables sur la production de bois d'œuvre d'érable à sucre et 2) d'évaluer des scénarios d'aménagement permettant une co-production de bois et de sève dans un même peuplement mature et de structure inéquienne.

## Matériel et méthodes

Nous avons d'abord mis au point un modèle de perte de bois d'œuvre causé par l'abandon de la bille de pied de l'érable à sucre entaillé, puis nous avons simulé la mise en œuvre de deux scénarios d'aménagement sur une période de 30 ans : la pratique de CJ avec ou sans entaillement des érables avec, dans les deux cas, une production de bois d'œuvre de l'érable à sucre. Ainsi, dans le scénario sans entaillement, le volume de bois d'œuvre contenu dans les érables est maximal, tandis que dans le scénario avec entaillement il est diminué du volume de la bille de pied abandonnée, lorsque celle-ci était de qualité bois d'œuvre.

### Modélisation du bois d'œuvre dans l'arbre

Le modèle d'estimation du bois d'œuvre de l'érable à sucre d'Havreljuk *et al.* (2015) a été utilisé pour les arbres qui ne sont pas entaillés. Pour les arbres entaillés, nous avons mis au point une méthode pour retirer une partie du bois d'œuvre dans les arbres ayant servi à étalonner le modèle d'Havreljuk *et al.* (2015), puis nous avons ajouté cet effet d'entaillement au modèle (entaillement présent = 1, absent = 0).

### Données

La banque de données utilisée dans le modèle est constituée de 2080 tiges d'érables à sucre échantillonnées de 2002 à 2014 par le ministère des Ressources naturelles et des Forêts du Québec dans 17 sites d'échantillonnage établis en forêt publique au Québec (Havreljuk *et al.* 2015). Ces arbres, qui présentaient un diamètre à hauteur de poitrine (DHP, mesuré à 1,3 m du sol) d'au moins 23,1 cm, avaient été sélectionnés avant la récolte. En plus de mesurer le DHP de

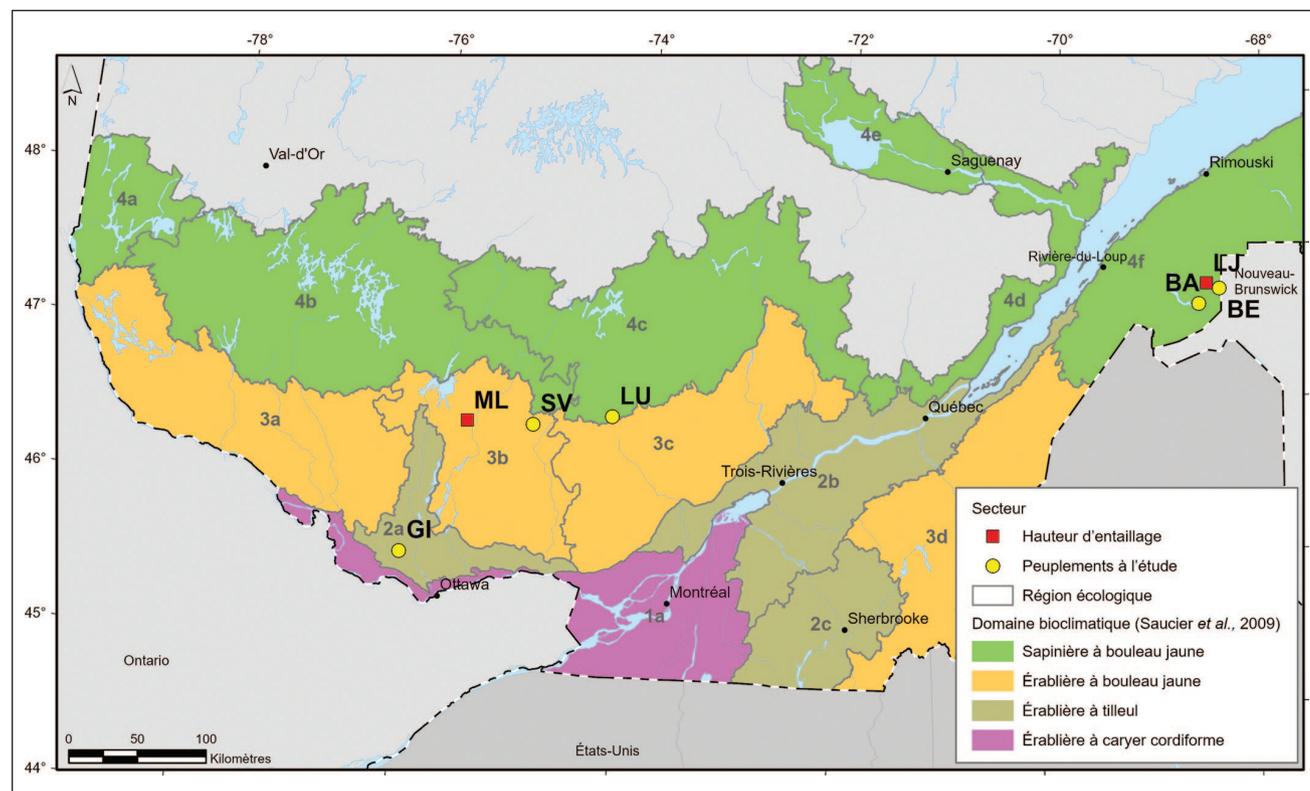
l'arbre, la classe MSCR (Boulet et Landry 2015) a été notée, soit un classement des arbres selon un gradient de risque de mortalité au cours de la prochaine rotation, basé sur la présence de défauts sur l'arbre. La classe MSCR est utilisée dans la simulation de croissance avec le modèle SaMARE (Fortin *et al.* 2009) et pour modéliser les produits de bois. Dans cette classification les arbres sont classés comme moribonds (M), survivants (S), en croissance pour être conservés (C) ou en réserve (R) suivant un ordre décroissant de risque de mortalité anticipé : les arbres M sont souvent caractérisés par la présence d'une infection fongique, d'une pourriture abondante ou d'un dépérissement du houppier; les arbres S sont fréquemment associés à la présence d'une fente sur le tronc ou d'une petite quantité de pourriture; enfin, les arbres C et R sont considérés comme sains et vigoureux. Les arbres C présentent généralement des défauts mineurs qui n'affectent pas la survie de l'arbre, tels qu'un coude ou une courbure du tronc.

Une fois abattues, les tiges ont été tronçonnées et classées selon leur qualité à l'aide de la méthode canadienne de Petro et Calvert (1976) qui est semblable aux règles américaines de Rast *et al.* (1973). À cette étape, des billes ont été identifiées pour convenir au sciage conventionnel, alors que celles de qualité inférieure ont été destinées à la production de pâte. Notons que des billes de sciage non conventionnelles ont été

