

**Avis scientifique sur les recommandations
d'entailage souhaitable au Québec dans
l'optique d'assurer la durabilité de la
production acéricole**

***Christian Messier, Ph. D., Ing. F., Gauthier Lapa, Ph. D.
et Élise Bouchard, M. Sc., Ing. F.***

18 mars 2022

**Mandat octroyé par le ministère de l'Agriculture, des Pêcheries
et de l'Alimentation (MAPAQ) du Québec**

Table des matières

Résumé exécutif	4
1. Mise en contexte	6
2. Le futur de l'érable au Québec dans le contexte des changements globaux (changements climatiques, insectes et maladies et autres facteurs)	9
2.1. Qu'est-ce qu'une érablière et l'importance des espèces compagnes	9
▪ Recommandations sur la proportion d'espèces compagnes	10
2.2. Menaces climatiques, biologiques et autres facteurs et la durabilité de l'érablière au Québec.....	11
2.3. Qu'est-ce qu'un érable en santé	12
3. Effets de l'entaillage répété sur les mécanismes de compartimentage de l'arbre et de formation de carie.....	12
3.1. Compartimentage de l'arbre : mécanisme de survie pour limiter l'ampleur de la blessure	12
▪ Le compartimentage suite à l'entaillage	14
▪ Vitesse de cicatrisation, compartimentage et champignons de carie	14
4. Effets de l'entaillage répété sur la croissance et la vigueur des érables considérant la perte de tissu conducteur et la quantité de réserve prélevée.....	15
4.1. Effet de l'entaillage sur la croissance de l'érable	15
4.2. Effet de l'entaillage sur la réduction du xylème conducteur	16
4.3. Effet de l'entaillage sur les réserves de l'arbre	17
▪ Introduction sur les sucres	18
▪ Rôles des sucres solubles.....	18
▪ Bassins de glucides non structuraux.....	18
▪ Remobilisation des ressources	19
▪ Accumulation de stress.....	19
5. Évaluation de l'effet des techniques d'entaillage, du matériel et des équipements utilisés....	20
5.1. Profondeur d'entaille et diamètre des chalumeaux	20
5.2. Systèmes sous vide.....	21
5.3. Effets des méthodes d'entailages sur la durabilité de la production acéricole	22
5.4. L'entaillage sur plusieurs niveaux	24
6. Constatations et recommandations.....	25
6.1. Au niveau du peuplement et en fonction des changements globaux	25
6.2. Au niveau de l'entaillage et du maintien de la vitalité de l'érable	26
6.3. Diamètre minimal recommandé pour l'entaillage des érables	28

6.4. Nombre d'entailles maximales et dimension minimale pour ajouter une deuxième entaille	30
7. Priorité de recherche.....	31
8. Remerciements	32
9. Littérature citée.....	33
10. Annexe 1.....	45

Résumé exécutif

Les érables sont des arbres emblématiques au Québec qui contribuent énormément à notre bien-être social et économique. L'érable étant particulièrement sensible aux bouleversements engendrés par les changements globaux, un effort devrait être fait pour favoriser sa vigueur et sa résilience face aux nombreuses perturbations et menaces qui sont en augmentation constante.

La production acéricole est importante au Québec et en croissance. Il est donc important de développer des techniques d'entaillage et d'aménagement de nos érablières qui soient durables, à la fine pointe des connaissances scientifiques et qui tiennent compte des menaces et incertitudes liées aux changements globaux.

Les constatations et recommandations formulées dans ce rapport se basent sur l'état des connaissances scientifiques actuelles et visent à préserver la durabilité à long terme de la ressource érable et de la production acéricole au Québec. Les différentes valeurs recommandées pour un entaillage durable des érables au Québec proviennent tous d'études ou simulations publiées.

La sur-simplification de la composition en espèces des érablières sucrières commerciales compromet à moyen et long termes la résilience de cet écosystème face aux menaces climatiques et biotiques grandissantes. Le maintien d'une certaine diversité d'espèces d'arbres basée sur la diversité fonctionnelle nous apparaît comme essentiel afin de permettre à l'érablière de mieux résister et/ou récupérer rapidement suite à ces multiples perturbations abiotiques et biotiques. Nous recommandons de maintenir en tout temps au moins 20 % d'espèces compagnes ayant des traits fonctionnels variés. De plus, sur les sites les plus pauvres et acides, le chaulage nous semble essentiel afin de pouvoir obtenir une croissance minimale permettant un entaillage économique et durable à long terme.

L'érable ne semble pas grandement affecté au niveau de sa croissance et de sa vigueur par les techniques d'entaillage passées et présentes, mais plus d'études sont nécessaires pour valider ce constat, surtout avec l'apport des nouvelles techniques de récolte d'eau d'érable sous haut vide et l'accumulation des perturbations et des menaces climatiques et biotiques.

Un sur-entaillage des érables (i) trop petits, (ii) présentant des défauts et blessures majeurs et/ou un dépérissement important (i.e., arbre en mauvaise santé) et/ou (iii) ayant une croissance radiale trop faible pourrait compromettre leur capacité d'entaillage future. En effet, considérant (1) la faible croissance radiale moyenne de nos érables au Québec par rapport à nos voisins du sud, (2) le nombre relativement limité d'études scientifiques disponibles pour plusieurs facteurs importants à considérer dans la détermination des paramètres minimaux ou optimaux pour l'entaillage des érables et (3) le fait que les évaluations qui ont été faites jusque-là se basent sur des simulations théoriques en conditions presque idéales, nous suggérons la prudence dans la détermination des normes d'entaillage à privilégier.

Le diamètre minimal du tronc mesuré à 1,3 m pour l'entaillage des érables ne devrait donc pas être inférieur à 23,1 cm, tel que suggéré par le MFFP. De plus, les conditions d'entaillage (diamètre du chalumeau, profondeur de l'entaillage et diamètre minimal pour l'entaillage) devraient être modifiées en fonction de la croissance radiale et la santé générale des érables (voir tableau 3 à la page 27). L'entaillage devrait se faire sur plusieurs niveaux au-dessus et en dessous de la ligne latérale afin d'assurer une bonne répartition des entailles et conséquemment des zones compartimentées le long du tronc.

Si les conditions de croissance radiale sont moins de 1,25 mm/an (croissance considérée sous-optimale pour le Québec) ou si les érables sont en mauvaise santé tout en ayant une croissance de plus de 1,25 mm/an, il faudrait réduire le diamètre maximal du chalumeau à 1/4" (6,35 mm) et/ou la profondeur maximale de l'entaille à 25-30 mm pour les érables entre 23,1 et 31 cm ou encore augmenter le diamètre minimal du tronc à 31 cm pour un entaillage avec des chalumeaux de 5/16" et une profondeur d'entaillage de 45-50 mm avec écorce. Pour des érables ayant une croissance très faible (moins de 0,50 mm/an) en bonne ou mauvaise santé, nous recommandons d'utiliser des chalumeaux d'un diamètre maximal de 1/4" (6,35 mm), une profondeur maximale d'entaille de 25-30 mm et un diamètre minimal du tronc pour l'entaillage de 31 cm. Cette valeur de 31 cm provient du rapport de Perkins (2022) qui suggère ce minimum pour des érables considérés comme sous-optimale par les producteurs. Si l'utilisation de plus petits chalumeaux et profondeurs d'entaillage n'est pas jugée appropriée ou faisable, il serait possible d'entailer ces arbres une année sur deux ou deux années sur trois, selon les conditions de croissance et de santé de l'érable, afin d'assurer la durabilité de l'entaillage.

En ce qui concerne le nombre d'entailles par arbre, il ne devrait jamais dépasser 2 entailles et le diamètre minimal pour ajouter une deuxième entaille ne devrait jamais être inférieur à 40 cm. Pour des érables en mauvaise santé ayant une croissance radiale de moins de 1,25 mm/an ou pour des érables en bonne ou mauvaise santé ayant une croissance radiale de moins de 0,50 mm/an, le nombre d'entaille par arbre devrait être limité à une seule entaille.

Nous recommandons que chaque grand producteur acéricole fasse un suivi de la croissance de ses érables sur chaque site afin de pouvoir ajuster, au besoin, ses techniques d'entaillage et ainsi assurer la durabilité à long terme de la ressource. Des interventions sylvicoles telles que le chaulage et l'éclaircie peuvent aussi être considérées pour augmenter la vigueur et la croissance des érables et ainsi permettre de modifier ces techniques en conséquence.

Finalement, il est fortement recommandé d'augmenter le nombre d'études sur les différents facteurs qui affectent la croissance, la vigueur et la capacité d'entaillage à long terme de nos érablières sucrières dans l'optique d'adopter des techniques d'aménagement forestier et de récolte de l'eau d'érable qui favorisent la durabilité à long terme de la production acéricole au Québec.

1. Mise en contexte

Au Québec, l'industrie du sirop d'érable occupe une place importante autant au niveau économique que social. En effet, le Québec produit plus de 70 % de la production mondiale de sirop d'érable (PPAQ, 2019) et la demande étant en augmentation, l'industrie vise à augmenter de façon substantielle la production au cours des 20 prochaines années. Comme le potentiel acéricole est important en forêt publique, on s'attend à y observer une bonne partie de l'accroissement du nombre d'entailles dans les prochaines années.

Les techniques d'entaillage des érables ont beaucoup évolué depuis les 30 dernières années, de concert avec nos connaissances sur l'impact de cet entaillage sur la santé et la vigueur de l'érable. La tendance internationale (c.-à-d. Québec, provinces et états limitrophes) au niveau de l'entaillage est à une réduction du diamètre du chalumeau et de la profondeur de l'entaille, à une augmentation du diamètre minimal du tronc des arbres entaillés et à une augmentation de la récolte d'eau d'érable par entaille. On notera que le Québec a les techniques d'entaillage et les normes parmi les moins strictes comparativement à ses voisins (voir tableau 1).

Dans le contexte actuel où les menaces climatiques et biotiques (maladies et insectes exotiques) sont en augmentation, la question de la durabilité à long terme de la ressource érable est de plus en plus souvent soulevée (ex. Moreau et al., 2020; Nolet & Kneeshaw, 2018; Oswald et al., 2018; Bishop et al., 2015).

Ce rapport vise à faire un tour d'horizon des connaissances scientifiques sur les aspects suivants :

- La durabilité de la production acéricole au Québec à moyen- et long-termes dans le contexte des changements globaux (changements climatiques, insectes et maladies exotiques)
- Les effets de l'entaillage et du prélèvement de sucre répété sur les mécanismes de compartimentage, la perte d'efficacité de l'aubier et le niveau de réserves ainsi que sur la santé et la vigueur de l'érable en général
- Les effets des différentes techniques d'entaillage et du matériel et équipements utilisés (ex. diamètre des chalumeaux, étanchéité à l'entaille, niveau de vide) sur la santé et la vigueur de l'érable.

En plus d'avoir consulté la littérature scientifique, des rapports techniques et des articles de vulgarisation sur le sujet, nous avons aussi consulté différents experts dans différents domaines (voir annexe 1 pour la liste des experts consultés) via courriel et des rencontres virtuelles pour obtenir leurs opinions sur des questions bien précises et avoir des informations qui ne sont pas encore publiées.

Ce tour d'horizon des connaissances scientifiques nous permettra d'émettre une série de recommandations basées sur les personnes et études scientifiques et rapports consultés. Une liste de questions scientifiques demandant à être résolues en priorité est aussi présentée.

Tableau 1. Comparaison des différentes réglementations et recommandations sur les bonnes pratiques d'entaillage qui ont été proposées au fil des années par différents organismes au Québec et dans les provinces et états limitrophes aux États-Unis.

Titre du document	Diamètre minimum de l'arbre (cm) pour 1, 2, 3 ou 4 entailles				Diamètre de l'entaille (mm)	Profondeur de l'entaille (mm)	Référence
	1	2	3	4			
Règlement sur les permis d'intervention en terres publiques, Québec, actuel	19,1	39,1	59,1	79,1	11	63	MFFP (2018)
Règlement sur les permis d'intervention en terres publiques, Québec, à partir de 2023	23,1	39,1			8	50	MFFP (2018)
North American Maple Syrup Producers Manual, 3rd Edition, Conservative, arbres en condition optimale	31				11,11	25 à 64	Perkins et al. (2022)
North American Maple Syrup Producers Manual, 3rd Edition, Conservative, arbres en condition sub-optimale	31				6,35 à 7,93	25 à 38	Perkins et al. (2022)
North American Maple Syrup Producers Manual, 3rd Edition, Standard, arbres en condition optimale	23 à 31	46 à 56			6,35 à 7,93	38 à 50	Perkins et al. (2022)
New York State Maple Tubing and Vacuum System Notebook 6th edition	25,4					50	Cornell Maple Program (2021)
Réalisation d'un plan d'érablière selon les exigences des Producteurs et productrices acéricoles du Québec (PPAQ) - Instructions pour les ingénieurs forestiers	20	40	60	80			Producteurs et productrices acéricoles du Québec (2021)
How to Tap Maple Trees and Make Maple Syrup - Cooperative Extension Publications - University of Maine Cooperative Extension	30,5	50,8				38	University of Maine Cooperative Extension (2021)
Systèmes de production biologique : principes généraux et normes de gestion.	20	40	60		7,93	50 (DHP < 25 cm) ou 60 (DHP ≥ 25 cm)	Canada : Office des normes générales du Canada : Conseil canadien des normes (2020)

Titre du document	Diamètre minimum de l'arbre (cm) pour 1, 2, 3 ou 4 entailles				Diamètre de l'entaille (mm)	Profondeur de l'entaille (mm)	Référence
	1	2	3	4			
Guidelines for Certification of Organic Maple Syrup & Sap	22,9	38,1	55,9		7,93	76	Vermont Organic Farmers (2014)
Guidelines for Certification of Organic Maple Syrup & Sap	30,5	48,3			11,11	76	Vermont Organic Farmers (2014)
Technical Research Note – Tapping Guidelines for Current Sap Collection Practices	30,5				7,54 ou 7,93	38	van den Berg et al. (2013)
Maple Sugary Leasing Policy	24	36	45				Nouveau Brunswick (2011)
North American Maple Syrup Producers Manual, 2nd Edition, Traditional	25	38	50	64	7,93	≤ 50	Heiligmann et al. (2006)
North American Maple Syrup Producers Manual, 2nd Edition, Conservative	30	46			7,93	≤ 50	Heiligmann et al. (2006)
A Guide to Improving and Maintaining Sugar Bush Health and Productivity	25	37	50		7,54 ou 7,93	25 à 50	Chapeskie et al. (2006)
Aménagement de l'érablière: guide de protection de la santé des arbres. Rapport d'information LAU-X-92F	25	45				60	Houston et al. (1990)
Érablière : entaillage des érables	20	40	60	80	11	50 à 65	Conseil des productions végétales du Québec. Comité d'acériculture (1984)
Tapping guideline	30,5	45,7					Buzzell (1987)
Maple Syrup producers manual	24,5	38,1	50,8	63,5	11,11	76	Willits and Hills (1976)

2. Le futur de l'érable au Québec dans le contexte des changements globaux (changements climatiques, insectes et maladies et autres facteurs)

2.1. Qu'est-ce qu'une érablière et l'importance des espèces compagnes

L'érable à sucre est présent presque partout dans les forêts du Québec méridional. Il forme naturellement, avec plusieurs autres espèces d'arbres, arbustes et plantes herbacées, ce que l'on désigne sous le terme « érablière ». De façon naturelle, l'érablière ne contient que très rarement plus de 60 % d'érable à sucre (Beudet et al., 2007; Delcourt & Delcourt, 2000; Dahir & Lorimer, 1996; Goodburn, 1996) et cette proportion est en constante évolution naturellement en fonction des conditions environnementales globales qui varient dans le temps. La proportion d'érables à sucre dans nos érablières aménagées a cependant eu tendance à augmenter sous l'influence humaine (Dupuis et al., 2011; Foster et al., 1998; Simard & Bouchard, 1996; Bouchard et al., 1989), particulièrement dans les érablières exploitées pour la sève (dites « érablières sucrières » dans le reste du document) qui sont commerciales, où la proportion d'érables à sucre est souvent au-dessus de 75 % et la proportion d'érables, si on inclut l'érable rouge, est souvent supérieure à 90 %.