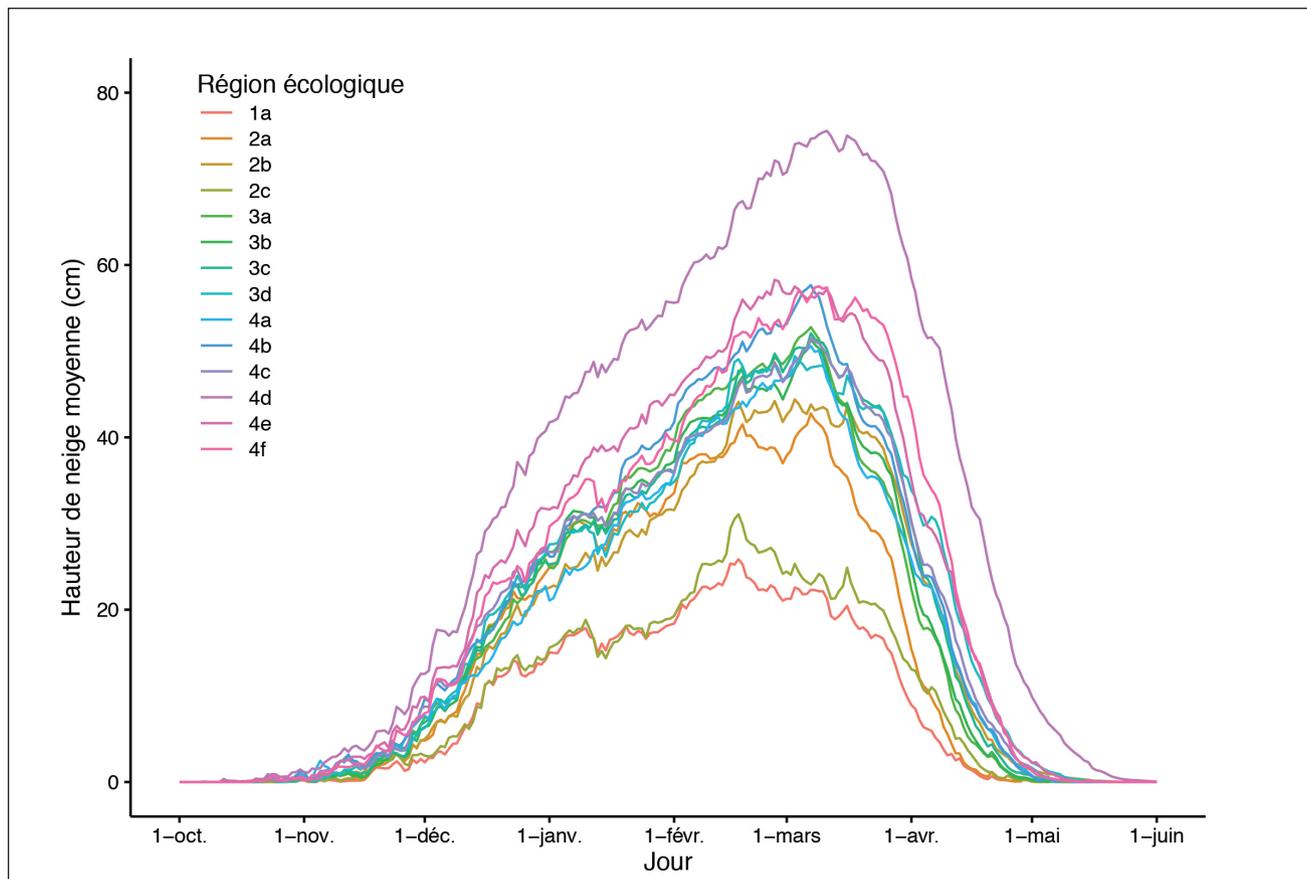
identifiées lors du classement, mais leur volume était marginal (voir Havreljuk *et al.* 2015). Ainsi nous disposons d'une base de données contenant les caractéristiques dendrométriques et la classe de qualité de chaque bille pour chacun des arbres échantillonnés. Pour plus de détails sur la méthodologie utilisée dans la cueillette des données de produits forestiers, le lecteur est invité à consulter Havreljuk *et al.* (2015).

### Portion affectée par l'entailage

Afin d'évaluer la portion du tronc affectée par l'entailage, nous avons analysé les données de la hauteur d'entailage et d'épaisseur de neige recueillies dans deux dispositifs de recherche (Lejeune [LJ] et Mont-Laurier [ML], Fig. 1). Nous avons comparé ces épaisseurs de neige avec des données météorologiques modélisées à grande échelle (Brown et Brasnett 2010) compilées au niveau des régions écologiques (Fig. 1, Saucier *et al.* 2009) ainsi qu'à des informations dans la littérature (Fig. 2 et tableau 1). La hauteur de neige habituellement rencontrée dans une érablière affecte le choix de la hauteur d'installation des équipements de collecte de la sève et, conséquemment, de l'étendue des hauteurs possibles d'entailage (Allard et Belzile 2004). Cependant, d'autres facteurs opérationnels, comme la topographie, le besoin de circuler de manière raisonnable dans l'érablière (au-dessus ou en dessous des tuyaux), l'ergonomie du travail d'entailage et la



**Fig. 1** Carte de localisation des secteurs à l'étude selon les domaines bioclimatiques et les régions écologiques. BA = secteur Baseley, BE = secteur Bénédictine, GI = forêt de Gatineau, LJ = Lejeune, LU = lac Lusignan, ML = Mont-Laurier, SV = Sainte-Véronique. Les régions écologiques (Saucier *et al.* 2009) : 1a = plaine du bas Outaouais et de l'archipel de Montréal; 2a = collines de la basse Gatineau; 2b = plaine du Saint-Laurent; 2c = coteaux de l'Estrie; 3a = collines de l'Outaouais; 3b = collines du lac Nominingue; 3c = hautes collines du bas Saint-Maurice; 3d = coteaux des basses Appalaches; 4a = plaines et coteaux du lac Simard; 4b = coteaux du réservoir Cabonga; 4c = collines du moyen Saint-Maurice; 4d = hautes collines de Charlevoix et du Saguenay; 4e = plaine du lac Saint-Jean et du Saguenay; 4f = collines des moyennes Appalaches.



**Fig. 2** Hauteur moyenne de neige au sol selon la date et la région écologique. Les données journalières de la hauteur du couvert de neige du Centre météorologique canadien (Brown et Brasnett 2010) ont été compilées par région écologique (Fig. 1) pour la période 1999–2018 à partir des données prises à chaque point d'un quadrillage de 5 minutes de latitude par 5 minutes de longitude.

**Tableau 1.** Paramètres d'évaluation de la hauteur du tronc potentiellement affectée par l'entaillage

Site (nb d'observations)	Hauteur observée d'entaillage (cm)		Hauteur annuelle de neige au moment de l'entaillage (cm)		
	Moyenne	Maximale	Minimale	Moyenne	Maximale
Lejeune (3030 sur 11 ans)	166	305	61	89	110
Mont-Laurier (3205 sur 10 ans)	163	259	29	50	81
<b>Région écologique (voir la Fig. 2)</b>			<b>Hauteur moyenne de neige au maximum annuel (cm)</b>		
4f (Lejeune)			–	58	–
3b (Mont-Laurier)			–	51	–
2a, 2b, 3a à 4f			43	52*	76
1a et 2c			26	–	31
<b>Autres sources</b>					
Sendak <i>et al.</i> (1982)	Inclusions métalliques d'entaillage suspectées jusqu'à 300 à 360 cm.				
Houston <i>et al.</i> (1990)	La coloration de l'aubier peut atteindre 46 cm ou plus de longueur au-dessus et en dessous de l'entaille.				
Allard et Belzile (2004)	La hauteur étudiée d'entaillage varie de 50 à 200 cm. Elle est normalement adaptée aux autres équipements de récolte de la sève, de manière à lui permettre de s'écouler par gravité. Le travailleur qui fait l'entaille doit se positionner de manière à être stable pendant le perçage (trou circulaire) et à obtenir les angles recherchés (90° de l'axe tangentiel et -5 à -10° de l'axe radial) pour bien fixer le chalumeau.				

\* Médiane des moyennes régionales

capacité à percer une entaille de qualité, ont aussi une incidence sur cette plage d'entaille. Ainsi, même avec une différence de 49 cm dans la hauteur moyenne de neige entre les dispositifs Lejeune et Mont-Laurier, les hauteurs moyennes d'entaille étaient presque les mêmes à cause de ces facteurs opérationnels (tableau 1). Les hauteurs de neige de ces deux dispositifs couvrent bien les valeurs médianes (Mont-Laurier) et maximales (Lejeune) observées dans les régions écologiques du sud du Québec, mais elles sont d'environ 25 cm supérieures aux valeurs minimales estimées dans la plaine du bas Outaouais et de l'archipel de Montréal (région écologique 1a), ainsi que dans les coteaux de l'Estrie (région écologique 2c, tableau 1 et Fig. 1).

Étant donné les hauteurs moyennes (163 à 166 cm) et maximales (259 à 305 cm) observées dans les deux (2) dispositifs, ainsi que les longueurs de compartimentation démontrées par Houston *et al.* (1990) de part d'autre de l'entaille (46 cm), nous avons posé l'hypothèse que la première section du tronc, équivalente à une bille d'une longueur de 250 à 310 cm (8 à 10 pieds), ne pourrait pas être destinée au bois d'œuvre à la suite du façonnage, de manière à éliminer la zone de blessures et de coloration engendrée par l'entaille. Précisons que la bille de pied débutait à une hauteur de 30 cm du sol (hauteur de souche). Ainsi, la section qui est retirée avec notre hypothèse correspond à une hauteur du sol variant de 280 à 340 cm. C'est plus que la hauteur moyenne d'entaille à laquelle une surlongueur de compartimentage de 46 cm serait ajoutée (cumul d'environ 210 cm), mais assez près des hauteurs maximales atteintes avec la surlongueur (309 et 355 cm).

#### Algorithme de perte de bois

Afin de calculer la perte de bois d'œuvre au niveau de la bille de pied causée par l'entaille sur chacun des arbres de la base de données, nous avons créé un algorithme qui se résume ainsi :

- Si la première bille de l'arbre était de qualité bois d'œuvre et qu'elle avait une longueur nominale de 2,5 m à 3,1 m, alors nous l'avons retirée du volume de bois d'œuvre de l'arbre (cas 1 : 25 % des arbres).
- Si, du fait de son diamètre au fin bout et selon la norme de classification de Petro et Calvert (1976), la première bille ne mesurait pas 2,5 m (elle n'était donc pas une bille de sciage conventionnel), alors nous avons sectionné la portion manquante dans la seconde bille et nous avons retiré cette seconde portion du volume de bois d'œuvre (cas 2 : 15 % des arbres).
- Si la portion restante de la seconde bille, une fois sectionnée, était assez longue pour former une bille de bois d'œuvre seule (minimum 2,5 m de long), alors nous avons conservé le volume de cette portion restante.
- Si cette portion n'était pas suffisante seule, mais qu'elle pouvait être fusionnée avec la troisième bille afin de former une bille de bois d'œuvre, alors nous l'avons considérée.
- Dans le cas où ces deux dernières possibilités ne se présentaient pas, la portion restante de la seconde bille est devenue aussi de la perte de bois d'œuvre.
- Advenant que la première bille était de qualité bois d'œuvre et qu'elle mesurait plus de 3,1 m (cas 3 : 33 % des

arbres), alors nous l'avons sectionnée à 2,5 m et ajoutée sa portion restante à la bille supérieure afin de maximiser le prélèvement de bois d'œuvre dans la tige, soit de manière comparable à celle décrite pour la portion restante de la seconde bille dans le cas 2.

- Finalement, 27 % des arbres n'avaient pas de bille de pied de qualité bois d'œuvre conventionnel, alors aucune modification ne leur a été apportée (cas 4).

Pour l'ensemble des cas, nous avons ainsi obtenu deux volumes de bois d'œuvre pour chaque arbre, soit son volume net mesuré et son volume net réduit par l'entaille simulé.

#### Modélisation du bois d'œuvre

La méthode de modélisation est celle d'Havreljuk *et al.* (2015) pour leur modèle conditionnel en deux parties à laquelle nous avons apporté deux modifications. Ce type de modèle conditionnel a été utilisé puisque la distribution du volume est caractérisée par un excès de valeurs nulles. La première partie de ce modèle prédit la présence d'une bille de sciage dans un arbre à l'aide d'un modèle binomial, tandis que la seconde partie du modèle prédit le volume moyen des billes de sciage lorsqu'il y a au moins une bille de sciage dans un arbre.

Pour la première partie visant à prédire la présence d'une bille de sciage, la procédure GLIMMIX de SAS (Stroup *et al.* 2018; SAS Institute Inc. 2021) a été utilisée en spécifiant des effets aléatoires pour le secteur de collecte des échantillons. Une modification que nous avons apportée au modèle d'Havreljuk *et al.* (2015) a été d'ajouter une variable indépendante pour simuler la présence (valeur = 1) ou l'absence (valeur = 0) d'entaille. L'ajout a été fait en effet simple et en interaction avec les autres variables du modèle, soit le DHP de l'arbre, le DHP quadratique de l'arbre et la classe MSCR de l'arbre. La matrice de variances-covariances de type sans structure (*unstructured* (un)) a été retenue afin de tenir compte de la corrélation entre les mesures prises sur un même arbre dans le temps (avec ou sans entaille).

Pour la seconde partie du modèle qui prédit le volume moyen des billes de sciage lorsqu'il y a au moins une bille de sciage dans un arbre, la procédure MIXED de SAS a été utilisée en spécifiant les mêmes effets aléatoires que pour la première partie du modèle. Les données de volume net ont préalablement subi une transformation logarithmique pour respecter l'hypothèse de normalité des résidus et éviter la prédiction de volumes négatifs. Le retour du volume prédit à l'échelle d'origine a nécessité une correction du biais basée sur la normalité (Flewellling et Pienaar 1981). La seconde modification apportée au modèle d'Havreljuk *et al.* (2015) a été d'utiliser le volume net (m<sup>3</sup>) de l'ensemble des billes de sciage dans un arbre comme variable dépendante de la seconde partie du modèle, plutôt que le volume net de chacun des grades de billes. Ainsi, tous les grades de sciage sont confondus et nous n'avons pas modélisé les billes de pâte ni les billons. Nous avons aussi ajouté la variable d'entaille simulé dans les variables indépendantes de cette seconde partie du modèle, soit en effet simple ou en interaction avec les variables préexistantes : le DHP de l'arbre, la classe MSCR de l'arbre et l'interaction de ces deux variables. Pour les deux parties du modèle, la normalité de la distribution des résidus et l'homogénéité de la variance ont été vérifiés graphiquement.

### Simulation des scénarios d'aménagement

Deux scénarios d'aménagement ont été simulés à partir d'une année zéro dans les peuplements à l'étude : avec ou sans entaillage de l'érablière soumise aussi à une production de bois d'œuvre. La variable d'intérêt pour la production de matière ligneuse est le volume net de bois d'œuvre d'érable à sucre sur pied et récolté, laquelle a été simulée sur une période de 30 ans. La quantité de sirop d'érable produite est une variable d'intérêt pour la production acéricole et le nombre d'entailles est une variable d'intérêt pour évaluer le potentiel acéricole.

### Peuplements à l'étude

Les données de 5 peuplements faisant partie d'un réseau d'expérimentation de la coupe de jardinage (Bédard et Majcen 2001, 2003; Majcen *et al.* 2005) ont été utilisées comme point de départ des simulations des deux scénarios d'aménagement : Gatineau (GI); Baselay (BA); Bénédicte (BE); Lusignan (LU); Sainte-Véronique (SV, Fig. 1). Ces peuplements sont dominés par l'érable à sucre et présentent un potentiel acéricole d'au moins 150 entailles/ha. Le nombre d'entailles a été déterminé en calculant une (1) entaille pour les érables dont le DHP se situe entre 23,1 et 39 cm inclusivement et deux (2) entailles pour ceux présentant un DHP d'au moins 39,1 cm selon la norme d'entaillage en vigueur au Québec en forêt publique (Gouvernement du Québec 2022). Les cinq peuplements ont fait l'objet d'une première CJ entre 1988 et 1994 et d'une seconde entre 2008 et 2014. Leurs types écologiques (Saucier *et al.* 2009) correspondent tous à l'érablière à bouleau jaune (*Betula alleghaniensis* Britt.) sur dépôt de mince à épais, de texture moyenne et de drainage mésique (FE32) à l'exception du dispositif de Sainte-Véronique qui se situe plutôt en érablière à tilleul d'Amérique (*Tilia americana* L.) (FE22).

### Données dendrométriques

Dans chaque peuplement, une placette-échantillon rectangulaire d'une superficie de 2 ha (100 m x 200 m) subdivisée en 8 sous-placettes de 0,25 ha chacune a été installée. Tous les arbres, d'essence commerciale ou non, qui avaient un DHP de 9,1 cm et plus ont été dénombrés par essence et leur diamètre a été mesuré par classes de 2 cm (ex : 9,1 cm à 11,0 cm

= 10 cm; 11,1 cm à 13,0 cm = 12 cm; etc.) à l'aide d'un compas forestier. La classe MSCR de chaque arbre a été notée. À partir de ces données, les volumes net de bois d'œuvre ont été calculés pour chaque érable à sucre à l'aide du modèle conditionnel en deux parties. Les volumes nets par arbre ont ensuite été sommés afin d'obtenir le volume net de bois d'œuvre à l'hectare dans chacun des peuplements à l'année zéro. L'année zéro correspond ici à l'année avant la CJ pratiquée entre 2008 et 2014. Le tableau 2 présente les principales caractéristiques dendrométriques des peuplements à l'étude.