Une telle simplification compositionnelle de l'érablière sucrière, bien qu'elle se justifie en termes de productivité de la sève que l'on récolte au printemps, compromet à moyen et long termes la résilience de cet écosystème face aux menaces climatiques et biotiques grandissantes. La littérature scientifique est en effet très claire à ce sujet : plus un écosystème forestier est diversifié, plus il est productif et capable de résister et/ou récupérer rapidement et efficacement à la suite d'une panoplie de perturbations.

Afin d'améliorer la résilience de nos forêts, il est primordial de maintenir une grande diversité au sein des différents peuplements forestiers, et ce aussi bien au niveau de la diversité en espèces que de la diversité structurale. Bien que le recensement du nombre d'espèces nous fournisse un bon indice de diversité d'un peuplement, il ne suffit pas à nous renseigner sur la diversité des fonctions et des services biologiques remplis par les espèces présentes, ni même sur la niche écologique qu'elles occupent. L'approche mise de l'avant ici s'intéresse plutôt aux caractéristiques biologiques des espèces (soit leurs traits fonctionnels) et nous permet de mesurer la diversité dite fonctionnelle d'un écosystème (Garnier & Navas, 2013). Ces caractéristiques morphologiques (ex. hauteur maximale de l'arbre, taille des semences), physiologiques (ex. taux photosynthétique, sensibilité à la cavitation) ou phénologiques (ex. début et fin de la période de croissance annuelle) affectent la performance individuelle d'un organisme et sont directement liées à la façon dont les arbres vont répondre et s'adapter à un ou plusieurs facteurs environnementaux. Face à l'incertitude liée aux changements globaux, une forêt résiliente sera une forêt composée d'espèces ayant des traits fonctionnels diversifiés et capables de résister ou de s'adapter au plus large spectre de stress possible.

En effet, les études montrent que globalement, les forêts plus diversifiées en espèces d'arbres ayant des caractéristiques biologiques différentes (autrement dit une diversité fonctionnelle élevée) ont tendance à mieux croître (Messier et al. 2021; Grossman et al. 2018; Liang et al. 2016; Paquette & Messier, 2011), à mieux résister aux stress climatiques et aux maladies et insectes (Jactel et al., 2021; Jactel & Brockerhoff, 2007), à récupérer plus rapidement à la suite de ces stress (Sakschewski et al., 2016; Mori et al., 2013), à maintenir un plus haut niveau de biodiversité à tous les niveaux trophiques (Ampoorter et al., 2020; Paquette & Messier, 2010) et à fournir une plus

grande quantité et qualité d'autres services écosystémiques comme la fixation du carbone, la filtration de l'eau ou le maintien de la biodiversité (Baeten et al., 2019; Van der Plas et al., 2016; Gamfeldt et al., 2013).

Bien que très peu d'études sur les effets et l'importance des espèces compagnes dans le contexte spécifique des érablières ont été réalisées et publiées à ce jour, on peut s'attendre à observer les mêmes tendances que celles rapportées dans le paragraphe précédent pour d'autres types de forêts. En effet, l'étude de Olivier et al. (2016) a montré que la compétition entre érables à sucre matures est plus intense dans les peuplements purs que dans les peuplements mélangés. En fait, les couronnes des érables à sucre en peuplements mélangés sont plus étendues et moins denses que celles des érables à sucre en peuplements purs. De la même façon, au sein du dispositif expérimental IDENT/Montréal (Tobner et al., 2014), la croissance moyenne des érables à sucre est plus forte au sein de parcelles constituées de différents mélanges de bouleau blanc, mélèze laricin, sapin baumier, épinette blanche, pin blanc, bouleau jaune et thuya que dans des parcelles monospécifiques pour 5 des 6 mélanges testés (Urgoiti, 2022). La seule parcelle mélangée où l'érable à sucre pousse moins rapidement est celle où le bouleau blanc dominait totalement le couvert. Au niveau de l'impact des espèces compagnes sur la qualité de la litière et du sol, quelques études ont montré que la présence d'espèces compagnes dans l'érablière, telles que le tilleul, les peupliers, le noyer cendré et le frêne d'Amérique (et dans une moindre mesure les bouleaux et les chênes), améliore la qualité et la fertilité du sol (Bélanger et al., 2004; Côté et Fyles, 1994a, b). Un aspect important des études de Côté et Fyles (1994a, b) est que l'érable rouge a le même effet acidifiant sur la litière que l'érable à sucre. De plus, dans le même dispositif IDENT/Montréal, le manganèse (Mn) présent dans les premiers 15 cm du sol est plus abondant dans les parcelles pures d'érables à sucre que dans les parcelles pures des autres feuillus (bouleau blanc, bouleau jaune et chêne rouge) (Benoît Côté, communication personnelle). Sachant que la présence du manganèse est associée au dépérissement de l'érable à sucre (ex. Houle et al., 2007), la présence d'espèces compagnes de genres et de groupes fonctionnels différents peut avoir des effets positifs sur la qualité du sol pour l'érable à sucre.

▪ Recommandations sur la proportion d'espèces compagnes

Pour donner suite à ces constats, la question de la proportion d'espèces compagnes à maintenir dans nos érablières sucrières est importante. Ces recommandations ont évolué dans le temps passant d'un minimum de 10 % (Auger et al., 2004), à 15 % (Normes de production biologiques du MAPAQ, 2017) puis à 20 % plus récemment (Cliche et Boutin, 2021). Bien qu'il n'existe pas d'étude spécifique à l'érablière afin de déterminer la proportion d'espèces compagnes à préserver et les espèces à privilégier, il est quand même possible de formuler certaines recommandations :

- Les espèces compagnes à **privilégier** dans l'érablière devraient être **des genres et des espèces ayant des caractéristiques biologiques différentes et complémentaires à celles de l'érable** afin de minimiser la vulnérabilité des arbres aux différents stress actuels et futurs, minimiser la compétition pour les ressources entre les arbres et maximiser le maintien d'une biodiversité qui permet une plus grande résilience de l'écosystème forestier. Les caractéristiques biologiques sont souvent déterminées à l'aide de traits fonctionnels et une riche littérature existe sur le sujet (ex. Aubin et al., 2016). Des espèces variant par exemple dans leur niveau de tolérance à l'ombre, leur profondeur d'enracinement, leur niveau de tolérance à la sécheresse, leur type mycorhizien ou leurs caractéristiques foliaires seront à privilégier. Quelques articles récents dans le Progrès

Forestier expliquent bien l'approche à privilégier au niveau des espèces compagnes (Messier & Maure, 2021; Bergeron, 2020). L'érable rouge, bien qu'ayant un certain nombre d'attributs biologiques (ou traits fonctionnels) différents de l'érable à sucre, ne devrait pas constituer la seule ou la principale espèce compagne à l'érable à sucre puisqu'il est globalement sensible aux mêmes maladies et insectes et qu'il possède une litière acidifiante comme l'érable à sucre. On devrait plutôt favoriser des espèces fonctionnellement différentes comme les chênes, les tilleuls, les bouleaux, les peupliers ou les conifères. L'article dans le Progrès Forestier de Messier et Maure (2021) et les articles scientifiques de Paquette et al. (2021) et Aquilué et al. (2021) expliquent bien l'approche par traits et groupes fonctionnels et pourquoi une telle approche est intéressante pour maximiser la résilience des forêts face à des menaces diverses et imprévisibles.

- **Une proportion d'au moins 20 % d'espèces compagnes** bien réparties dans le peuplement nous apparaît comme un **minimum à privilégier**, bien que des études supplémentaires soient encore nécessaires pour mieux établir cette proportion minimale pour l'érablière sucrière au Québec.

2.2. Menaces climatiques, biologiques et autres facteurs et la durabilité de l'érablière au Québec

La question de la durabilité de l'érablière en général se pose à la lumière des changements climatiques et autres perturbations biotiques qui risquent de profondément affecter la vigueur et la survie de nos érables dans le futur. Cette question est d'autant plus importante que plusieurs études ont montré clairement que la croissance de l'érable à sucre a tendance à diminuer depuis 30 à 50 ans dans la totalité de son aire de distribution par rapport aux autres espèces, et ce, autant sur sites riches que pauvres (Bishop et al., 2015; Horsley et al., 2002). Les raisons de ce déclin ont fait l'objet de plusieurs études et les causes possibles semblent multiples et complexes. Nous avons aussi consulté les spécialistes dans le domaine ici au Québec et aux États-Unis afin d'obtenir les dernières informations sur le sujet. Il ressort de notre revue de la littérature et de nos consultations que ce déclin de croissance de l'érable à sucre serait probablement de causes multiples, différentes entre sites pauvres et riches et que les changements climatiques qui s'accroissent risquent d'accentuer ce déclin dans certaines régions et sur certains sites en particulier. Les érablières situées plus au sud du Québec et sur sol acide et mince seraient particulièrement vulnérables. Il semble aussi que les pluies acides et certaines défoliations par les insectes auraient été l'élément déclencheur de ce déclin qui est depuis lors exacerbé par les changements climatiques (commentaires des experts consultés).

En bref, les causes possibles de ce déclin de croissance de l'érable à sucre sont les suivantes :

- Pluies acides (Sullivan et al., 2013; Duchesne et al., 2002; Drohan et al., 2002),
- Hivers froids avec peu de neige (Comerford et al., 2013),
- Sécheresses estivales (Moreau et al., 2019),
- Défoliations par des insectes (Moreau et al., 2019; Hartmann et Messier, 2008),
- Températures excessives l'été et redoux sur plusieurs jours en janvier ou février (Moreau et al., 2020; Nolet et Kneeshaw, 2018; Oswald et al., 2018),
- Gels tardifs ou hâtifs (Hufkens et al., 2012), et
- Envahissement par le ver de terre (Bal et al., 2018).

De plus, la régénération de l'érable à sucre est souvent insuffisante dans les érablières pour assurer le maintien à long terme de l'érable à sucre (Henry et al., 2021). Les facteurs pour ce manque de régénération sont multiples (ex. sol acide, compétition par la fougère, surabondance du hêtre en régénération, broutage excessif de la régénération par le chevreuil) (Henry et al., 2021; Vickers et al., 2019; Ouimet et al., 2016; Duchesne et Ouimet, 2009).

Ces multiples perturbations ou menaces que l'on regroupe sous le vocable « changements globaux » affectent ou risquent d'affecter nos érablières dans le futur. Elles sont souvent d'ordre mondial (pluies acides, changements climatiques et insectes et maladies exotiques) et donc impossible à contrôler localement (Seidl et al., 2017; Trumbore et al., 2015). Il est cependant possible d'agir localement pour augmenter la résilience des érablières afin de réduire les impacts négatifs de ces perturbations et menaces. Le tableau 2 présente certaines recommandations spécifiques à chaque perturbation ou menace.

2.3. Qu'est-ce qu'un érable en santé

Il n'existe pas de définition ou critère précis d'un érable en santé. Dans le cadre de ce rapport et pour l'entaillage des érables au Québec, nous nous sommes basés sur ces références (Chapeskie et al. 2006 ; Hartmann et Messier, 2008 ; Nolet et Kneeshaw, 2018 ; Cliche & Boutin, 2021; Bevilacqua et al. 2021) pour établir qu'un érable est en santé lorsqu'il possède les caractéristiques suivantes :

- Il ne montre pas ou très peu de symptômes de dépérissement dans sa cime (moins de 10%)
- L'arbre possède une pleine cime et il ne subit pas ou peu de compétition par d'autres arbres dominants ou codominants
- L'arbre ne montre pas de signe de stress causé par les insectes et/ou maladies
- La base du tronc est saine et sans défauts ou blessures majeurs qui limitent la capacité d'entaillage
- L'arbre ne montre pas de signe de pourriture interne
- L'entaille se referme rapidement (2 ans ou moins)
- L'arbre n'a pas subi une défoliation ou perte de branches importantes au cours des 2 dernières années
- L'arbre n'a pas subi une sécheresse importante au cours des 2 dernières années

3. Effets de l'entaillage répété sur les mécanismes de compartimentage de l'arbre et de formation de carie

3.1. Compartimentage de l'arbre : mécanisme de survie pour limiter l'ampleur de la blessure

Tout au long de sa durée de vie, l'arbre doit faire face à de nombreuses perturbations qui peuvent endommager une partie de ses tissus vivants. Lorsqu'une blessure est occasionnée sur une partie de l'arbre et qu'elle engendre une mise à nu des tissus, la principale conséquence néfaste est une infiltration d'air dans la structure interne de l'arbre (Rayner, 1993). Ces infiltrations d'air engendrent instantanément un dysfonctionnement des tissus conducteurs de l'arbre (Kuroda,

2001) par la formation d'embolies (Tyree et Sperry, 1989). Ce phénomène d'embolisation des tissus conducteurs entraîne une réduction des flux de sève et un changement de l'allocation des ressources qui, à terme, peut se traduire par une diminution de la vigueur des arbres (Oliva et al., 2010, 2012). Par ailleurs, la mise à nu des tissus à la suite de blessures crée de surcroît une voie d'entrée pour le développement d'agents pathogènes (ex. champignons, bactéries, virus) et durant les années post-infection, la dispersion des agents pathogènes dans la structure interne de l'arbre peut conduire à la formation de pourritures, puis de cavités susceptibles d'affecter la tenue mécanique de l'arbre. Ainsi, pour contrer la propagation d'agents pathogènes, l'arbre tente de les isoler en les encapsulant au sein même de sa structure, suivant un processus appelé compartimentage. Ce mécanisme de défense, décrit par Shigo et Marx (1977) et plus connu sous le nom CODIT (Compartmentalization of decay in trees), fait référence à la mise en place de quatre barrières (ou murs) autour de la blessure. Alors que les trois premières barrières se localisent à l'intérieur du bois et visent à limiter la progression longitudinale, centrale et latérale d'agents pathogènes, la première barrière, qui repose sur la formation de gommages et de thylles dans les vaisseaux conducteurs infectés, empêchera la propagation en amont et en aval du point d'infection. La seconde barrière, s'établissant au niveau du parenchyme axiale des cernes de croissance, freinera la propagation vers le centre de l'arbre. Puis, la troisième barrière, prenant effet au niveau des rayons ligneux, contrera la propagation latérale de l'agent pathogène. La quatrième barrière, la plus importante et se développant sur le pourtour de la blessure à partir de nouveaux tissus, consiste à former un cal de recouvrement pour refermer la blessure. Compte tenu du fait que l'arbre ne régénère, ne répare ou ne remplace pas les tissus blessés et infectés, la zone ainsi compartimentée reste présente dans la structure interne de l'arbre pour toute sa durée de vie et se décolore au fil du temps (Shigo, 1986).

Tableau 2. Principales perturbations ou menaces biotiques et climatiques à long terme et recommandations d'interventions possibles pour réduire leurs impacts négatifs dans les érablières.

Menaces	Interventions possibles	Références
Pluies acides	<ul style="list-style-type: none"> - Chaulage sur sol acide et pauvre - Maintien d'une forêt diversifiée afin de réduire la compétition, améliorer la qualité du sol et ainsi maintenir la vigueur de l'érable à sucre 	Moore and Ouimet. 2021; Moore et al. 2020; Côté et Fyles, 1994a, b; Bélanger et al. 2004
Hivers froids avec peu de neige	<ul style="list-style-type: none"> - Maintien d'une forêt diversifiée pour réduire la compétition, améliorer la qualité du sol et ainsi maintenir la vigueur de l'érable à sucre 	Bauhus et al. 2017; https://agriclimat.ca/wp-content/uploads/2021/03/Fiche-acericulture-Chaudiere-Appalaches.pdf
Sécheresses	<ul style="list-style-type: none"> - Rétention du bois mort au sol qui permet la rétention de l'eau - Éclaircie afin d'augmenter la vigueur et diminuer les besoins en eau - Maintien d'espèces compagnes ayant des caractéristiques biologiques variées pour diminuer la compétition avec l'érable à sucre 	Bauhus et al. 2017; Gleason et al. 2017; Olivier et al. 2016; Sohn et al. 2016
Insectes et maladies	<ul style="list-style-type: none"> - Maintien d'une forêt diversifiée pour réduire la compétition, améliorer la qualité du sol et 	Jactel et al. 2021; Bauhus et al. 2017; https://agriclimat.ca/wp-

	<p>ainsi maintenir la vigueur de l'érable à sucre. De plus, une forêt diversifiée permet d'augmenter le nombre d'ennemis naturels dans le peuplement favorisant ainsi un meilleur contrôle des insectes et maladies qui peuvent affecter l'érable à sucre</p> <ul style="list-style-type: none"> - Surveillance de votre boisé pour la présence d'insectes et maladies néfastes 	<p>content/uploads/2021/03/Fiche-acericulture Chaudiere-Appalaches.pdf</p>
Extrêmes climatiques (chaleur excessive l'été, redoux important l'hiver, gel tardif au printemps, gel hâtif à l'automne)	<ul style="list-style-type: none"> - Maintien d'une forêt diversifiée afin de réduire la compétition, améliorer la qualité du sol et ainsi maintenir la vigueur de l'érable à sucre 	<p>Bauhus et al. 2017; Olivier et al. 2016; Côté et Fyles, 1994a,b; Bélanger et al. 2004; https://agriclimat.ca/wp-content/uploads/2021/03/Fiche-acericulture Chaudiere-Appalaches.pdf</p>
Ver de terre		Bal et al. 2018
Verglas	<ul style="list-style-type: none"> - Amendement et éclaircie pour accélérer la récupération de l'érable 	Lautenschlager et al. 2003
Vents	<ul style="list-style-type: none"> - Maintien d'une forêt diversifiée afin d'avoir des arbres ayant différentes profondeurs d'enracinement 	Jactel et al. 2017; Bauhus et al. 2017
Broutage excessif	<ul style="list-style-type: none"> - Gestion des populations d'herbivores afin de réduire le broutage excessif 	Henry et al. 2021

▪ Le compartimentage suite à l'entaillage

Pour pouvoir extraire la sève du tronc d'un arbre, on insère des chalumeaux à l'intérieur d'entailles préalablement effectuées dans l'arbre à l'aide d'une mèche. Chaque entaille constitue une blessure à l'arbre qui provoque une infiltration d'air, mais elle représente également une porte d'entrée potentielle pour un agent pathogène. Ainsi, chaque fois qu'une entaille est réalisée, le mécanisme de compartimentage de l'arbre est activé pour encapsuler la blessure et limiter la propagation d'une maladie éventuelle à l'intérieur de son tronc. Par exemple, en réponse à une entaille d'environ 8 mm de diamètre et 5 cm de profondeur et si aucune maladie ne s'est introduite, l'arbre compartimente la blessure sur un volume d'en moyenne 50 fois le volume de l'entaille, mais ce volume peut varier de 20 à 200 fois selon les individus (van den Berg et al., 2016). La zone compartimentée se décolore et ne pourra plus servir à véhiculer de la sève le printemps ou l'été dans le futur. Le compartimentage peut fluctuer en fonction de la taille et du taux de croissance de l'arbre, mais également en fonction des pratiques d'entaillage, et en particulier du nombre d'entailles (voir section plus bas sur les techniques d'entaillage).

▪ Vitesse de cicatrisation, compartimentage et champignons de carie

En théorie, un érable dont la vitesse de fermeture des blessures (4e barrière du compartimentage) est plus lente a une probabilité plus élevée de se faire infecter par un champignon de carie, puisque les tissus mis à nu à la suite d'une blessure restent exposés à l'air (et donc aux spores de

pathogènes) plus longtemps. Le risque est aussi plus grand pour l'arbre lorsque la quantité d'entailles augmente (communications personnelles Louis Bernier et Danny Rioux).

Dans les faits, la vitesse avec laquelle l'arbre referme sa blessure n'est pas garante d'une réaction efficace en cas d'infection par un champignon (déterminée par le compartimentage interne des trois premières barrières). Quelques études montrent d'ailleurs que le développement de carie à l'intérieur de l'arbre est corrélé positivement à sa vitesse de croissance (Ngubeni et al., 2017; Edman et al., 2006; Lavallé, 1986), alors que la vitesse de croissance est elle-même corrélée positivement à la vitesse de fermeture des blessures (Neely 1988, Ngubeni et al., 2017). Autrement dit, chez une même espèce, les arbres à croissance lente ont tendance à investir plus dans le compartimentage interne (les trois premières barrières) et risquent de développer moins de carie que leurs homologues à croissance rapide, même s'ils referment plus lentement leurs blessures.

Cette relation n'a pas été testée chez les érables. Si elle était validée, nous pourrions croire que les volumes de carie suivant les blessures d'entaillage seraient moins grands chez les individus à croissance lente que chez les individus à croissance rapide. De plus amples études sont nécessaires pour tester cette hypothèse importante pour le développement d'un entaillage optimal pour l'érable.

De plus, l'étude de Ngubeni et al. (2017) montre que ces relations varient d'une espèce à l'autre et que ce ne sont pas toutes les espèces qui montrent cette plasticité. Il serait donc intéressant de (1) valider la présence de ce compromis entre croissance et défense chez les érables (2) comparer cette réponse entre l'érable rouge et l'érable à sucre.

Des résultats préliminaires chez l'érable à sucre montrent qu'il y a une grande variabilité dans les volumes de bois compartimentés à la suite de blessures d'entaillage, avec des valeurs allant de 20 à 200 fois la taille de l'entaille (Wilmot et al., 2007a, van den Berg et al., 2016, van den Berg, 2021). Il semble que cette espèce possède effectivement une variabilité dans son efficacité de compartimentage à la suite de l'entaillage, mais les facteurs sous-jacents à cette variabilité demeurent inconnus.

Quelques études sur des épinettes de Norvège affectées par un agent pathogène montrent que le processus de compartimentage peut être énergivore et qu'il peut alors impacter la croissance d'un arbre durant la formation de la zone compartimentée. Les auteurs ont observé une baisse de croissance qui se résorbe par la suite (Oliva et al., 2012, 2010). À l'opposé, les arbres affectés par le champignon, mais sans compartimentage, n'ont pas montré de ralentissement au niveau de leur croissance. Toutefois, des études similaires sur d'autres espèces, dont les érables, sont nécessaires pour statuer si le coût énergétique du compartimentage a un effet sur la croissance d'un érable à la suite d'une blessure d'entaillage.

4. Effets de l'entaillage répété sur la croissance et la vigueur des érables considérant la perte de tissu conducteur et la quantité de réserve prélevée

4.1. Effet de l'entaillage sur la croissance de l'érable

Les effets de l'entaillage sur la croissance des érables ont été peu étudiés et nous n'avons pu trouver que quatre publications scientifiques sur cette problématique pourtant très importante.

L'étude réalisée par Pothier (1996) n'a d'abord montré aucune différence significative entre des érables entaillés par tubulure et des érables non entaillés (arbres témoins) après vingt ans de suivi.

L'étude de Copenheaver et al. (2014) compare la croissance d'arbres entaillés (méthode de récolte par gravité) et d'arbres témoins dans trois sites (Pennsylvanie, New York et Ontario). Pour deux des sites (Pennsylvanie et Ontario), la croissance des arbres entaillés a diminué immédiatement suite à l'entaillage, mais elle s'est stabilisée par la suite pour être semblable à la croissance des arbres témoins. Cependant, d'autres facteurs ont également pu avoir une influence sur les résultats tels que la présence d'animaux dans un des sites entaillés qui aurait pu compacter le sol. De plus, les auteurs soulèvent que l'entaillage a été réalisé par des personnes sans expérience ce qui a pu induire un stress supplémentaire aux érables et ainsi influencer les résultats.

L'étude réalisée par Isselhardt et al. (2016) se base sur un site au Vermont et compare trois traitements (récolte sous vide, récolte par gravité et traitement témoin), en se basant sur 4 arbres par traitement. Les résultats montrent qu'une année après le traitement, les arbres témoins ont une croissance plus grande mais non significative par rapport aux arbres des deux traitements d'entaillage.

Finalement, l'étude la plus récente (Ouimet et al. 2021) compare la croissance de l'érable à sucre dans sept sites du sud du Québec entre des érables entaillés (récolte sous vide) et des érables témoins non entaillés. Un seul des sept sites montre des différences de croissance significatives entre les érables entaillés et ceux non entaillés et ce site était celui ayant la plus faible fertilité. Un biais possible de cette étude est que les données ont été récoltées dans des érablières de production qui ont possiblement été soumises à des pratiques d'entaillage et des aménagements différents, et non sur des sites expérimentaux contrôlés, ce qui peut avoir induit des différences entre les sites.

Des études sur cette problématique sont actuellement menées par la Dr. van den Berg au centre Proctor au Vermont (1 site suivi pendant 11 ans et 15 sites suivis depuis quelques années). Les résultats obtenus jusqu'à maintenant indiquent qu'il n'y a aucune différence significative de l'effet de l'entaillage (récolte par gravité ou récolte sous vide) sur la croissance des érables à sucre par rapport à des arbres témoins (van den Berg, 2021). Ces études sont particulièrement intéressantes puisqu'elles sont réalisées dans des érablières qui n'avaient jamais été entaillées et où les érables témoins sont distribués aléatoirement parmi les érables entaillés selon les deux méthodes. L'auteure mentionne toutefois qu'il est encore trop tôt pour se prononcer sur les résultats finaux. Ces études ont été conçues pour des suivis à long terme sur des horizons de temps similaires à ceux utilisés en acériculture (20 ans et plus). Il n'est donc pas exclu que les conclusions diffèrent avec le temps

4.2. Effet de l'entaillage sur la réduction du xylème conducteur

Les blessures causées par l'entaillage provoquent des embolies dans la zone du xylème qui entoure l'entaille (la zone compartimentée). Cette zone ne peut alors plus servir à transporter de ressources (c.-à-d. l'eau et les solutés pendant l'été). Au fil des années, le volume de xylème non fonctionnel s'accumule à l'intérieur de l'arbre avec l'ajout de nouvelles entailles, bien que l'apport d'un nouveau cerne annuel permette de renouveler graduellement les tissus conducteurs. Nous pourrions nous interroger à savoir si cette réduction de superficie conductrice impacte le

transport des ressources dans l'arbre et son fonctionnement à long terme. Il ne semble pas y avoir d'étude ayant directement testé cette question importante chez les érables.

Toutefois, une étude de Dietrich et al. (2018) réalisée sur le hêtre commun (*Fagus sylvatica*), une autre espèce à pores diffus (c.-à-d. caractérisée par une distribution relativement régulière des cellules qui conduisent l'eau, comme l'érable) apporte des précisions. Les auteurs ont induit chez quelques arbres matures une blessure mécanique couvrant 50 % du xylème, à une hauteur de 1,8 m, puis ils ont comparé le fonctionnement hydrique de ces arbres avec des arbres témoins. Notons que cette hauteur et cette superficie peuvent s'apparenter grossièrement à l'accumulation des blessures faites par entaillage chez l'érable. Leurs résultats montrent que les arbres blessés (i.e., les arbres privés de 50% de leur xylème) avaient un statut hydrique similaire aux témoins. Les vaisseaux adjacents à la blessure parvenaient à augmenter leur conductivité hydraulique de 200 % pour compenser les pertes via une augmentation du débit des liquides. Les auteurs concluent que les vaisseaux fonctionnent en dessous de leur capacité maximale dans un arbre sain, probablement pour réagir à ce genre de perturbations. Toutefois, une étude similaire réalisée sur des bouleaux (*Betula occidentalis*, autre espèce à pores diffus) parvient à des conclusions opposées (Sperry et al., 1993) : dans presque tous les cas, la réduction de la surface conductrice de 50 % s'accompagnait d'une hausse drastique de la cavitation et de la mortalité des feuilles pendant l'été. Notons toutefois que cette étude a été réalisée sur des arbres beaucoup plus petits, dont le diamètre n'est pas comparable aux érables entaillés.

Par conséquent, il reste difficile de trancher sur l'effet d'une réduction de la conductivité hydraulique sur le fonctionnement d'un érable mature. De plus, les blessures d'entaillage sont infligées à une période de l'année où l'arbre est sans feuille, contrairement aux études citées plus haut. Une experte consultée suggère que les érables pourraient ajuster leurs surfaces foliaires lors du débourrement suivant l'entaillage, en réponse à la réduction du xylème fonctionnel, ce qui contribuerait à limiter l'impact du compartimentage sur le statut hydrique de l'arbre (communications personnelles, Kate McCulloh). Cette hypothèse demeure toutefois à valider. Un autre expert mentionne que bien que les érables puissent compenser une baisse de conductivité hydraulique par une augmentation du débit d'eau, les vaisseaux possèdent une limite de vitesse qu'ils peuvent supporter et celle-ci pourrait être atteinte en période prolongée de temps sec et chaud (communications personnelles, Sebastian Pfautsch). Par conséquent, il est possible que les érables entaillés soient plus susceptibles aux conditions de sécheresse. Une hypothèse qu'il serait important de tester.