À la suite de l'inventaire forestier, un martelage pour une CJ a été effectué dans ces peuplements afin de sélectionner les tiges à récolter à l'année zéro. La directive de martelage appliquée a été établie selon la méthode de détermination des tiges à prélever lors d'une CJ dans une érablière de Majcen *et al.* (1990) basée sur l'utilisation des distributions théoriques de Liocourt (1898). Elle permet de prioriser la récolte d'arbres selon une distribution diamétrale (facteur  $q$  de 1,09 à 1,14), un diamètre maximum de 55 cm et une surface terrière résiduelle minimum de 16 à 20 m<sup>2</sup>·ha<sup>-1</sup>. De plus, une priorité de prélèvement est accordée aux essences peu désirées ou peu longévives, telles que le hêtre à grandes feuilles (*Fagus grandifolia* Ehrh.) et le sapin baumier (*Abies balsamea* [L.] Mill.), et aux arbres les moins vigoureux des essences feuillues, soit les classes M et S et par la suite C et R, tout en préservant le plus possible les érables à sucre et les bouleaux jaunes. Bien qu'un diamètre maximum de 55 cm ait été utilisé pour établir la distribution du nombre résiduel de tiges par classe de diamètre après la coupe (courbe de Liocourt), ce diamètre maximum n'était pas appliqué lors du martelage étant donné l'abondance d'arbres peu vigoureux dont la récolte a été priorisée. Par conséquent seuls les arbres non vigoureux au-dessus de ce diamètre ont été prélevés. Notons que ces CJ ont été réalisées avec une intention d'améliorer la qualité des peuplements sur pied et non pas dans l'objectif d'une production acéricole. Cependant, ces CJ ont été réalisées d'une manière semblable à ce qui est habituellement recommandé pour une coupe de jardinage acérico-forestier (p. ex. : MRN-MAPAQ 2000). Ce type de traitement vise à améliorer la vigueur des arbres résiduels tout en assurant le renouvellement du peuplement et en permettant le maintien d'une composition acceptable en érable et en essences compagnes. Par exemple,

Tableau 2. Caractéristiques des peuplements avant la coupe de jardinage à l'année 0 (2008 à 2014)

Peuplements	Gatineau	Baselay	Bénédicte	Lusignan	Sainte-Véronique
DHP moyen (cm)	26	22	26	24	24
Densité (n·ha <sup>-1</sup> )	363	572	409	437	416
Surface terrière marchande (m <sup>2</sup> ·ha <sup>-1</sup> )	21,7	25,9	25,1	25,9	23,8
<i>Répartition de la surface terrière marchande par essence (%)</i>					
Érable à sucre	84,6	56,3	86,1	78,2	85,8
Hêtre à grandes feuilles	9,6	10,1	0,0	0,0	5,2
Bouleau jaune	1,1	10,0	12,4	19,6	5,9
Érable rouge	0,0	20,1	0,6	0,9	0,0
Autres	4,8	3,4	0,8	1,3	3,0
Volume net de bois d'œuvre de l'érable à sucre (m <sup>3</sup> ·ha <sup>-1</sup> )	55,3	37,9	70,4	50,9	51,4
Nombre potentiel d'entailles (n·ha <sup>-1</sup> )	197	220	215	203	217

la proportion des érables (érable à sucre + érable rouge) a augmenté dans chaque peuplement après la CJ, passant d'une proportion moyenne de 83 à 86 % de la surface terrière marchande.

La récolte des arbres martelés a été effectuée quelques semaines après le martelage. Les placettes ont été mesurées de nouveau afin d'identifier les arbres réellement coupés.

### Simulations

Nous avons intégré les données dendrométriques des peuplements après la récolte de l'année zéro dans le modèle de croissance SaMARE 2018 (Havreljuk *et al.* En prép.), qui est une mise à jour de SaMARE (Fortin *et al.* 2009), afin de prévoir l'évolution de ces peuplements sur une période de 30 ans et d'y simuler alors une autre CJ puis d'en extraire les données. Cette simulation de la CJ à 30 ans a été réalisée selon les mêmes critères que ceux appliqués à l'année 0.

Afin d'évaluer la production acéricole, nous avons évalué la quantité de sirop d'érable produite par entaille (en livres [lbs] = 0,45 kg) aux années zéro et 30 selon l'équation de Tremblay (2012) :

$$1. Lbs\_sirop = -4,3278 + 0,3941 * DHP - 0,00422 * DHP^2,$$

coefficient de détermination ( $R^2$ ) = 0,28

Où *Lbs\_sirop* est le poids (en livres) de sirop produit annuellement par une entaille. Cette équation a été étalonnée avec les données de suivi de la coulée de la sève à l'échelle de l'entaille individuelle réalisée de 2002 à 2010 inclusivement dans les dispositifs de Lejeune et de Mont-Laurier. La conversion de la production de sève en sirop d'érable a été déterminée avec l'approche d'Allard (1999) qui permet de calculer la quantité de différents produits à partir du volume de sève recueillie et du taux de sucre de la sève. Les érables d'un DHP de 20 à 38 cm portaient une entaille par année, ceux d'un DHP de 40 à 58 cm en portaient deux et ceux plus gros en portaient trois.

Finalement, une fois ces simulations effectuées, nous avons reproduit l'exercice de calcul du volume net de bois d'œuvre feuillu selon les deux scénarios, soit avec ou sans entaille, ainsi que le nombre d'entailles et la quantité de sirop d'érable produit à l'année 30.

### Analyses statistiques

Des analyses de variance (ANOVA) ont été réalisées à partir des données réelles des cinq peuplements à l'année zéro et des données simulées 30 ans après la CJ, et ce, avec et sans entaille, à l'aide de la procédure MIXED du logiciel SAS version 9.4 (SAS Institute Inc. 2021) afin de vérifier l'effet du temps et de l'entaille. Les analyses portent sur le volume de bois d'œuvre d'érable à sucre, le nombre d'entailles et la production annuelle de sirop d'érable. Le modèle utilisé comprenait un seul facteur à effets fixes pour toutes les analyses, soit la combinaison des années et de l'entaille pour les volumes (année 0, année 30 avec ou sans entaille), puis seulement les années (0 et 30) pour les deux autres variables. Lorsque le facteur était statistiquement significatif ( $p < 0,05$ ), une approche par simulation (option ADJUST=SIMULATE de l'énoncé LSMEANS) a été utilisée pour effectuer les comparaisons multiples et déterminer où se situaient les différences en tenant compte de la multiplicité des tests (Edwards et

Berry 1987; Westfall *et al.* 1999). Les hypothèses de normalité et d'homoscédasticité ont été vérifiées sur les résidus en utilisant les graphiques usuels, en plus du test de Shapiro-Wilk (normalité). Lorsque l'hypothèse de normalité des résidus n'était pas respectée et qu'aucune transformation des données ne permettait de la valider (volume de bois d'œuvre), le test de randomisation non paramétrique (Cassell 2002) a permis de confirmer les conclusions du test paramétrique, donc les résultats présentés sont ceux du test paramétrique.

## Résultats

### Modélisation du bois d'œuvre

L'effet de l'entaille simulé est présenté pour les arbres des classes M et R seulement à la Fig. 3; les valeurs pour les arbres des classes S et C étaient intermédiaires entre ces deux extrêmes (non présentées). La probabilité d'observer une bille de bois d'œuvre dans un arbre augmente en fonction du DHP peu importe la classe MSCR ( $p < 0,0001$ , Fig. 3A). Il existe une nette différence dans la probabilité qu'il y ait une bille de bois d'œuvre entre les arbres de la classe R sans présence d'entaille et ceux avec présence d'entaille ( $p < 0,0001$ ). Cette différence est moins marquée pour les arbres de la classe M ( $p = 0,0014$ ). De plus, la probabilité d'observer une bille de bois d'œuvre dans un arbre entaillé de la classe R est toujours supérieure à celle d'un arbre non entaillé de la classe M.