4.3. Effet de l'entaillage sur les réserves de l'arbre

Il est important de mentionner ici que l'eau que l'on récolte au printemps n'est pas de la sève brute ni de la sève élaborée, mais plutôt une sève printanière qui n'a pas de fonction directe sur la croissance de l'érable. La sève brute est l'eau qui est transportée des racines vers les feuilles via le xylème pendant la saison de croissance et qui fournit l'eau et les éléments nutritifs nécessaires à la photosynthèse qui se fait dans les feuilles. La sève élaborée est l'eau contenant les produits de la photosynthèse qui est transportée des feuilles vers le reste de l'arbre, distribuant ainsi les sucres et autres éléments nécessaires à la croissance et au maintien des différentes parties de l'arbre.

▪ Introduction sur les sucres

L'eau d'érable contient des sucres solubles issus de l'arbre. Ces sucres peuvent se dissoudre dans l'eau et se déplacer dans la plante via les mouvements de l'eau. L'arbre possède aussi de l'amidon, une forme de glucides immobiles agissant à titre de réserves. L'amidon peut être converti en sucres solubles et vice versa selon les besoins des différents organes de l'arbre. Les transferts d'une forme à l'autre sont d'ailleurs souvent corrélés chez l'érable (Wong et al., 2003), la quantité d'amidon diminuant généralement lorsque celle des sucres solubles augmente. Nous pensons que cette dynamique est particulièrement importante au printemps et pourrait ainsi expliquer la composition sucrée de l'eau d'érable récoltée durant cette saison. Ensemble, les sucres solubles et l'amidon forment un large bassin de glucides non structuraux qui sert à de multiples fonctions pour le bon fonctionnement de l'arbre.

▪ Rôles des sucres solubles

Les sucres solubles remplissent des fonctions immédiates en plus de soutenir la croissance, la respiration et les défenses des arbres (Martínez-Vilalta et al., 2016). Les fortes concentrations de sucres solubles sont aussi impliquées dans la réponse à de multiples stress : le froid (Tomasella et al., 2020; Wong et al., 2009; Morin et al., 2007), le manque de lumière (Wiley et al., 2017), la sécheresse (Tomasella et al., 2020; O'Brien et al., 2014; Rosas et al., 2013; Wong et al., 2009) et la défoliation (Rosas et al., 2013). Les conclusions de ces études sont cohérentes : de plus hauts niveaux de sucres solubles durant l'exposition à un stress permettent de meilleurs rétablissements post-perturbation, et ce, chez plusieurs espèces d'arbres.

Au printemps, le rôle des sucres solubles dans l'eau d'érable est plus nébuleux. Un lien direct avec la croissance printanière n'est pas établi, comme nous le verrons dans les sections suivantes. Il est possible qu'il s'agisse d'une phase transitoire dans laquelle les sucres solubles utilisés durant l'hiver pour la tolérance au froid (Kasuga et al., 2007, Wong et al., 2003) seraient reconvertis en amidon pour des besoins futurs. Cette hypothèse est cohérente avec des variations en glucides non structuraux observées dans le tronc d'arbres feuillus à cette période de l'année (Martínez-Vilalta et al., 2016), mais ceci demande à être validée expérimentalement pour l'érable.

▪ Bassin de glucides non structuraux

Le bassin des glucides non structuraux dans l'arbre est très grand. Chez les feuillus, certains auteurs estiment que les réserves sont suffisantes pour remplacer la canopée complète d'un arbre plusieurs fois (Hoch et al., 2003; Würth et al., 2005). Par conséquent, il est très peu probable que nous les épuisions par le prélèvement d'eau d'érable au printemps.

Toutefois, la relation entre la diminution des glucides non structuraux dans différents organes et le risque de mortalité reste mal comprise. Chez les conifères, des seuils entre 30 et 48 % du maximum saisonnier ont été identifiés comme étant critiques (voir références individuelles dans Martínez-Vilalta et al., 2016), mais les seuils critiques chez les arbres feuillus matures demeurent méconnus.

De plus, nous ne connaissons pas la taille totale du bassin de glucides non structuraux au printemps chez les érables matures. Ouimet et al. (2021) ont réalisé une estimation du pourcentage de sucres prélevé par les activités acéricoles en se basant sur la biomasse annuelle

de l'arbre, qui est par ailleurs constituée de glucides structuraux incorporés aux tissus plus tard dans la saison. Une estimation plus juste de la quantité de sucres retirés par les activités acéricoles devrait plutôt se baser sur le bassin duquel ils sont retirés, soit les glucides non structuraux disponibles au printemps. Cette donnée est pourtant absente de la littérature (Isselhardt et al., 2016).

En se basant sur la littérature scientifique actuelle, il n'est donc pas encore possible de statuer sur un pourcentage d'extraction qui représenterait un seuil à ne pas franchir chez l'érable, (1) par manque de connaissance sur les seuils biologiques de cette espèce et (2) par manque d'une estimation fiable du pourcentage de sucres solubles récoltés au printemps.

De plus, la littérature montre que les arbres meurent ou subissent des baisses de croissance avant d'avoir épuisé leurs réserves en glucides de causes indirectes comme l'exposition au froid (Körner, 2003), la disponibilité en nutriments (Kobe et al., 2010) ou un dysfonctionnement hydraulique (Wiley et al., 2017). Par conséquent, il semble peu probable que la diminution de croissance parfois observée chez les érables entaillés (Ouimet et al., 2021; Isselhardt et al., 2016; Copenheaver et al., 2014) soit directement liée à une baisse drastique des réserves. Ce constat ressort également des échanges avec les différents experts que nous avons consultés (communications personnelles, Günter Hoch, Simon M Landhäusser, Christian Körner). Il semble plus plausible que cette diminution de croissance, si elle a lieu, soit associée à un problème de remobilisation des ressources ou à une réponse générale face à une accumulation de stress plutôt qu'à un épuisement direct des réserves.

▪ Remobilisation des ressources

La littérature montre que le débourrement et la croissance printanière des arbres ne sont pas limités par la quantité de glucides de l'arbres (Millard & Grelet, 2010). Le développement des jeunes pousses chez les espèces décidues ne semble pas dépendre du transport sur de longues distances des sucres solubles (Landhäusser, 2011; Keel & Schädel, 2010). De plus, les espèces décidues n'ont pas nécessairement des variations en glucides non structuraux plus élevées au printemps que celles des conifères, malgré une production massive de feuilles (Hoch et al., 2003; Richardson et al., 2013).

À l'opposé, les études ont montré un lien direct entre les quantités d'azote remobilisées par les arbres et la croissance au printemps (voir références individuelles dans Millard & Grelet, 2010). Les produits azotés sont présents en très faibles quantités dans l'eau d'érable et leurs concentrations augmentent en fin de saison acéricole (Dumont 1994). Les données sur la quantité totale d'azote remobilisée au printemps dans les arbres matures sont rares (Millard & Grelet, 2010). Il est donc difficile d'évaluer si la quantité prélevée par les activités acéricoles est suffisante pour impacter le débourrement et la croissance printanière des érables.

▪ Accumulation de stress

Il a été observé que les arbres dont l'apport en carbone est restreint peuvent prioriser le stockage plutôt que de le diminuer, probablement en vue de pallier une perturbation subséquente (Dietze et al., 2014; Granda & Camarero, 2017). Ainsi, les arbres peuvent favoriser les réserves au détriment de la croissance lorsque les nutriments (azote) sont limités et en réponse active à un stress (Kobe et al., 2010).

La dynamique des glucides non structuraux est par ailleurs complexe, puisque les arbres peuvent mobiliser à la fois des glucides récents et anciens. Des études chez l'érable rouge montrent que les sucres solubles utilisés pour la croissance sont préférablement récents (dérivés de la saison de croissance précédente ou actuelle), mais que l'arbre peut aussi mobiliser des sucres plus vieux au besoin (Carbone et al., 2013; Richardson et al., 2013). Les érables rouges stressés ont tendance à mobiliser des sucres plus vieux, alors que les individus vigoureux utilisent plutôt des sucres récents (Carbone et al., 2013). Toutefois, les mécanismes au niveau physiologique et moléculaire qui déclenchent le stockage versus l'utilisation de ces réserves restent flous (Dietze et al., 2014).

Ces résultats permettent d'émettre des hypothèses quant aux réponses des érables entaillés faces aux stress :

- *Hypothèse 1* : Les érables entaillés priorisent le stockage au détriment de la croissance avec l'ajout d'une blessure d'entaillage et l'extraction de l'eau d'érable s'ils sont déjà soumis à des conditions stressantes (ex. défoliation, verglas, sécheresse).
- *Hypothèse 2* : Les érables vigoureux possèdent un bassin de glucides non structuraux assez large pour mobiliser majoritairement des sucres solubles récents. Ainsi, il est possible que ces arbres soient moins propices à subir une baisse de croissance suivant l'entaillage par rapport à des arbres moins vigoureux qui puisent dans des réserves plus anciennes.

Somme toute, les connaissances actuelles restent limitées pour se prononcer sur ces hypothèses.

5. Évaluation de l'effet des techniques d'entaillage, du matériel et des équipements utilisés

5.1. Profondeur d'entaille et diamètre des chalumeaux

Comme expliqué précédemment, l'entaillage cause des dommages au tronc et engendre le compartimentage du bois autour de l'entaille. Selon van den Berg et al. (2016) et Renaud (1998), le volume de bois compartimenté est proportionnel à la profondeur et au diamètre du trou de l'entaille. Le volume de bois décoloré (compartimenté) est en moyenne de 50 fois le volume de l'entaille (avec une variation allant de 20 à 200 fois) et le volume de bois non conducteur (bois décoloré ou pas mais compartimenté) est 1,5 fois plus grand que le volume de bois décoloré (van den Berg et al., 2016). Selon van den Berg (2021), cette grande variabilité au niveau du volume de bois décoloré entre entailles nous force donc à être très prudent au niveau des critères de distance entre entailles. Selon Wilmot et al. (2007a), le fait d'utiliser une entaille de 7,54 ou 7,93 mm de diamètre (chalumeaux 19/64" ou 5/16") plutôt que 11,11 mm (7/16") réduirait le volume de bois décoloré d'environ 40 %. L'utilisation de chalumeaux plus petits favorise aussi la fermeture plus rapide de l'entaille, réduisant ainsi le risque de contamination par des pathogènes (Allard et al., 1998).

Perkins et al. (2021) ont montré que le volume de sirop produit augmente proportionnellement avec la profondeur de l'entaille, mais qu'un plateau est atteint à partir de 45 à 50 mm de profondeur (incluant l'écorce). Ce résultat demande à être confirmé par d'autres études, mais il suggère qu'il est inutile d'entailler plus profondément.

En ce qui concerne le diamètre du chalumeau, il a été démontré que l'utilisation d'un chalumeau de 7,93 mm (5/16") au lieu de 11,11 mm (7/16") n'a pas d'effet significatif sur le volume récolté avec un système sous vide de 15 poHg (Wilmot et al., 2007a). En revanche, l'utilisation d'une entaille encore plus petite (6,35 mm ou 1/4") causerait une réduction du volume de sève d'environ 11 % comparativement à une entaille de 7,54 mm (19/64"), avec un vide de 28 poHg (Lagacé et al., 2015). Encore une fois, ces résultats doivent être confirmés par d'autres études afin de les valider.

5.2. Systèmes sous vide

Les premiers systèmes de collecte d'eau d'érable sous vide datent des années 1970 (Allard 1987). Ils ont maintenant remplacé les chaudières dans la quasi-totalité des exploitations acéricoles en raison de l'augmentation significative du volume de sève récolté. Une récolte sous vide « classique » (20 poHg) permet de multiplier le volume d'eau récolté par entaille par deux ou trois par rapport à un système traditionnel à la chaudière; cette augmentation étant en fait proportionnelle au niveau de vide utilisé (Wilmot et al., 2007b; Allard 1987). Il y a quelques années, des systèmes encore plus performants, dits à haut vide (25 poHg et plus) ont fait leur apparition sur le marché et permettent d'augmenter encore plus le volume d'eau récolté (+ 38 % avec 28 poHg par rapport à 20 poHg, soit 163 litres contre 118 litres, respectivement; Lagacé et al., 2019). Dans l'étude de Wilmot et al. (2007b) cité précédemment, le volume d'eau d'érable récolté est d'environ 80 litres sous 25 poHg contre environ 25 litres avec un système gravitaire (chaudière).

La concentration en solutés (sucres, minéraux, acides organiques) présents dans l'eau récoltée ne serait pas influencée par le niveau de vide (Lagacé et al. 2019; Wilmot et al. 2007b). Cela signifie donc que plus le niveau de vide est élevé, plus la quantité de sucres prélevée sera importante. Les résultats préliminaires de Ouimet (2021) indiquent que cette récolte supplémentaire de sucre prélevée par les systèmes à haut vide n'influence pas la croissance des arbres par rapport à un système classique (< 25 poHg) pendant les trois années qui suivent l'entaillage.

Finalement, contrairement à certaines idées reçues, le volume de la zone décolorée ne semble pas plus important pour les entailles sous vide (de 15 à 25 poHg) que pour des arbres récoltés à la chaudière (Wilmot et al. 2007b). Mais encore ici, d'autres études devraient être faites pour valider ce résultat.

Selon Boutin (2019) et des communications personnelles (Stéphane Corriveau, technicien au centre ACER et Vincent Pepin, président de Dominion & Grimm Inc.), la clé pour avoir un rendement optimal avec un système sous vide est de ne pas avoir de fuite sur l'ensemble du système, de l'entaille jusqu'à la station de pompage. De telles fuites semblent être la principale faiblesse des systèmes à haut vide qui sont à la fois plus difficiles à maintenir étanches et plus sensibles aux fuites. Par un principe physique, l'air qui entre par une petite fuite dans un système sous vide va refroidir, et cela d'autant plus que le vide est important. À 28 poHg, l'air qui rentre par une fuite refroidit de 4 °C, alors qu'il refroidira de seulement 1°C sous 23 poHg (Boutin, 2019). Selon les conditions météorologiques, cela pourra causer un gel de l'eau présente dans la tubulure et faire perdre une partie de la récolte.

5.3. Effets des méthodes d'entaillages sur la durabilité de la production acéricole

Selon des simulations réalisées par Grenier et al. (2008a, b), les normes d'entaillage actuelles au Québec peuvent avoir un effet négatif sur la durabilité de l'entaillage à long terme, tout particulièrement pour les arbres de petits diamètres et à croissance faible. Si on prend l'exemple d'un érable avec un diamètre initial de 20 cm à 1,3 m de hauteur (diamètre à hauteur de poitrine ou DHP) et une croissance radiale de 1 mm/an, le fait de faire des entailles de 7,93 mm de diamètre (5/16") à 50 mm de profond sur un seul niveau permet d'entailler cet arbre de manière continue pendant 34 ans seulement. Et même si la croissance radiale est de 2 mm/an (ce qui est rare au Québec), il sera possible d'entailler l'arbre pendant 46 ans. Après cela, il faudra attendre que la couche de bois sain au-dessus des vieilles entailles devienne suffisamment épaisse pour permettre d'entailler à nouveau. De plus, ce modèle n'est valable que si le tronc est parfait (sans blessures) au niveau de la zone d'entaillage et que la répartition des entailles autour du tronc est faite de façon systématique chaque année. Ces études montrent clairement qu'il faut absolument répartir l'entaillage sur plusieurs niveaux au-dessus et en-dessous du latéral afin d'assurer un entaillage durable des érables.