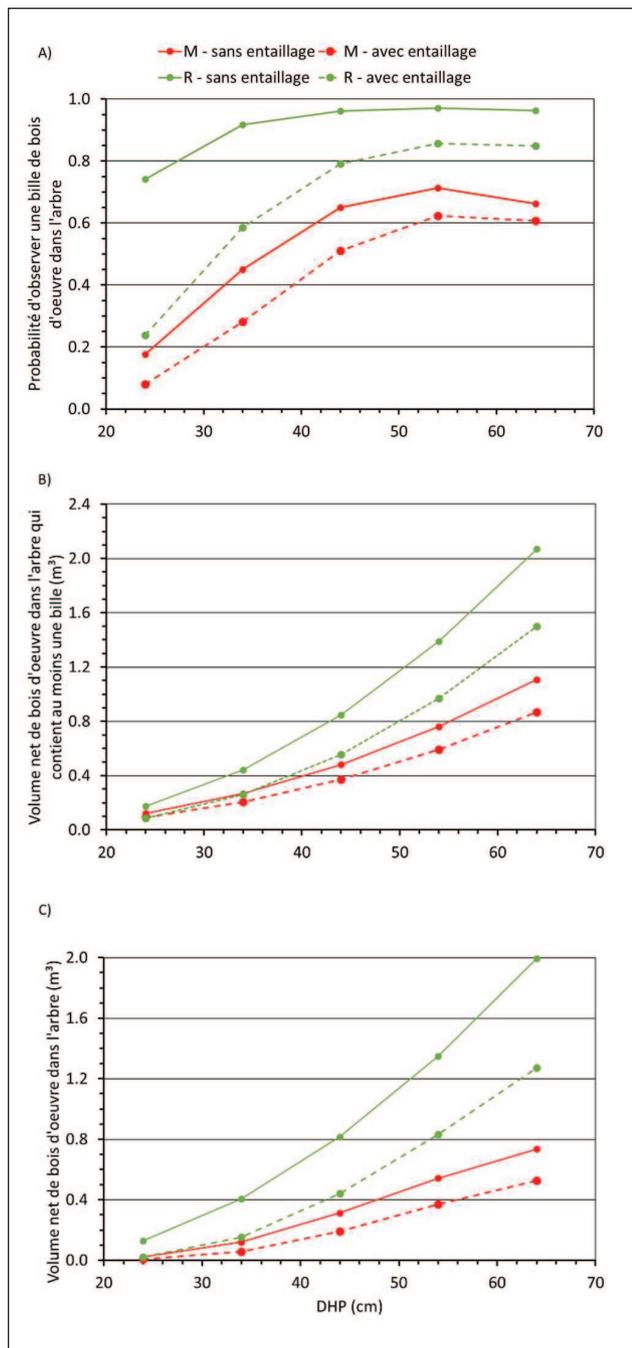
Les résultats de la deuxième partie du modèle, soit ceux sur le volume net de bois d'œuvre dans un arbre contenant au moins une bille de bois d'œuvre (Fig. 3B), ressemblent à ceux observés par rapport à la probabilité de présence d'une bille de bois d'œuvre. En effet, le volume net augmente en fonction du DHP peu importe la classe MSCR ( $p < 0,0001$ ). Toutefois, il existe une nette différence de volume entre les arbres de la classe R sans présence d'entaille et ceux avec présence d'entaille ( $p < 0,0001$ ) alors que cette différence est moins marquée pour les arbres de la classe M. Ces tendances s'observent aussi pour le volume net moyen prédit par l'interaction des deux parties du modèle (Fig. 3C).

### Scénarios d'aménagement

L'évolution de la surface terrière dans chaque peuplement est présentée au tableau 3. La première CJ se traduit par une récolte moyenne de 6,5 m<sup>2</sup>·ha<sup>-1</sup>, soit 27 % de la surface terrière initiale qui est de 24,5 m<sup>2</sup>·ha<sup>-1</sup>. La surface terrière est plus grande au moment de simuler la seconde récolte (26,8 m<sup>2</sup>·ha<sup>-1</sup>), ce qui permet un plus fort prélèvement (8,0 m<sup>2</sup>·ha<sup>-1</sup> ou 30 %), tout en laissant une surface terrière résiduelle un peu plus grande, soit 18,8 m<sup>2</sup>·ha<sup>-1</sup> au lieu de 18,0 m<sup>2</sup>·ha<sup>-1</sup>.

Le volume net de bois d'œuvre d'érable à sucre sur pied passe de 44 ± 4 m<sup>3</sup>·ha<sup>-1</sup> (moyenne ± erreur type) après la première CJ, à 63 ± 4 m<sup>3</sup>·ha<sup>-1</sup> avant la seconde CJ à l'année 30 (tableau 4). Ce même volume à l'année 30 est significativement supérieur dans le scénario sans entaille, comparativement au scénario avec entaille (63 ± 4 m<sup>3</sup>·ha<sup>-1</sup> versus 30 ± 4 m<sup>3</sup>·ha<sup>-1</sup> respectivement,  $p = 0,0002$ ).

Dans le scénario sans entaille, le volume net de bois d'œuvre d'érable à sucre récolté est semblable aux années zéro et 30, soit à 9,2 ± 1,7 m<sup>3</sup>·ha<sup>-1</sup> et 9,1 ± 1,7 m<sup>3</sup>·ha<sup>-1</sup> respectivement ( $p = 0,9986$ , Fig. 4A). Cependant, le volume de la récolte simulée 30 ans après le début de l'entaille



**Fig. 3** Probabilité d'observer une bille de bois d'œuvre dans un érable à sucre **A)**, première partie du modèle), le volume net de bois d'œuvre dans un érable à sucre qui contient au moins une bille **B)**, deuxième partie du modèle) et le volume net de bois d'œuvre dans un érable à sucre **C)**, première partie × deuxième partie du modèle) selon le DHP pour les arbres des classes M et R pour les deux scénarios simulés (sans ou avec entaillage).

( $5,4 \pm 1,7 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$ ) est diminué d'environ 40 % par rapport à ces deux volumes, malgré l'absence d'une différence statistiquement significative ( $p = 0,3012$ , Fig. 4B).

Une récolte à 15 ans au lieu de 30 ans a aussi été évaluée afin de considérer la possibilité d'une récolte lors du changement de la tubulure, qui normalement s'effectue à cette

période, mais les simulations réalisées démontrent que le volume de bois d'œuvre récolté représente la moitié de celui obtenu à 30 ans (données non présentées).

Après la CJ simulée à l'année 30, le nombre d'entailles ( $174 \pm 6 \text{ entailles} \cdot \text{ha}^{-1}$ ) et la production annuelle de sirop d'érable ( $720 \pm 24 \text{ lbs} \cdot \text{ha}^{-1}$ ) sont légèrement supérieurs aux valeurs simulées après la CJ de l'année zéro ( $160 \pm 6 \text{ entailles} \cdot \text{ha}^{-1}$  et  $645 \pm 24 \text{ lbs} \cdot \text{ha}^{-1}$ , respectivement), mais ces valeurs ne sont pas statistiquement différentes, bien qu'elles soient près du seuil de significativité ( $p = 0,1116$  et  $0,0555$ , respectivement, tableau 4).

## Discussion

Nous avons d'abord mis au point un modèle de perte de bois d'œuvre causé par l'entaillage de l'érable à sucre. Ce modèle repose sur l'hypothèse que la bille de pied serait rejetée, plutôt que transformée par une scierie. Des artisans utilisent parfois ces billes afin de produire des planches ayant des attributs particuliers, causés par la colonne de coloration ou les trous d'entaillage. En revanche, des planches contenant des trous ne sont pas des produits normalisés issus de la production des scieries conventionnelle de bois franc (NHFA 2007). Pour obtenir un modèle possiblement plus précis, il serait nécessaire de l'élaborer avec des données recueillies sur des érables qui auraient été entaillés sur une longue période, puis tronçonnés afin de quantifier le volume net de bois d'œuvre. Cependant, les pratiques d'entaillage ont évolué au cours des 30 dernières années de telle sorte qu'il serait difficile d'obtenir des échantillons représentatifs des pratiques actuelles. De plus, il serait pertinent d'échantillonner des érables de manière à capter de potentielles différences régionales dans la hauteur des arbres et dans la hauteur d'entaillage. Cette dernière est possiblement corrélée à l'épaisseur moyenne du couvert de neige au moment d'entailler, mais elle est aussi contrainte par des aspects pratiques, ce qui limite passablement les différences observées entre les régions, comme ce que nous avons observé dans les sites étudiés. La modélisation réalisée doit être considérée comme une estimation moyenne de la perte de bois d'œuvre occasionnée par l'entaillage. Mais, notre modèle n'est pas destiné à être utilisé à plus grande échelle et nous n'avons pas quantifié l'ampleur de ses biais potentiels. D'ailleurs, il est possible que le modèle surestime les pertes de bois d'œuvre aux endroits où l'épaisseur de la neige au sol ne justifie pas d'entailler aussi haut que dans les dispositifs Lejeune et Mont-Laurier. De même, il est possible que ce modèle sous-estime la perte relative de bois d'œuvre aux endroits où les érables à sucre sont moins hauts, comme dans la région écologique 4f (environ 20 m selon Guillemette *et al.* 2021), puis qu'il surestime cette perte relative aux endroits où ils sont plus hauts, comme dans les régions écologiques 2a et 3b (environ 22 m selon Guillemette *et al.* 2021).

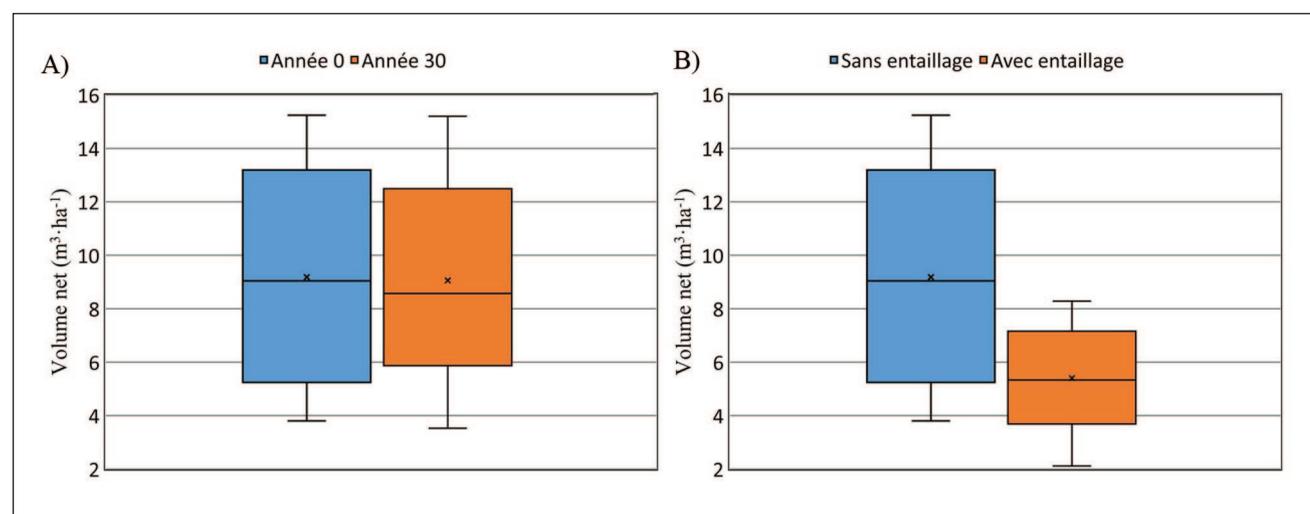
Nous avons utilisé le modèle pour simuler un scénario de co-production dans l'érablière et le comparer à un scénario de production unique de bois d'œuvre. Dans les cinq peuplements étudiés, le prélèvement représentait 27 % de la surface terrière des peuplements, ou  $6,5 \text{ m}^2 \cdot \text{ha}^{-1}$  (tableau 3), mais seulement 17 % du volume net de bois d'œuvre de l'érable à sucre ( $9,2$  sur  $43,9 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$ ). La croissance simulée sur une période de 30 ans a permis aux peuplements d'atteindre des caractéristiques permettant d'effectuer une nouvelle récolte

**Tableau 3. Surfaces terrières marchandes (S.t.) des peuplements avant et après chacune des coupes de jardinage**

Peuplements	Année 0 (données de terrain)				Année 30 (données simulées)			
	S.t. initiale (m <sup>2</sup> ·ha <sup>-1</sup> )	S.t. résiduelle (m <sup>2</sup> ·ha <sup>-1</sup> )	S.t. récoltée (m <sup>2</sup> ·ha <sup>-1</sup> )	(%)	S.t. initiale (m <sup>2</sup> ·ha <sup>-1</sup> )	S.t. résiduelle (m <sup>2</sup> ·ha <sup>-1</sup> )	S.t. récoltée (m <sup>2</sup> ·ha <sup>-1</sup> )	(%)
Gatineau	21,7	17,1	4,5	21 %	23,2	18,0	5,2	23 %
Baseley	25,9	18,9	7,0	27 %	29,5	20,0	9,6	32 %
Bénédicté	25,1	18,6	6,5	26 %	29,0	19,5	9,5	33 %
Lusignan	25,9	19,3	6,6	26 %	27,6	19,6	8,0	29 %
Sainte-Véronique	23,8	15,9	8,0	33 %	24,8	17,1	7,7	31 %
<b>Moyenne</b>	<b>24,5</b>	<b>18,0</b>	<b>6,5</b>	<b>27 %</b>	<b>26,8</b>	<b>18,8</b>	<b>8,0</b>	<b>30 %</b>

**Tableau 4. Volumes nets de bois d'œuvre d'érable à sucre, nombre d'entailles et poids de sirop produits à l'année 0 et à l'année 30, selon le scénario d'aménagement et le moment, par peuplement**

Peuplements	Année 0, après la coupe			Année 30			
	Volume (m <sup>3</sup> ·ha <sup>-1</sup> )	Entailles (n·ha <sup>-1</sup> )	Sirop (lbs·ha <sup>-1</sup> )	Vol. initial (m <sup>3</sup> ·ha <sup>-1</sup> )		État résiduel	
				Sans entaille	Avec entailles	Entailles (n·ha <sup>-1</sup> )	Sirop (lbs·ha <sup>-1</sup> )
Gatineau	49	167	691	55	28	157	665
Baseley	34	160	619	58	25	188	747
Bénédicté	55	168	694	82	40	193	812
Lusignan	42	152	604	59	28	166	676
Sainte-Véronique	40	153	617	59	29	166	698
<b>Moyenne</b>	<b>44</b>	<b>160</b>	<b>645</b>	<b>63</b>	<b>30</b>	<b>174</b>	<b>720</b>



**Fig. 4** Volumes nets de bois d'œuvre d'érable à sucre récoltés dans le scénario sans entaille aux années 0 et 30 **A)** et dans les deux scénarios à l'année 30 **B)**. Les x dans les boîtes à moustaches indiquent les valeurs médianes, tandis que la barre horizontale représente la moyenne, les limites de la boîte représentent le premier et le troisième quartile et les moustaches représentent les valeurs minimale et maximale.

un peu plus importante que la première en termes de surface terrière récoltée ( $8,0 \text{ m}^2 \cdot \text{ha}^{-1}$ , 30 %, tableau 3). Cependant, l'application des mêmes priorités de prélèvement n'a pas modifié le volume net de bois d'œuvre d'érable à sucre récolté ( $9,1 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$ ) malgré son augmentation au cours de la rotation, atteignant  $62,6 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$  sur pied. Les simulations prévoient donc une amélioration significative du volume net de bois d'œuvre sur pied d'érable à sucre des peuplements d'une CJ à l'autre dans un scénario sans entaillage.

Cette amélioration des peuplements (plus d'érables à sucre de plus gros DHP qui donnent plus de bois d'œuvre) expliquerait aussi les tendances à la hausse non significatives du nombre d'entailles et de la production de sirop (tableau 4). Le potentiel de production acéricole serait donc relativement stable, ou à tout le moins non décroissant, dans le scénario avec entaillage, oscillant entre 160 et 210 entailles à l'hectare selon le moment suivant une CJ (tableaux 2 et 4). Cependant, le volume de bois d'œuvre sur pied dans ce scénario avec entaillage est réduit d'environ 50 % 30 ans après le début de l'entaillage et le volume de bois d'œuvre récolté à la seconde CJ est réduit d'environ 40 %, quoique cette réduction n'est pas statistiquement significative dans les peuplements à l'étude. Nous avons utilisé seulement 5 peuplements et la variabilité était grande entre ceux-ci. Néanmoins, la figure 4B montre clairement qu'il n'y a pas de peuplement contenant un grand volume récoltable de bois d'œuvre d'érable à sucre dans le scénario avec entaillage.