Pelletier (2020) a repris plus ou moins la même méthode (ex. simulations) que Grenier et al. (2008a, b) pour simuler la durabilité de l'entaillage à long terme, mais en modulant différents paramètres (ex. diamètre et profondeur de l'entaille, entaillage sur plusieurs niveaux, longueur de la zone d'entaillage). Selon les simulations testées, l'entaillage d'arbres de petit diamètre (20 cm) avec l'ajout d'une seconde entaille lorsque le DHP atteint 40 cm, ne compromet pas la capacité future d'entaillage lorsque l'entaillage se fait sur plusieurs niveaux au-dessus et en-dessous du latéral avec une longueur moyenne de chute de 100 cm et selon les conditions de croissance et d'entaillage suivantes :

- La croissance radiale est rapide (2 mm/an et plus) : chalumeaux de 7,93 mm de diamètre (5/16") et profondeur maximale d'entaille de 50 mm.
- La croissance radiale est moyenne (1 mm/an) : chalumeaux de 6,35 mm de diamètre (1/4") et profondeur maximale d'entaille de 50 mm.
- La croissance radiale est faible (entre 0,5 et 1 mm/an) : chalumeaux de 6,35 mm de diamètre (1/4") et profondeur maximale d'entaille de 25 mm.

Selon Grenier et al. (2008a, b), les régions au Québec où la croissance radiale des érables est rapide (2 mm/an et plus) sont extrêmement rares au Québec. Conséquemment, la première simulation ne s'applique pas à l'ensemble de la province. Pour les deux autres cas (croissance autour de 1 mm/an et entre 0,5 et 1 mm/an), l'utilisation de chalumeaux de petit diamètre (6,35 mm ou 1/4") et/ou des profondeurs d'entaille réduite à 25 mm permettraient théoriquement d'entailler des érables de 20 cm diamètre, mais cela aura vraisemblablement des effets négatifs sur le rendement en eau d'érable prélevé (Perkins et al., 2021; Lagacé et al., 2015). Des études économiques devraient donc être faites pour évaluer la rentabilité de telles recommandations. Finalement, cette étude a montré que pour une croissance radiale des érables de 1,25 mm/an, l'entaillage d'arbres de 19,1 cm (en y ajoutant une seconde, une troisième et une quatrième entaille lorsque le DHP atteint 39,1, 59,1 et 79,1 cm, resp.) avec des chalumeaux de 7,93 mm de diamètre (5/16") et des profondeurs d'entaillage de 50 mm n'était pas durable (c.-à-d. que la croissance de bois sain au-dessus de la plus vieille entaille n'atteint pas les 50 mm nécessaires pour faire une nouvelle entaille).

Il faut rappeler que les analyses de Pelletier (2020) sont des simulations qui assument que l'arbre est un cylindre parfait, que l'entaillage se fait de façon parfaitement symétrique tout autour de l'arbre, que l'entaillage se fait de part et d'autre du latéral avec une longueur moyenne accessible par la chute de 100 cm, que l'entaillage répété sur ces petits arbres n'affecte pas leur croissance et que le tronc est sain et exempt de blessures, caries ou autres imperfections. Cependant, Pelletier (2020) assume une perte de 2% autour de l'entaille à cause de la carie. De plus, ces analyses utilisent une marge verticale de 60 cm (soit 30 cm au-dessus ou en dessous d'une ancienne entaille) pour estimer l'effet de l'entaille sur la zone de compartimentage et qu'une telle marge n'a fait l'objet que de très peu d'études (voir section sur les besoins de recherche). Selon van den Berg et al. (2016) et van den Berg (2021), il existerait une très grande variabilité de l'amplitude de cette zone de compartimentage pour les érables, ce qui augmenterait les risques de frapper des zones compartimentées si on utilise des marges trop petites.

Selon Pelletier (2020), entailler des érables avec un DHP de 23,1 cm (et y ajouter une seconde entaille lorsque le DHP atteint 40 cm), des chalumeaux de 7,93 mm (5/16") et des profondeurs d'entaillage de 50 mm pourrait également compromettre la durabilité de l'entaillage à long terme à moins que la croissance radiale soit plus élevée que 1 mm/an (le résultat pour une croissance de 1 mm/an était à la limite de la durabilité) et que l'entaillage se fasse à plusieurs niveaux au-dessus et au-dessous de la ligne latérale avec une longueur de chute moyenne de 100 cm.

Encore une fois, il faut rappeler que les résultats de Grenier (2008a, b) et Pelletier (2020) proviennent de simulations théoriques qui considèrent le tronc comme un cylindre parfait, sans blessures ni défauts. De plus, dans ces simulations, la distance entre deux entailles est réduite (4 à 5 cm horizontalement dans le modèle de Pelletier) et se fait de façon à optimiser l'utilisation du bois sain présent dans l'arbre (cela se fait par le modèle). Dans des conditions réelles, avoir des entailles aussi rapprochées les unes des autres sans savoir exactement où se trouvent les anciennes entailles qui sont complètement recouvertes de nouveau bois présente un risque important de frapper du bois déjà compartimenté et de se fusionner avec d'autres zones compartimentées, ce qui diminuerait la récolte d'eau d'érable.

Les modèles développés par Grenier (2008a, b) et Pelletier (2020) se basent tous les deux sur la capacité à entailler dans du bois sain, donc sur la condition qu'au moment de revenir sur une entaille, l'épaisseur du nouveau bois est supérieure à la profondeur d'entaillage. Une autre méthode, développée par van den Berg et al. (2016), se base quant à elle sur la probabilité d'entailler dans du bois compartimenté si le choix de l'entaille se fait au hasard. Selon leur modèle, le volume de bois compartimenté ne devrait pas dépasser 10 % du xylème (donc 90 % du bois conducteur est sain) de la zone d'entaillage pour que la pratique soit considérée durable à long terme. Selon les simulations faites par van den Berg et al. (2016), pour une entaille de 7,93 mm de diamètre (5/16") et 50,8 mm de profondeur et une chute de 76 cm, l'accroissement radial minimal nécessaire pour maintenir au moins 90 % de bois sain en tout temps est de 1,27 mm/an pour un arbre avec un DHP de 20,3 cm. Pour un arbre de 25,4 cm de DHP, l'accroissement minimal passe à 1 mm/an. En diminuant la profondeur de l'entaille à 38,1 mm et en augmentant la longueur de chute à 91 cm, l'accroissement radial minimal devient 0,76 mm/an pour un arbre avec un DHP de 20,3 cm. Dans leur modèle, l'entaillage est considéré comme « aléatoire » dans la zone accessible par la chute au-dessus de la ligne latérale. Ils ne considèrent pas la répartition spatiale des entailles qui devraient être espacées des entailles précédentes. Cet espacement horizontalement est de 5 cm selon les simulations faites par Pelletier (2020) et de 10 cm selon les recommandations de Chapeskie et al. (2006). Plus d'études sont nécessaires pour déterminer la marge à utiliser selon les conditions d'entaillage et de croissance de l'érable, mais considérant

que le volume de bois compartimenté causé par l'entaillage est très variable (van der Berg et al., 2016), il serait prudent d'utiliser une marge d'au moins 10 cm telle que proposée par Chapeskie et al. (2006).

Cette approche proposée par van den Berg et al. (2016) vise à minimiser les risques d'entailler dans du bois compartimenté lorsque les entailles ne sont pas faites de façon systématique, mais basées sur l'expérience de l'entailleur et la visibilité pendant quelques années des vieilles entailles. Cette méthode nous semble très conservatrice selon les simulations faites par Pelletier (2020), car le seuil de 90 % n'a jamais été atteint même dans les exemples où l'entaillage était considéré durable. Cependant, nous n'avons pas pu évaluer les calculs utilisés par van den Berg et al. (2016) et Pelletier (2020) et il nous est donc impossible de savoir laquelle de ces deux méthodes est la plus exacte ou appropriée pour les conditions du Québec.

Nous n'avons pas pu trouver de chiffres précis sur la croissance moyenne des érables au Québec, mais il est clair que cette croissance est moindre que dans plusieurs régions et états limitrophes où il se fait de la production de sirop d'érable. En utilisant les valeurs ajustées des croissances radiales annuelles pondérées (mm) de l'érable à sucre par sous-régions écologiques reportées au tableau 1 du rapport de Pelletier (2020) tiré d'études faites par Grenier 2008a, on arrive à une moyenne de 1,34 mm/an pour le Québec. Cette estimation est très imparfaite et ne prend surtout pas en compte la très grande variabilité de la croissance radiale des érables à sucre au Québec en fonction de leur taille, leur vigueur, leur région et de la fertilité du sol dans lequel ils poussent.

5.4. L'entaillage sur plusieurs niveaux

Les études de van den Berg et al. (2016) et Pelletier (2020) évoquent toutes deux la possibilité d'entailler au-dessus et au-dessous de la ligne latérale, ce qui correspond à entailler dans une grande zone du tronc de l'érable en fonction de la longueur de la chute disponible. Stéphane Guay du site de vulgarisation « erable-chalumeaux.ca » recommande quant à lui un modèle systématique avec des entailles espacées de 5 cm horizontalement et 40 cm verticalement où les entailles sont distribuées sur trois niveaux.

Un plan d'entaillage sur plusieurs niveaux qui exploite une grande zone du tronc de l'érable de chaque côté de la ligne latérale semble nécessaire pour assurer la durabilité de la pratique, particulièrement dans le cas d'arbres à croissance faible ou moyenne. Cependant, il est important de laisser une distance verticale et horizontale suffisante entre chaque entaille en raison de la formation de bois compartimenté de part et d'autre de l'entaille (Chapeskie et al., 2006). Le bois compartimenté n'étant pas conducteur, entailler dans cette zone fait perdre une grande partie de la récolte (van den Berg, 2021). La longueur de la zone compartimentée non conductrice est très variable d'un arbre à l'autre; elle peut aller de 20 à 50 cm de part et d'autre de l'entaille dans un plan vertical (Conseil des productions végétales du Québec. Comité d'acériculture 1984; Houston et al., 1990). Elle va aussi dépendre de la taille (diamètre et profondeur) de l'entaille (Renaud, 1998; van den Berg et al., 2016). Encore une fois, il faut rappeler que le volume de la zone compartimentée causé par l'entaille est très variable (allant de 20 à 200 fois le volume de l'entaille) selon van den Berg et al. (2016) et van den Berg (2021), et qu'il faut donc être très prudent avec les mesures de décalage horizontal et vertical entre entailles que l'on utilise sur le terrain et dans nos simulations.

Selon une communication personnelle d'Abby van den Berg (professeure de recherche associée au Proctor Maple Research Center), il est très fortement déconseillé d'entailler au-dessus ou en-

dessous d'une entaille récente à moins d'utiliser une distance très conservatrice entre les entailles, puisque la zone compartimentée est très variable, comme nous l'avons vu au paragraphe précédent. Cela va dans le sens d'autres recommandations comme celles de Chapeskie et al. (2006) pour qui toutes nouvelles entailles devraient se situer à la fois à 10 cm horizontalement et 15 cm verticalement de toutes entailles précédentes pour éviter d'entailler dans du bois compartimenté et non conducteur. Le fait d'entailler dans du bois compartimenté causerait une diminution de la récolte et finalement une perte financière pour l'acériculteur.

Il serait donc intéressant de refaire les simulations de Grenier ou de Pelletier en utilisant l'approche proposée par Chapeskie et al. (2006), soit d'espacer les entailles d'au moins 10 cm de chaque côté et 15 cm verticalement, afin d'évaluer la durabilité de cette approche en fonction du diamètre de premier entaillage et de la croissance des arbres.

En l'absence d'études plus approfondies, la méthode d'entaillage sur 3 niveaux proposée par Stéphane Guay (<https://www.erable-chalumeaux.ca/>) avec seulement 40 cm verticalement espacées de 5 cm horizontalement entre deux entailles (cela équivaut à une longueur de la zone compartimentée anticipée de 20 cm de part et d'autre de l'entaille, ce qui constitue le minimum reporté dans la littérature concernant la distance de la zone compartimentée) nous semble risquée. Cependant, l'entaillage sur plusieurs niveaux au-dessus et en dessous de la ligne latérale avec un certain décalage horizontal (au moins 10 cm selon Chapeskie (2006)) nous semble une pratique intéressante si la longueur de la chute (env. 75 à 90 cm selon van den Berg et al., 2016) et la croissance radiale sont suffisantes. Il est cependant clair qu'il faut faire plus d'études sur cette problématique afin de déterminer des distances horizontales et verticales optimales entre entailles en fonction de la croissance et des conditions environnementales dans lequel l'érable croît. Il convient de noter que le fait d'entailler sous cette ligne latérale ne semble pas avoir d'incidence sur le volume de sève récoltée avec les systèmes de récolte modernes (van den Berg, 2021).

Les différences de longueur de bois compartimenté entre les rapports les plus anciens et les publications récentes pourraient s'expliquer par les changements dans les pratiques. Dans les années 1990, les chalumeaux les plus courants étaient de 11,11 mm (7/16") avec des entailles profondes (63 mm) alors qu'actuellement les chalumeaux les plus courants sont de 7,93 mm de diamètre (5/16") avec généralement des entailles moins profondes, puisque comme l'ont montré van den Berg et al. (2016), le volume de bois compartimenté est proportionnel au volume de l'entaille. Il nous semble donc important de mieux étudier les facteurs techniques et biologiques qui affectent l'amplitude de la zone compartimentée suite à l'entaillage.

6. Constatations et recommandations

6.1. Au niveau du peuplement et en fonction des changements globaux

- Les changements climatiques et l'augmentation des menaces biotiques telles que les insectes et maladies exotiques (que l'on nomme changements globaux) constituent un risque pour la santé et la vigueur des érables et des érablières. De plus, dans certaines régions et sur certains sites, la quantité de broutage par le chevreuil, l'acidité du sol et la compétition par certaines espèces de fougères menacent la régénération de l'érable à sucre et donc la survie à long terme de cette espèce dans les érablières.

- Pour favoriser une bonne régénération d'érable à sucre, on peut donc agir au niveau du sol (amendement), sur la compétition et/ou assurer une saine gestion des populations de chevreuils dans certaines régions afin de ne pas compromettre la régénération de nos érablières.
- Comme il est impossible d'agir localement pour contrer les changements climatiques et les menaces biotiques, il faut donc agir localement pour augmenter la vigueur et la résilience de nos érablières face à ces menaces (voir tableau 2 pour des recommandations).
- Sur les sols pauvres et acides, il est possible d'amender les sols pour améliorer les conditions nutritives du sol et ainsi assurer une meilleure régénération et vigueur de l'érable, ce qui devrait l'aider à mieux supporter les stress climatiques et biotiques. Le maintien et/ou l'ajout d'espèces compagnes de genres et de groupes fonctionnels différents à l'érable qui améliorent la qualité du sol comme le tilleul, le noyer cendré, les bouleaux et les peupliers sont aussi des approches à privilégier sur ces sites pauvres.
- Sur tous les sites, le maintien d'une proportion minimale d'espèces compagnes de genres et groupes fonctionnels différents à l'érable est aussi à privilégier afin de favoriser la diversité et complexité de l'écosystème forestier et ainsi améliorer la résilience globale de l'érablière face à la majorité des menaces biotiques et climatiques.
- Le niveau d'espèces compagnes minimales nécessaire dans les érablières exploitées pour leur sève n'est pas connu, mais nous suggérons qu'il devrait être d'au moins 20% pour permettre de bénéficier au maximum de l'effet de complémentarité et autres effets bénéfiques qu'une forêt plus diversifiée apporte.
- Les espèces compagnes à privilégier sont celles qui sont bien adaptées aux conditions du site et qui présentent des caractéristiques biologiques et écologiques différentes de celles de l'érable. Des espèces comme les conifères tolérants à la sécheresse, des feuillus tolérants à la sécheresse et des feuillus ayant une litière qui enrichit le sol devraient être priorisées. L'approche des traits et groupes fonctionnels afin de choisir les espèces compagnes les plus appropriées (Messier et Maure, 2021; Paquette et al., 2021 et Aquilué et al., 2021) pourrait être utilisée afin d'augmenter la résilience des érablières face aux changements globaux.
- L'érable rouge ne peut pas être la seule ou même la principale espèce compagne à l'érable à sucre puisque :
 - Il est du même genre que l'érable à sucre et donc vulnérable globalement aux mêmes insectes et maladies,
 - Il possède plusieurs attributs biologiques semblables à l'érable à sucre ce qui le rend susceptible aux mêmes perturbations que celui-ci,
 - Sa litière a les mêmes effets acidifiants que l'érable à sucre.

6.2. Au niveau de l'entaillage et du maintien de la vitalité de l'érable

- Afin de réduire le volume de bois compartimenté, sans pour autant réduire le volume d'eau d'érable recueilli lors de l'entaillage, les quelques études disponibles indiquent qu'il est

préférable de ne pas dépasser 7,5 à 8 mm de diamètre (chalumeaux de 19/64" ou 5/16") et 45 à 50 mm de profondeur d'entaillage (incluant l'écorce).

- L'entaillage sur plusieurs niveaux au-dessus et en-dessous de la ligne latérale est essentiel afin de mieux répartir l'effet de l'entaillage sur le compartimentage de l'aubier et ainsi assurer la durabilité de l'entaillage à long-terme. Une longueur de chute d'au moins 75 cm nous apparaît désirable afin de pouvoir bien répartir la zone d'entaillage (van den Berg et al., 2016). Cependant, il est important d'effectuer d'autres études afin de mieux déterminer la distance verticale et le décalage horizontal minimaux à utiliser entre deux entailles afin d'éviter les vieilles zones de compartimentage et aussi de vérifier si ce type d'entaillage n'affecte pas la capacité de croissance globale de l'érable, particulièrement au niveau de la perte potentielle de conductivité de l'aubier.
- Des chalumeaux plus petits (6,35 mm ou 1/4") et/ou des profondeurs d'entaillage moins profondes de 25 à 30 mm (on recommande 25 à 30 mm basé sur la simulation faite par Pelletier (2020), faute d'autres données disponibles) devraient être favorisés pour des arbres entre 23,1 et 31 cm de diamètre à 1,3 m de hauteur en bonne santé (voir définition d'un érable en bonne santé à la section 2.3) ayant des croissances de moins de 1,25 mm/an et pour des érables ayant une croissance de plus de 1,25 mm/an présentant des défauts et blessures importantes et/ou un dépérissement important (arbre en mauvaise santé) (voir tableau 3). Pour ces arbres, il serait aussi possible d'utiliser des chalumeaux de 5/16" et des profondeurs d'entaillage de 45-50 mm en utilisant un diamètre minimal de 31 cm au lieu de 23,1 cm (voir tableau 3). On recommande aussi l'utilisation de plus petits chalumeaux, des profondeurs d'entaillage moins profondes et un diamètre minimal de 31 cm pour des arbres en mauvaise santé ayant une croissance de moins de 1,25 mm/an et pour des arbres en bonne ou mauvaise santé ayant une croissance radiale très faible (moins de 0,5 mm/an) (voir tableau 3), bien que les études indiquent que la quantité d'eau recueillie serait moindre. Pour tous ces arbres, il serait peut-être possible d'utiliser des chalumeaux de 5/16", des profondeurs d'entaillage de 45-50 mm et entailler les arbres dès qu'ils atteignent 23,1 cm *en entaillant ces arbres 2 années sur 3 ou encore 1 année sur 2, selon les conditions de croissance et de santé de l'érable*. Ce scénario devrait-être évalué à l'aide du modèle développé par Pelletier (2020). Des aménagements sylvicoles et amendements des sols peuvent aussi être envisagés afin d'augmenter la croissance radiale des érables.
- Les quelques résultats publiés sur l'effet de l'entaillage sur la croissance radiale de l'érable semblent indiquer qu'il n'y a pas ou peu d'effets négatifs de l'entaillage sur la croissance, particulièrement sur les sites les plus riches.
- Selon les études scientifiques consultées et l'opinion d'experts internationaux dans le domaine de l'écophysiologie de l'arbre (voir la liste à l'annexe 1), le prélèvement de sucre annuellement par la récolte d'eau d'érable et la perte de surface de l'aubier occasionnée par l'accumulation des zones de compartimentage causée par l'entaillage ne devraient pas affecter négativement la croissance de l'érable dans les cas où les arbres sont en bonne santé et qu'ils ne sont pas soumis à des conditions aggravantes comme des stress de sécheresse, des défoliations ou des limitations en nutriments.

Tableau 3. Sommaire des principales recommandations proposées dans ce rapport pour un entaillage durable des érables au Québec.

Pour les conditions autres que celles où la croissance radiale de l'érable est optimale et la santé globale de l'arbre est bonne (en italique et gras dans le tableau), il serait peut-être possible d'utiliser des chalumeaux de 5/16", des profondeurs d'entaillage de 45-50 mm et entailler les arbres dès qu'ils atteignent 23,1 cm **en entaillant ces arbres 1 année sur 2 ou encore 2 années sur 3** selon les conditions de croissance et de santé de l'érable. Dans les cas où la croissance radiale des érables est optimale et l'arbre en mauvaise santé et où la croissance radiale est sous-optimale et l'érable en bonne santé, des chalumeaux de 5/16" et des profondeurs d'entaillage de 45-50 mm pourraient être utilisés lorsque l'arbre atteint 31 cm.

Il n'existe pas de critères absolus pour définir la santé globale d'un érable, mais certains critères généraux sont présentés à la section 2.3 de ce rapport. Selon Timothy Perkins (communication personnelle), le bon jugement et l'expérience du producteur sont aussi très importants afin d'évaluer la santé générale de son érable.

Santé globale de l'arbre	Diamètre maximal du chalumeau	Profondeur maximale de l'entaillage (avec écorce)	Diamètre minimal de l'arbre à 1,3 m	Nombre d'entaille maximal par arbre à partir de 40 cm
<i>Croissance radiale optimale (plus de 1,25 mm/an)</i>				
<i>Bonne</i>	<i>5/16"</i>	<i>45-50 mm</i>	<i>23,1 cm</i>	<i>2</i>
Mauvaise	5/16"	45-50 mm	31 cm	2
Mauvaise	1/4 ou 5/16"	45-50 mm (si chalumeau de 1/4") ou 25-30 mm (si chalumeau de 5/16")	23,1 cm	2
<i>Croissance radiale sous-optimale (moins de 1,25 mm/an)</i>				
Bonne	1/4 ou 5/16"	45-50 mm (si chalumeau de 1/4") ou 25-30 mm (si chalumeau de 5/16")	23,1 cm	2
Bonne	5/16"	45-50 mm	31 cm	2
Mauvaise	1/4"	25-30 mm	31 cm	1
<i>Croissance radiale très faible (moins de 0,50 mm/an)</i>				
Bonne ou Mauvaise	1/4"	25-30 mm	31 cm	1

6.3. Diamètre minimal recommandé pour l'entaillage des érables

- En ce qui concerne le diamètre minimal à recommander pour l'entaillage des érables, les simulations théoriques faites par Pelletier (2020) montrent qu'il est **théoriquement** possible d'entailler les érables à partir d'un diamètre de 20 cm tout en conservant le potentiel d'entaillage futur *si la croissance radiale des érables est d'au moins 1,25 mm/an, que l'on*

utilise des chalumeaux de 7,93 mm (5/16") de diamètre, que l'on limite la profondeur de l'entaille à un maximum de 50 mm, que l'on entaille sur plusieurs niveaux au-dessus et en-dessous de la ligne latérale avec une longueur moyenne de chute de 100 cm, que l'on puisse répartir les entailles de façon optimale dans la zone d'entaillage accessible par une chute de 100 cm, que l'arbre est en bonne santé et ne présente pas de défauts et/ou blessures majeurs sur le tronc et que l'on ne fasse pas une deuxième entaille avant que le diamètre atteigne 40 cm. Selon ces mêmes simulations, il serait aussi **théoriquement** possible d'entailler des érables de 20 cm à faible croissance radiale (1,0 mm/an) tout en conservant le potentiel d'entaillage futur si on utilise de plus petits chalumeaux (6,35 mm de diamètre ou 1/4") et des profondeurs d'entaille de 50 mm ou encore des érables de 20 cm de diamètre ayant une très faible croissance radiale (0,5 mm/an) si on utilise des chalumeaux de 6,35 mm de diamètre (1/4") **ET** des profondeurs d'entaille de 25 mm (Pelletier, 2020).

- Les simulations présentées dans le rapport du centre ACER (Pelletier 2020) sont très intéressantes et convaincantes, **mais leur validité dépend de plusieurs conditions**. Il faut que l'entaillage se fasse selon les règles de l'art. Il assume que le tronc de l'arbre est un cylindre parfait et que le tronc de l'arbre est globalement sain et exempt de défauts. Ils utilisent des valeurs moyennes pour l'effet de l'entaillage sur le compartimentage et donc ne considèrent pas la très grande variation observée pour ce paramètre en réalité (selon van den Berg et al., 2016 et van den Berg, 2021). De plus, les valeurs utilisées pour simuler l'effet de l'entaillage sur le compartimentage et la coulée de l'eau d'érable viennent d'un nombre très limité d'études et donc ne peuvent être considérées comme très fiables.
- Par conséquent, considérant (i) la croissance moyenne de nos érables au Québec (moyenne radiale de 1,34 mm/an selon une estimation grossière faite à partir des valeurs régionales reportées dans Grenier (2008a) et Pelletier (2020)), mais avec beaucoup de variation entre sites, régions et érables au sein d'un même site), (ii) le peu d'études disponibles pour valider les paramètres moyens utilisés pour les simulations faites par Pelletier (2020) pour évaluer la durabilité de l'entaillage, (iii) le fait que les simulations de Pelletier (2020) assument des conditions presque parfaites au niveau de la santé des érables, de la répartition des entailles dans la zone accessible par une longueur moyenne de chute de 100 cm et un cylindre parfait de l'érable, et (iv) que les simulations ne tiennent pas compte de la très grande variabilité naturelle dans le volume de bois compartimenté suite à l'entaillage, nous recommandons **la prudence** dans l'utilisation du diamètre minimal, du nombre d'entaille par arbre, de la profondeur d'entaillage et du diamètre du chalumeau particulièrement lorsque les conditions de croissance des érables au Québec ne sont pas connues localement et lorsque l'état de santé de l'érable est mauvais (i.e., lorsqu'il y a des défauts et blessures majeurs sur le tronc et/ou un dépérissement important).
- **Le diamètre de 23,1 cm, tel que recommandé par le MFFP, nous semble donc un minimum acceptable sur les sites où la croissance de l'érable est d'au moins 1,25 mm/an (croissance considérée optimale dans ce rapport) et lorsque l'arbre est globalement sain et en santé.** Dans les cas où la croissance radiale d'un érable en bonne santé est moins que 1,25 mm/an (i.e., croissance sous-optimale) et/ou lorsque l'érable a une croissance radiale de plus de 1,25 mm/an mais qu'il présente des défauts et blessures majeures et/ou un dépérissement important (arbre en mauvaise santé), il est recommandé d'utiliser des diamètres de chalumeau et/ou des profondeurs d'entaillage plus petits jusqu'au moment où l'arbre atteint 31 cm et/ou encore d'augmenter le diamètre minimal pour l'entaillage à 31 cm (voir tableau 3).

- La valeur de 1,25 mm/an proposée ici est basée sur la simulation de Pelletier (2020) pour des arbres de 20 cm de diamètre (à 1,3 m de hauteur) ayant une croissance radiale de 1,25 mm/an, et selon les conditions décrites dans son étude, qui montrait que ces conditions l'entaillage était à la limite de la durabilité. Pour assurer la durabilité de l'entaillage des érables au Québec, il nous apparaît donc prudent de recommander un diamètre minimal de 23,1 cm pour l'entaillage des érables tout en modifiant le diamètre minimal des chalumeaux et/ou la profondeur maximale d'entaillage selon les conditions de croissance et de santé de l'érable (voir tableau 3). Un diamètre minimal de 23 cm est aussi proposé dans le dernier rapport de Perkins et al. (2022) lorsque les conditions de croissance radiale sont optimales et de 31 cm pour les érables ayant des conditions de croissance radiale sous-optimales. Nous recommandons aussi d'utiliser un diamètre minimal de 31 cm dans certaines conditions (voir tableau 3). Pour le Québec, nous proposons un seuil de croissance radiale de 1,25 mm/an pour déterminer les érables ayant une croissance optimale vs. sous-optimale. Ce seuil est basé sur les simulations faites par Pelletier (2020), faites d'études plus poussées sur le sujet.
- Nous proposons aussi que des mesures de la croissance des érables soient faites sur chaque site afin de déterminer la croissance moyenne et la variabilité entre les érables afin de pouvoir ajuster les critères d'entaillage au besoin. La chercheuse van den Berg (2021) a montré que même lorsque la croissance moyenne est bonne sur un site donné, il y a quand même un grand nombre d'individus qui ont une croissance bien en deçà de cette moyenne, ce qui risque de compromettre la durabilité de l'entaillage à long terme pour ces érables.
- Il serait donc intéressant de développer un outil de calcul que les acériculteurs pourraient utiliser sur le terrain afin de déterminer un niveau et type d'entaillage durable en fonction des conditions locales de croissance afin de développer une « acériculture de précision ». Pour ce faire, il serait possible d'envisager de mesurer la variation de la croissance radiale des érables à l'intérieur de chaque érablière commerciale de façon à pouvoir déterminer localement la croissance moyenne et ainsi pouvoir moduler le niveau et type d'entaillage qui peut être effectué pour chaque site afin de pouvoir optimiser l'entaillage et aussi assurer la durabilité de l'entaillage à long terme. Cette croissance pourrait être mesurée par carottage et analyse de la croissance des cernes **pour les dix années précédentes**, suivie par des mesures annuelles du diamètre à 1,3 m à l'aide d'un ruban diamétrique, ou en installant des dendromètres sur un certain nombre d'érables afin de suivre l'évolution de la croissance dans le temps.
- Considérant l'importance de la profondeur de l'entaille et de l'amplitude de la zone compartimentée afin de déterminer les meilleures approches d'entaillage de nos érablières, il serait important d'effectuer des études supplémentaires pour statuer plus précisément sur l'effet de la profondeur de l'entaille sur le rendement en eau et l'effet du diamètre et de la profondeur de l'entaille et du niveau de vacuum utilisé sur l'amplitude de la zone compartimentée.