Un comité traitant de la contribution du territoire public québécois au développement de l'acériculture, avait estimé en avril 2000 que la diminution de la qualité des tiges d'érable après l'entaillage causerait une perte d'environ 50 % du bois d'œuvre (MRN-MAPAQ 2000). Nos résultats présentés sur la figure 4 ( $63 \pm 4 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$  versus  $30 \pm 4 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$ ), démontrent aussi une perte d'environ 50 % du volume de bois d'œuvre de l'érable à sucre disponible avant la coupe à l'année 30 par rapport au scénario sans acériculture. Bien que cette perte relative pourrait varier régionalement en fonction de plusieurs facteurs, l'ordre de grandeur de la perte est susceptible d'être semblable (peut-être entre 40 et 60 %). Les travaux de ce comité avaient aussi évalué une perte immédiate d'environ 20 % du potentiel acéricole causée par la diminution du nombre d'entailles après une CJ à 20 % de prélèvement de la surface terrière marchande, ce qui s'apparente à nos résultats, soit une perte de 24 % des entailles avec un prélèvement de 27 % de la surface terrière marchande.

Nous n'avons pas comparé les deux scénarios en termes de rentabilité financière pour un propriétaire foncier, ni de retombées économiques pour la société. Ces analyses exigeraient aussi d'inclure un scénario de production acéricole seule. Farrell (2012) a publié un exercice théorique de simulations financières du point de vue d'un propriétaire foncier qui aurait à choisir entre louer ses érables pour une production acéricole ou bien les faire couper pour la valeur des bois. Ses analyses de sensibilité l'ont notamment amené à conclure que le propriétaire tirerait un meilleur bénéfice de la récolte à court terme des érables de grande valeur, mais qu'il pourrait être plus intéressant de tirer un revenu de l'entaillage pour les érables de plus faible valeur (petit DHP, faible qualité). Cependant, il n'a pas évalué le scénario de co-production. Notre modèle pourrait servir à alimenter une telle analyse.

## Implications pour l'aménagement

Le choix de convertir une érablière à la production acéricole est un engagement de gestion à long terme (Farrell 2012). D'ailleurs, Sendak *et al.* (1982) mentionnent que la production de bois devient un objectif secondaire lorsque la production de sève est mise de l'avant. À cet effet, notre étude confirme que l'entaillage diminue d'environ 50 % le volume net sur pied de bois d'œuvre d'érable à sucre et engendre une réduction d'environ 40 % de ce volume pouvant être récolté après un premier cycle de 30 ans. Dans un scénario de co-production, ces constats ont des implications variables selon le contexte d'opérations forestières.

Pour un industriel transformateur de bois d'œuvre feuillu qui s'approvisionne dans des forêts publiques ou dans ses forêts privées, cette réduction de bois d'œuvre occasionnée par l'introduction d'une tierce partie qui récolte la sève rend sa récolte de bois beaucoup moins intéressante, surtout si la rentabilité de ses opérations de récolte est déjà marginale. À titre indicatif, les volumes simulés de récolte de bois d'œuvre sont relativement faibles, soit à  $5,4$  et  $9,1 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$  dans les scénarios avec et sans entaillage, respectivement. À titre comparatif, des industriels forestiers récoltaient de manière opérationnelle de  $9,9$  à  $24,2 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$  de bois d'œuvre, selon la région, dans des coupes de jardinage pratiquées au Québec à la fin de la décennie 1990 (Guillemette *et al.* Sous presse). De plus, la récolte, qui est habituellement déléguée à des entrepreneurs forestiers dans de telles érablières en co-production, devrait coûter un peu plus cher qu'en production unique de bois de bois d'œuvre, car il faut protéger les infrastructures acéricoles, notamment les tuyaux principaux (suspendus ou enfouis), les stations de pompage et le réseau électrique, en plus d'avoir à synchroniser la récolte avec le changement de la tubulure par l'acériculteur. Malgré ces coûts de récolte plus importants pour un industriel forestier, si celui-ci est propriétaire de l'érablière, alors il est possible qu'il augmente ses bénéfices à l'hectare en y ajoutant les revenus de la production acéricole (Ouimet *et al.* 2018), même s'il sacrifie une partie de ses revenus de récolte de bois.

Nous sommes d'avis qu'il serait pertinent d'évaluer les paramètres financiers du point de vue d'un acériculteur local d'une érablière (en forêt privée ou publique) qui prendrait aussi en charge la récolte de bois d'œuvre d'érable à sucre.

## Remerciements

Les auteurs tiennent à remercier Filip Havreljuk et Louis Duchesne, chercheurs à la Direction de la recherche forestière du ministère des Ressources naturelles et des Forêts, de leur avoir permis, respectivement, d'utiliser le programme de modélisation afin de mener cette étude (projet n° 142332134) et d'avoir préparé la Fig. 2. Ils tiennent aussi à remercier Josiane DeBlois, statisticienne à la DRF, pour son aide et ses précieux conseils dans la réalisation des analyses statistiques, ainsi que Jean Noël pour avoir préparé la Fig. 1. Finalement, ils remercient l'éditeur associé, un réviseur anonyme et Martin Béland pour leurs commentaires constructifs.