6.4. Nombre d'entailles maximales et dimension minimale pour ajouter une deuxième entaille

- La réduction du nombre maximal d'entailles à 2 pour des érables de plus fort diamètre (à partir de 40 cm) nous semble appropriée. En effet, les résultats de Grenier et al. (2008a) indiquent qu'au-delà de deux entailles, le rendement total par érable n'augmente pas et les résultats présentés par van den Berg (2021) montrent que pour les systèmes sous haut vide,

le gain de la deuxième entaille est grandement réduit par rapport à la première entaille, peu importe la taille de l'érable. Il faudrait cependant valider ce résultat avec d'autres études.

- Pour des érables en mauvaise santé ayant une croissance radiale de moins de 1,25 mm/an ou encore pour des érables en bonne ou mauvaise santé ayant une croissance radiale de moins de 0,50 mm/an, il ne faudrait pas avoir plus d'une entaille (voir tableau 3).
- Il semble donc contre-productif d'avoir plus de deux entailles par arbres considérant l'augmentation du compartimentage et les risques de carie que des entailles supplémentaires produisent.

7. Priorité de recherche

L'une des constatations importantes faites lors de la préparation de ce rapport est qu'il n'existe finalement qu'un très petit nombre d'études crédibles et publiées sur plusieurs aspects importants de l'effet de l'entaillage sur la durabilité de la production acéricole au Québec ou ailleurs dans l'est de l'Amérique du Nord :

- Effet de l'entaillage sur la croissance de l'érable,
- Effet des nouvelles techniques d'entaillage sur la quantité de l'eau recueillie, et
- Effet des nouvelles techniques d'entaillage sur la répartition spatiale du compartimentage dans l'aubier de l'érable et les causes de cette grande variabilité.

Puisqu'il est normal de penser qu'il existe une certaine variabilité de ces effets selon les sites, les conditions expérimentales utilisées et le type de techniques utilisées, il faut donc absolument augmenter le nombre d'études pour chacune de ces questions afin de pouvoir développer des normes d'entaillage qui sont appuyées sur des études scientifiques solides afin d'assurer la durabilité de la production acéricole au Québec.

Des recherches supplémentaires sont aussi nécessaires au niveau plus fondamental afin de mieux comprendre l'effet de l'entaillage répété sur la physiologie et le fonctionnement global des érables. Il serait important de mieux comprendre l'effet de l'entaillage répété sur :

- (1) La dynamique de réserves dans les érables, au printemps et ses effets sur la croissance de l'érable à long-terme,
- (2) La perte de conductivité hydraulique de l'arbre causée par le compartimentage de l'aubier suite à l'entaillage, particulièrement suite à un été sec
- (3) La résilience des érables face à différents stress comme des étés secs, des hivers avec d'importants redoux et des défoliations importantes durant l'été, considérant la diminution des réserves et de la proportion de xylème conducteur.

Il faut aussi plus d'études pour mieux comprendre le rôle des espèces compagnes à l'érable dans les érablières sur (1) la chimie et la biologie du sol et (2) la capacité des érables et de l'érablière à mieux résister aux stress climatiques et biologiques. Finalement des études sont nécessaires afin de mieux comprendre les effets des différents stress climatiques et biologiques (défoliation par des insectes) seuls ou combinés sur la santé et la vigueur des érables à long terme selon les différentes conditions de sites que l'on retrouve au Québec, afin de pouvoir tester et développer des approches sylvicoles à privilégier pour minimiser les impacts négatifs.

8. Remerciements

Nous remercions Mme Fanny Maure pour la relecture de ce rapport, Lana Ruddick pour son aide technique et M. Guillaume Perrette pour les informations sur le compartimentage dans les arbres. Nous remercions aussi toutes les personnes consultées dans le cadre de ce rapport (voir annexe 1).

9. Littérature citée

- Allard, G.B. (1987) Efficacité du système de collecte sous vide de l'eau d'érable (SYSVAC). I : Évaluation des pertes de charge dans un tube collecteur destiné à amener le vide à un transvideur situé à une certaine distance de la pompe à vide. Centre ACER.
- Allard, G.B., Cartier, M., Boudreault, G., & Renaud, J.-P. (1998) Modernisation des techniques d'entaillage : effet du diamètre du chalumeau sur le taux de cicatrisation des blessures d'entaille. Centre ACER.
- Aquilué, N., Messier, C., Martins, K. T., Dumais-Lalonde, V., & Mina, M. (2021). A simple-to-use management approach to boost adaptive capacity of forests to global uncertainty. *Forest Ecology and Management*, 481, 118692.
- Ampoorter, E., Barbaro, L., et al. (2020). Tree diversity is key for promoting the diversity and abundance of forest-associated taxa in Europe. *Oikos*, 129, 133–146.
- Aubin, I., Munson, A.D., et al. (2016). Traits to stay, traits to move: a review of functional traits to assess sensitivity and adaptive capacity of temperate and boreal trees to climate change. *Environ. Rev.* 24(2):164–186.
- Auger, D., Blanchet, D. et al. (2004). Exploitation acéricole des érablières du domaine de l'état : guide des bonnes pratiques environnementales. Ministère des ressources naturelles, de la faune et des parcs, Québec, mars 2004.
- Baeten, L., Bruelheide, H. et al. (2019). Identifying the tree species compositions that maximize ecosystem functioning in European forests. *Journal of Applied Ecology*, 56, 733–744.
- Bal, T.L., Storer, A.J., & Jurgensen, M.F. (2018). Evidence of damage from exotic invasive earthworm activity was highly correlated to sugar maple dieback in the Upper Great Lakes region. 20:151–164.
- Barbaroux, C., & Bréda, N. (2002). Contrasting distribution and seasonal dynamics of carbohydrate reserves in stem wood of adult ring-porous sessile oak and diffuse-porous beech trees. *Tree Physiology*, 22(17), 1201–1210. <https://doi.org/10.1093/treephys/22.17.1201>.
- Bauhus J., Forrester D.I., Gardiner B., Jactel H., Vallejo R., Pretzsch H. (2017) Ecological Stability of Mixed-Species Forests. In: Pretzsch H., Forrester D., Bauhus J. (eds) *Mixed-Species Forests*. Springer, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-662-54553-9_7.
- Beaudet, M., Brisson, J., Gravel, D., & Messier, C. (2007). Effect of a major canopy disturbance on the coexistence of *Acer saccharum* and *Fagus grandifolia* in the understorey of an old-growth forest. *Journal of Ecology*. 95 :458–467.
- Bélanger, N., Côté, B., Fyles, J.W., Courchesne, F., & Hendershot, W.H. (2004). Forest regrowth as the controlling factor of soil nutrient availability 75 years after fire in a deciduous forest of Southern Quebec. *Plant and Soil* 262: 363-372.

- Bevilacqua, E. et al. 2021. AllenGrowth of Sugar Maple (*Acer saccharum* Marsh.) after Ice Storm Damage and Forest Tent Caterpillar (*Malacosoma disstria* Hubner) Defoliation. *Forests*, 12, 620. <https://doi.org/10.3390/f12050620>
- Bergeron, M. 2020. Les espèces compagnes des érablières : faire un choix avisé. *Progrès forestier*, numéro 233. Pages 22 à 25.
- Bishop, D.A., Beier, C.M., Pederson, N., Lawrence, G.B., Stella, J.C., & Sullivan, T.J., (2015). Regional growth decline of sugar maple (*Acer saccharum*) and its potential causes. *Ecosphere* 6 (10), 179.
- Bouchard, A., Dyrda, S., Bergeron, Y. & Meilleur, A. (1989). The use of notary deeds to estimate the composition of 19th century forests, in Haut-Saint-Laurent, Québec. *Can. J. For. Res.* 19 : 1146-1150.
- Boutin, J. (2019) Haut niveau de vide : bon, mais à quel prix ? <https://www.mapaq.gouv.qc.ca>
- Buzzell, G.L. (1987) Tapping guidelines. University of Vermont Extension System.
- Canada : Office des normes générales du Canada : Conseil canadien des normes (2020) Systèmes de production biologique : principes généraux et normes de gestion.
- Carbone, M.S., Czimczik, C.I., Keenan, T.F., Murakami, P.F., Pederson, N., Schaberg, P.G., Xu, X., & Richardson, A.D. (2013). Age, allocation and availability of nonstructural carbon in mature red maple trees. *New Phytologist*, 200(4), 1145–1155. <https://doi.org/10.1111/nph.12448>
- Centre ACER. (n.d.). Note de recherche.
- Chapeskie, D., Richardson, M., Wheeler, A., et al. (2006) A Guide to Improving and Maintaining Sugar Bush Health and Productivity, Eastern Ontario Model Forest.
- Cheng, L., & Fuchigami, L. H. (2002). Growth of young apple trees in relation to reserve nitrogen and carbohydrates. *Tree Physiology*, 22(18), 1297–1303. <https://doi.org/10.1093/treephys/22.18.1297>.
- Cliche, M. & Boutin, A. 2021. Guide d'aménagement des érablières. L'Association des propriétaires de boisés de la Beauce (APBB). Québec. 281 pages.
- Comerford, D.P., Schaberg, P.G. et al. (2013). Influence of experimental snow removal on root and canopy physiology of sugar maple trees in a northern hardwood forest. *Oecologia*, 171:261–269.
- Conseil des productions végétales du Québec. Comité d'acériculture. (1984). Erablière : entaillage des érables. [Québec] : [le Conseil].
- Copenheaver, C.A., McCune, R.C., Sorensen, E.A., et al. (2014) Decreased radial growth in sugar maple trees tapped for maple syrup. *For. Chron.* <https://doi.org/10.5558/tfc2014-149>.

- Copenheaver, C.A., Shumaker, K.L., Butcher, B.M., Hahn, G.E., et al. (2020). Dendroclimatology of sugar maple (*Acer saccharum*): Climate-growth response in a late-successional species. *Dendrochronologia* 63 1257472.
- Cornell Maple Program. (2021). New York State Maple Tubing and Vacuum System Notebook 6th edition. Cornell University Cooperative Extension.
- Côté, B., & Fyles, J.W. (1994a). Nutrient concentration and acid base of leaf litter characteristic of the hardwood forest of southern Québec. *Can. J. For. Res.* 24 : 192-196.
- Côté, B., & Fyles, J.W. (1994b). Leaf litter disappearance of hardwood species of southern Québec: interaction between physical and chemical characteristics of leaf litter and site. *Ecoscience* 1: 322-328.
- Dahir, S.E. & Lorimer, C.G. (1996). Variation in canopy gap formation among developmental stages of northern hardwood stands. *Can. J. For. Res.*, 26: 1875-1892.
- Delcourt, H.R., & Delcourt, P.A. (2000). Chapter 10: eastern deciduous forests. In: Barbour, M.G. & Billings, W.D. (Eds.). *North American Terrestrial vegetation*, Second edition, Cambridge University Press, New York.
- Dietrich, L., Hoch, G., Kahmen, A., & Körner, C. (2018). Losing half the conductive area hardly impacts the water status of mature trees. *Scientific Reports*, 8(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-018-33465-0>
- Dietze, M. C., Sala, A., Carbone, M. S., Czimczik, C. I., Mantooth, J. A., Richardson, A. D., & Vargas, R. (2014). Nonstructural carbon in woody plants. In *Annual Review of Plant Biology* (Vol. 65, pp. 667–687). Annual Reviews Inc. <https://doi.org/10.1146/annurev-arplant-050213-040054>.
- Drohan, P.J., Stout, S.L., & Petersen, G.W. (2002). Sugar maple (*Acer saccharum* Marsh.) decline during 1979–1989 in northern Pennsylvania. *For. Ecol. Manag.* 170, 1–17.
- Duchesne, L., Ouimet, R., & Houle, D. (2002). Basal area growth of sugar maple in relation to acid deposition, stand health, and soil nutrients. *J. Environ. Qual.* 31, 1676–1683.
- Duchesne, L. & Ouimet, R. (2009). Present-day expansion of American beech in northeastern hardwood forests: Does soil base status matter? *Can. J. For. Res.* 39(12):2273–2282.
- Duchesne, L., & Houle, D. (2019). The “sweet spot” for maple syrup production proposed by Rapp et al. (2019) is not that sweet. *Forest Ecology and Management*.
- Duffy, J.E., Godwin, C.M., & Cardinale, B.J. (2017). Biodiversity effects in the wild are common and as strong as key drivers of productivity. *Nature*, 549: 261–264.
- Dumont, J. (1994). L'eau d'érable. Note de recherche.

- Dupuis, S., Arseneault, D. & Sirois, L. (2011) Change from pre-settlement to present-day forest composition reconstructed from early land survey records in eastern Québec, Canada. *J. of Vegetation Science*. Doi: 10.1111/j.1654-1103.2011.01282.x.
- Dymond, C.C., Tedder, S., Spittlehouse, D.L., et al. (2014). Diversifying managed forests to increase resilience. *Canadian Journal of Forest Research*, 44(10): 1196-1205.
- Edman, M., Möller, R., & Ericson, L. (2006). Effects of enhanced tree growth rate on the decay capacities of three saprotrophic wood-fungi. *Forest Ecology and Management*, 232(1–3), 12–18. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2006.05.001>
- Foster, D.R., Motzkin, G. & Slater, B. (1998) Land-Use History as Long-Term Broad-Scale Disturbance: Regional Forest Dynamics in Central New England Ecosystems, 1: 96-119.
- Gamfeldt, L., Snäll, T., Bagchi, R., Jonsson, M., et al. (2013). Higher levels of multiple ecosystem services are found in forests with more tree species. *Nature Communications*, 4, Article number: 1340.
- Garnier, E. & Navas, M.L. (2013) Diversité fonctionnelle des plantes. Traits des organismes, structure des communautés, propriétés des écosystèmes. Bruxelles: De Boeck. 353 p.
- Germino, M. J. (2015). A carbohydrate quandary. *Tree Physiology*, 35(11), 1141–1145. <https://doi.org/10.1093/treephys/tpv109>.
- Gleason, K. E., Bradford, J.B., Bottero, A., D’Amato, A.W., Fraver, S., Palik, B.J., Battaglia, M.A., Iverson, L., Kenefic, L., & Kern, C.C. (2017). Competition amplifies drought stress in forests across broad climatic and compositional gradients. *Ecosphere* 8(7):e01849. 10.1002/ecs2.1849.
- Goodburn, J.M. (1996). Comparison of forest habitat structure and composition in old-growth and managed northern hardwoods in Wisconsin and Michigan. M.Sc., University of Wisconsin-Madison.
- Granda, E., & Camarero, J. J. (2017). Drought reduces growth and stimulates sugar accumulation: New evidence of environmentally driven non-structural carbohydrate use. *Tree Physiology*, 37(8), 997–1000. <https://doi.org/10.1093/treephys/tpx097>
- Gregory, R. A., & Wargo, P. M. (1986). Timing of defoliation and its effect on bud development, starch reserves, and sap sugar concentration in sugar maple. *Canadian Journal of Forest Research*, 16, 10–17. www.nrcresearchpress.com.
- Grenier, Y., Lavoie, J., & Boudrault, G. (2008a). Vers la formulation de nouvelles normes d’entaillage pour conserver la production acéricole à long terme - Volet B : détermination du nombre d’entailles par arbres. Centre ACER.
- Grenier, Y., Lavoie, J., & Boudrault, G. (2008b). Vers la formulation de nouvelles normes d’entaillage 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.