## Bibliographie

- Allard, G.B. 1999.** Calcul du poids spécifique (densité) d'une solution de sucre d'érable en fonction de sa concentration (°Brix). Centre ACER, Saint-Norbert-d'Arthabaska (Qc). Info-fiche acéricole. 3 p.
- Allard, G. et M. Belzile. 2004.** Cahier de transfert technologique en acériculture. D. Jacques et C. Ferland (éds.), Centre de référence en agriculture et agroalimentaire du Québec, Québec (QC). 656 p.
- Atlantic Corporation. 2019.** Maple syrup markets and growth opportunities. Prepared for: Vermont Agency of Agriculture, Food and Markets. September 2019. 30 p. Disponible à : <https://agriculture.vermont.gov/form/maple-syrup-markets-growth-opportunities>.
- Bédard, S. et Z. Majcen. 2001.** Ten-year response of sugar maple-yellow birch-beech stands to selection cutting in Québec. *North. J. Appl. For.* 18: 119–126.
- Bédard, S. et Z. Majcen. 2003.** Growth following single-tree selection cutting in Québec northern hardwoods. *For. Chron.* 79(5): 898–906.
- Boulet, B. et G. Landry. 2015.** La carie des arbres : fondements, diagnostic et application, 3<sup>e</sup> éd., Les Publications du Québec. Québec (Qc). 347 p.
- Brown, R.D. et B. Brasnett. 2010.** Mis à jour annuellement. Canadian Meteorological Centre (CMC) Daily Snow Depth Analysis Data, Version 1. Boulder, Colorado USA. NASA National Snow and Ice Data Center Distributed Active Archive Center. <https://doi.org/10.5067/W9FOYW0EQZ3>.
- Cassell, D.L. 2002.** A randomization-test wrapper for SAS® PROCs. SAS Conference Proceedings: SAS Users Group International 27. SAS Institute Inc., Cary, NC.
- Chapeskie, D., M. Richardson, A. Wheeler, B. Sajan et P. Neave. 2006.** A guide to improving and maintaining sugar bush health and productivity. Ontario Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs, Eastern Ontario Model Forest, Kemptville (ON). 137 p. [https://www.eomf.on.ca/media/k2/attachments/A\\_Guide\\_to\\_Improve\\_Maintain\\_Sugar\\_Bush\\_Health\\_EOMF.pdf](https://www.eomf.on.ca/media/k2/attachments/A_Guide_to_Improve_Maintain_Sugar_Bush_Health_EOMF.pdf)
- Delisle, J.-F. 2021.** Ressources et industries forestières du Québec, portrait statistique 2020. Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs. Direction du développement et de l'innovation de l'industrie. Disponible à : <https://mffp.gouv.qc.ca/les-forets/connaissances/statistiques-forestieres/>
- Edwards, D. et J.J. Berry. 1987.** The efficiency of simulation-based multiple comparisons. *Biometrics* 43: 913–928. <https://doi.org/10.2307/2531545>.
- Farrell, M.L. 2012.** The economics of managing maple trees for syrup or sawtimber production. *North. J. Appl. For.* 29(4): 165–172.
- Flewelling, J.W. et L.V. Pienaar. 1981.** Multiplicative regression with lognormal errors. *For. Sci.* 27(2): 281–289. <https://doi.org/10.1093/forestscience/27.2.281>
- Fortin, M., S. Bédard et J. DeBlois. 2009.** SaMARE : un modèle par tiges individuelles destiné à la prévision de la croissance des érables de structure inéquienne du Québec méridional. Ministère des Ressources naturelles et de la Faune, Direction de la recherche forestière. Mémoire de recherche forestière n° 155, 44 p.
- Gouvernement du Québec. 2022.** Règlement sur les permis d'intervention : RLRQ, chapitre A-18.1, r. 8.1, à jour le 1<sup>er</sup> juillet 2022. [Québec]. Éditeur officiel du Québec. Disponible à : <http://www2.publicationsduquebec.gouv.qc.ca/dynamicSearch/telecharge.php?type=1&file=68031.pdf>
- Guillemette, F., F. Havreljuk et S. Bédard. 2021.** Qualité de l'érable à sucre dans l'unité d'aménagement 064-71. Gouvernement du Québec, ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs, Direction de la recherche forestière, Avis technique SSRF-22. 22 p. [https://mffp.gouv.qc.ca/documents/forets/recherche/AT\\_SSRF-22.pdf](https://mffp.gouv.qc.ca/documents/forets/recherche/AT_SSRF-22.pdf)
- Guillemette, F., S. Bédard, D. Pin et D. Dumais. 2013.** Chapitre 23 – Les coupes de jardinage avec gestion par arbres, dans Ministère des Ressources naturelles (édit.), Le guide sylvicole du Québec, Tome 2 – Les concepts et l'application de la sylviculture, ouvrage collectif sous la supervision de C. Larouche, F. Guillemette, P. Raymond et J.-P. Saucier, Les Publications du Québec, Québec (Qc). p. 566–603.
- Guillemette, F., F. Havreljuk, H. Power et S. Bédard.** Sous presse. Rendements observés et simulés 20 ans après des coupes de jardinage pratiquées de 1995 à 1999 dans un contexte opérationnel. Gouvernement du Québec, ministère des Ressources naturelles et des Forêts, Direction de la recherche forestière. Mémoire de recherche forestière.
- HMR 2020. [Hardwood Market Report].** Hardwood Market Report-Lumber News Since 1922. [Weekly]. Memphis, TN. Vol.: XCVIII, Nos: 22–27.
- Havreljuk, F., S. Bédard, F. Guillemette et J. DeBlois. 2015.** Predicting log grade volumes in northern hardwood stands in southern Quebec. Proceedings of the 5<sup>th</sup> International Scientific Conference on Hardwood Processing (ISCHP2015), Sept. 15–17, Québec, Canada. 107–114.
- Havreljuk, F., F. Guillemette, S. Bédard, I. Auger et H. Power.** En prép. Comparaison des biais et de la précision des estimations de la nouvelle version de SaMARE par rapport à SaMARE-2006. Gouvernement du Québec, ministère des Ressources naturelles et des Forêts, Direction de la recherche forestière.
- Houston, D.R., D.C. Allen et D. Lachance. 1990.** Aménagement de l'érablière : guide de protection de la santé des arbres. Forêt Canada, Rapport d'information LAU-X-92F. 39 p.
- IFNC 2021. [Inventaire forestier national du Canada].** Données combinées remesurées (2007–2017) et projetées (2006–2017 avec le système de projection IFN) (Version 1, Juillet 2021) Disponible à : <http://nfi.nfis.org>.
- Majcen, Z., S. Bédard et S. Meunier. 2005.** Accroissement et mortalité quinze ans après la coupe de jardinage dans quatorze érablières du Québec méridional. Gouvernement du Québec, ministère des Ressources naturelles et de la Faune, Direction de la recherche forestière, Mémoire de recherche forestière n° 148. 56 p.
- Majcen, Z., Y. Richard, M. Ménard et Y. Grenier. 1990.** Choix des tiges à marques pour le jardinage d'érablière inéquiennes. Guide technique. Gouvernement du Québec, ministère de l'Énergie et des Ressources (Forêts), Direction de la recherche et du développement, Service de la recherche appliquée, Mémoire n° 96. 114 p. <https://mffp.gouv.qc.ca/documents/forets/connaissances/recherche/Memoire96.pdf>
- MAPAQ 2021. [Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec].** Portrait-diagnostic sectoriel de l'industrie acéricole au Québec. Gouvernement du Québec, ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation, 29 p. [https://www.mapaq.gouv.qc.ca/fr/Publications/Monographie\\_acericole.pdf](https://www.mapaq.gouv.qc.ca/fr/Publications/Monographie_acericole.pdf)
- MRN-MAPAQ 2000. [Ministère des Ressources naturelles et Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec].** Contribution du territoire public québécois au développement de l'acériculture, Rapport du comité MRN – MAPAQ sur l'acériculture. Gouvernement du Québec. Disponible à : <ftp://transfert.mern.gouv.qc.ca/public/Biblio/Mono/2017/01/0697313.pdf>.
- NHLA 2007. [National Hardwood Lumber Association].** Rules for the measurement and inspection of hardwood and cypress lumber. National Hardwood Lumber Association. Memphis, TN. 106 p.
- Oswalt, S.N., W.B. Smith, P.D. Miles et S.A. Pugh. 2019.** Forest Resources of the United States, 2017: a technical document supporting the Forest Service 2020 RPA Assessment. Gen. Tech. Rep. WO-97. Washington, DC: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Washington Office. 223 p. Disponible à : <https://doi.org/10.2737/WO-GTR-97>.
- Ouimet, R., A. Leroux, L. Duchesne et J.-D. Moore. 2018.** Rentabilité financière du chaulage des érablières : étude de cas. Gouvernement du Québec, ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs, Direction de la recherche forestière. Note de recherche forestière n° 152. 18 p. <https://mffp.gouv.qc.ca/documents/forets/recherche/Note152.pdf>

- Petro, F.J. et W.W. Calvert. 1976.** La classification des billes de bois francs destinées au sciage. Ministère des Pêches et de l'Environnement du Canada, Service canadien des forêts, Forintek Canada Corp., Ottawa, Ont. Rapp. Tech. For. 6F.
- Rast, E.D., D.L. Sonderman et G.L. Gammon. 1973.** A guide to hardwood log grading. Revised edition. USDA For. Serv., Gen. Tech. Rep. NE-1. 31 p.
- SAS Institute Inc. 2021.** Base SAS® Procedures Guide: Statistical Procedures. Cary, NC: SAS Institute Inc. [[https://documentation.sas.com/api/collections/pgmsascdc/v\\_016/docsets/procstat/content/procstat.pdf?locale=fr#nameddest=titlepage](https://documentation.sas.com/api/collections/pgmsascdc/v_016/docsets/procstat/content/procstat.pdf?locale=fr#nameddest=titlepage)]
- Saucier, J.-P., A. Robitaille et P. Grondin. 2009.** Cadre bioclimatique du Québec. Dans *Écologie forestière. Manuel de foresterie*, 2e édition. Ordre des ingénieurs forestiers du Québec. Éditions Multi-mondes, Québec, Qc. p. 186–205.
- Sendak, P.E., N.K. Huyler et L.D. Garrett. 1982.** Lumber value loss associated with tapping sugar maples for sap production. USDA For. Serv., Northeastern For. Exp. Sta., Res. Note NE-306. 4 p. Disponible à : [https://www.nrs.fs.fed.us/pubs/rn/rn\\_ne306.pdf](https://www.nrs.fs.fed.us/pubs/rn/rn_ne306.pdf).
- Shigo, A.L. et H.G. Marx. 1977.** Compartmentalization of decay in trees. USDA For. Serv. Agricul. Infor. Bull. No. 405, 73 p. Disponible à : <https://www.fs.usda.gov/treearch/pubs/5292>.
- Stroup, W.W., G.A. Milliken, E.A. Claassen et R.D. Wolfinger. 2018.** SAS® for Mixed Models: Introduction and Basic Applications. Cary, NC: SAS Institute Inc. 594 p.
- Tremblay, S. 2012.** L'acériculture et la sylviculture, un mariage de raison pour l'aménagement durable des érablières. Café-conférence forestier, Pavillon Gene-H. Kruger, Université Laval, Québec, 17 janvier 2012.
- Westfall, P.H., R.D. Tobias, D. Rom, R.D. Wolfinger et Y. Hochberg. 1999.** Multiple comparisons and multiple tests using the SAS system. SAS Institute, Inc., Cary, NC.