- Grossman, J.J., Vanhellemont, M., Barsoum, N., Bauhus, J., Bruelheide, H., et al. (2018). Synthesis and future research directions linking tree diversity to growth, survival, and damage in a global network of tree diversity experiments. *Environmental and Experimental Botany*, 152, 68-89.
- Hartmann, H., & Messier, C. (2008). The role of forest tent caterpillar defoliations and partial harvest in the decline and death of sugar maple. *Ann. Bot.* 102, 377–387.
- Heiligmann, R.B., Koelling, M.R., & Perkins, T.D. (2006). North American maple syrup producer's manual. Ohio State University Extension.
- Helcoski, R., Tepley, A. J., McGarvey, J. C., Gonzalez-Akre, E., Meakem, V., Thompson, J. R., & Anderson-Teixeira, K. J. (2019). No significant increase in tree mortality following coring in a temperate hardwood forest. *Tree-Ring Research*, 75(1), 67–72. <https://doi.org/10.3959/1536-1098-75.1.67>
- Henry, C.R., Walters, M.B., Finley, A.O., et al. (2021). Complex drivers of sugar maple (*Acer saccharum*) regeneration reveal challenges to long-term sustainability of managed northern hardwood forests. *Forest Ecology and Management*, 479, 118541.
- Hoch, G., Richter, A., & Körner, C. (2003). Non-structural carbon compounds in temperate forest trees. *Plant, Cell and Environment*, 26(7), 1067–1081. <https://doi.org/10.1046/j.0016-8025.2003.01032.x>.
- Horsley, S.B., Long, R.P., Bailey, S.W., Hallett, R.A., & Wargo, P.M. (2002). Health of eastern North American sugar maple forests and factors affecting decline. *Northern Journal of Applied Forestry*, 19, 34–44.
- Houle, D., Tremblay, S., & Ouimet, R. (2007). Foliar and wood chemistry of sugar maple along a gradient of soil acidity and stand health. *Plant Soil* 300:173–183.
- Houston, D.R., Allen, D.C., & Lachance, D. (1990). Aménagement de l'érablière: guide de protection de la santé des arbres. Rapport d'information LAU-X-92F. Forêt Canada.
- Hufkens, K., Friedl, M.A., Keenan, T.F., et al. (2012). Ecological impacts of widespread frost event following early spring leafout. *Global Change Biology* 18(7):2365–2377.
- Igarashi, S., Shibata, M., Masaki, T., Tayasu, I., & Ichie, T. (2019). Mass flowering of *Fagus crenata* does not depend on the amount of stored carbohydrates in trees. *Trees - Structure and Function*, 33(5), 1399–1408. <https://doi.org/10.1007/s00468-019-01867-w>.
- Isselhardt, M.L., Perkins, T.D., van den Berg, A.K., & Schaberg, P.G. (2016). Preliminary Results of Sugar Maple Carbohydrate and Growth Response under Vacuum and Gravity Sap Extraction. *For Sci* 62:125–128. <https://doi.org/10.5849/forsci.14-137>.
- Jactel, H., & Brockerhoff, E.G. (2007). Tree diversity reduces herbivory by forest insects. *Ecology Letters*, 10: 835-848.

- Jactel, H., Bauhus, J., Bonal, D., et al. (2017). Tree Diversity Drives Forest Stand Resistance to Natural Disturbances. *Current Forestry Reports* volume 3: 223–243.
- Jactel, H., Moreira, X., & Castagneyrol, B. (2021). Tree diversity and forest resistance to insect pests: Patterns, mechanisms, and prospects. *Annual Review of Entomology*, 66, 277–296.
- Kagawa, A., Sugimoto, A., & Maximov, T. C. (2006). Seasonal course of translocation, storage and remobilization of ¹³C pulse-labeled photoassimilate in naturally growing *Larix gmelinii* saplings. *New Phytologist*, 171(4), 793–804. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2006.01780.x>.
- Kasuga, J., Arakawa, K., & Fujikawa, S. (2007). High accumulation of soluble sugars in deep supercooling Japanese white birch xylem parenchyma cells. *New Phytologist*, 174(3), 569–579. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2007.02025.x>.
- Keel, S. G., & Schädel, C. (2010). Expanding leaves of mature deciduous forest trees rapidly become autotrophic. *Tree Physiology*, 30(10), 1253–1259. <https://doi.org/10.1093/treephys/tpq071>
- Kobe, R. K., Iyer, M., & Walters, M. B. (2010). Optimal partitioning theory revisited: Nonstructural carbohydrates dominate root mass responses to nitrogen. In *Ecology* (Vol. 91, Issue 1).
- Körner, C. (2003). Carbon limitation in trees. *Journal of Ecology*, 91: 4–17
- Kuroda, K. (2001). Responses of *Quercus* sapwood to infection with the pathogenic fungus of new wilt disease vectored by the ambrosia beetle (*Platypus quercivorus*). *Journal of Wood Science* 47:425–429.
- Lagacé, L., Beaudoin, M., Corriveau, S., et al. (2015). Évaluation de nouveaux prototypes de chalumeaux et de tubulures au diamètre réduit pour la collecte de la sève d'érable. Centre ACER.
- Lagacé, L., Camara, M., Martin, N., et al. (2019). Effect of the new high vacuum technology on the chemical composition of maple sap and syrup. *Heliyon* 5: e01786. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2019.e01786>.
- Landhäusser, S. M. (2011). Aspen shoots are carbon autonomous during bud break. *Trees - Structure and Function*, 25(3), 531–536. <https://doi.org/10.1007/s00468-010-0532-8>.
- Lautenschlager, R.A., Pedlar, J.H., Winters, J.A. & Nielsen, C.M. (2003). Ice storm damage: Effects of competition and fertilization on the growth of sugar maple trees. *Forestry Chronicle*, January/February, Vol. 79.
- Lavallé, A. (1986). Les caries du sapin baumier dans le centre et le nord-est du Québec.
- Liang, J., Crowther, T.W., et al. (2016). Positive biodiversity-productivity relationship predominant in global forests. *Science* 354: aaf8957. <https://doi.org/10.1126/science.aaf8957>

- Martínez-Vilalta, J., Sala, A., Asensio, D., Galiano, L., Hoch, G., Palacio, S., Piper, F. I., & Lloret, F. (2016). Dynamics of non-structural carbohydrates in terrestrial plants: A global synthesis. *Ecological Monographs*, 86(4), 495–516. <https://doi.org/10.1002/ecm.1231>
- Messier, C., & Maure, F. (2021). INCERTITUDES CLIMATIQUES ET BIOTIQUES Comment rendre notre érablière plus résiliente face à ces menaces. *Progrès Forestier*, Hiver 2021.
- Messier, C., Bauhus, J., Sousa-Silva, R. et al. (2021). For the sake of resilience and multifunctionality, let's diversify planted forests! *Conservation Letters*. e12829.
- Millard, P., & Grelet, G. A. (2010). Nitrogen storage and remobilization by trees: Ecophysiological relevance in a changing world. *Tree Physiology*, 30(9), 1083–1095. <https://doi.org/10.1093/treephys/tpq042>.
- Ministre des Forêts, de la Faune et des Parcs (MFFP). (2018). Règlement sur les permis d'intervention - Loi sur l'aménagement durable du territoire forestier.
- Moore, J.-D., Duchesne, L., Ouimet, R., & Deschênes, M.-L. (2020). Liming improves sap characteristics of sugar maple over the long term. *Forest Ecology and Management* 464: 118044.
- Moore, J.-D., & Ouimet, R. (2021). Liming still positively influences sugar maple nutrition, vigor and growth, 20 years after a single application. *Forest Ecology and Management* 490 119103.
- Moreau, G., Achim, A., & Pothier, D. (2019). A dendrochronological reconstruction of sugar maple growth and mortality dynamics partially cut northern hardwood forests. *Forest Ecology and Management* 437: 17–26.
- Moreau, G., Achim, A., & Pothier, D. (2020). An accumulation of climatic stress events has led to years of reduced growth for sugar maple in southern Quebec, Canada. *Ecosphere* 11(7): e03183. [10.1002/ecs2.31831](https://doi.org/10.1002/ecs2.31831).
- Mori, A. S., Furukawa, T., & Sasaki, T. (2013). Response diversity determines the resilience of ecosystems to environmental change. *Biological Reviews* 88:349–364.
- Morin, X., Améglio, T., Ahas, R., Kurz-Besson, C., Lanta, V., Lebourgeois, F., Miglietta, F., & Chuine, I. (2007). Variation in cold hardiness and carbohydrate concentration from dormancy induction to bud burst among provenances of three European oak species. *Tree Physiology*, 27(6), 817–825. <https://doi.org/10.1093/treephys/27.6.817>.
- Muhr, J., Messier, C., Delagrangé, S., Trumbore, S., Xu, X., & Hartmann, H. (2016). How fresh is maple syrup? Sugar maple trees mobilize carbon stored several years previously during early springtime sap-ascent. *New Phytologist*, 209(4), 1410–1416. <https://doi.org/10.1111/nph.13782>.
- Neely, D. (1988). Tree wound closure. *Journal of arboriculture*, 14(6), 148-152.

- Ngubeni, N., Jacobs, S., Seydack, A., Vermeulen, W., Sass, G., & Seifert, T. (2017). Trade-off relationships between tree growth and defense: a comparison of *Ocotea bullata* and *Curtisia dentata* following bark harvesting in an evergreen moist South African Forest. *Trees - Structure and Function*, 31(1), 339–348. <https://doi.org/10.1007/s00468-016-1487-1>
- Nolet, P., & Kneeshaw, D. (2018). Extreme events and subtle ecological effects: lessons from a long-term sugar maple–American beech comparison. *Ecosphere* 9(7): e02336. [10.1002/ecs2.2336](https://doi.org/10.1002/ecs2.2336).
- Normes de production biologiques du MAPAQ. 2017. <https://www.mapaq.gouv.qc.ca/SiteCollectionDocuments/Regions/ChaudiereAppalaches/Espaceconferences/TransitionacericulturebioJA17.pdf>
- Nouveau Brunswick (2011) Maple Sugary Leasing Policy. <https://www2.gnb.ca>
- O'Brien, M. J., Leuzinger, S., Philipson, C. D., Tay, J., & Hector, A. (2014). Drought survival of tropical tree seedlings enhanced by non-structural carbohydrate levels. *Nature Climate Change*, 4(8), 710–714. <https://doi.org/10.1038/nclimate2281>.
- Oliva, J., Thor, M., & Stenlid, J. (2010). Reaction zone and periodic increment decrease in *Picea abies* trees infected by *Heterobasidion annosum* s.l. *Forest Ecology and Management*, 260(5), 692–698. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2010.05.024>.
- Oliva, J., Camarero, J.J., & Stenlid, J. (2012). Understanding the role of sapwood loss and reaction zone formation on radial growth of Norway spruce (*Picea abies*) trees decayed by *Heterobasidion annosum* s.l. *Forest Ecology and Management*, 274: 201–209. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2012.02.026>.
- Olivier, M.-D., Schneider, R. & Fournier, R. (2016). Response of sugar maple (*Acer saccharum*, Marsh.) tree crown structure to competition in pure versus mixed stands. *For. Ecol. And Manag.*, 15: 20-32.
- Oswald E.M., Pontius, J., Rayback, S.A., Schaberg, P.G., Wilmot, S.H., & Dupigny-Giroux, L. (2018). The complex relationship between climate and sugar maple health: Climate change implications in Vermont for a key northern hardwood species. *Forest Ecology and Management* 422: 303–312.
- Ouimet, R. et al. 2016. Prolifération des fougères dans les érablières du Québec : ampleur du phénomène et moyens de le contrer. *Le Naturaliste Canadien*, 140, no. 1
- Ouimet, R. (2021). Aperçu de la recherche forestière en acériculture. <https://www.mapaq.gouv.qc.ca>
- Ouimet, R., Guillemette, F., Duchesne, L., & Moore, J.-D. (2021). Effect of tapping for syrup production on sugar maple tree growth in the Quebec Appalachians. *Trees* 35 : 1–13. <https://doi.org/10.1007/s00468-020-02001-x>.

- PPAQ. (2019). Statistiques acéricoles 2018. Producteurs et productrices acéricoles du Québec, Longueuil, p 36.
- Palacio, S., Hester, A. J., Maestro, M., & Millard, P. (2008). Browsed *Betula pubescens* trees are not carbon limited. *Functional Ecology*, 22(5), 808–815. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2435.2008.01433.x>.
- Paquette, A., & Messier, C. (2010). The role of plantations in managing the world's forests in the Anthropocene. *Frontier in Ecol and the Env.* 8:27-34.
- Paquette, A., & Messier, C. (2011). The effect of biodiversity on tree productivity: From temperate to boreal forests. *Global Ecology and Biogeography*. 20(1):170-180.
- Paquette, A., Sousa-Silva, R., Maure, F., Cameron, E., Belluau, M., & Messier, C. (2021). Praise for diversity: A functional approach to reduce risks in urban forests. *Urban Forestry and Urban Greening*, 62(February). <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2021.127157>
- Pelletier, M. (2020). Modifications des normes d'entaillage sur terre publique : analyse de la durabilité de l'entaillage et des impacts financiers des changements proposés par le MFFP. Centre ACER.
- Perkins, T.D., van den Berg, A.K., Boutin, J., Childs, S., Wilmot, T.W. 2022. Chapter 6: Sap Collection. In *North American Maple Syrup Producers Manual.*, 3rd ed. Perkins, T.D., van den Berg, A.K., Heiligmann, R.B. and Koelling, M.R., Eds. (sous-presses).
- Perkins, T.D., van den Berg, A.K., & Bosley, W.T. (2021). Effects of Tapping Depth on Sap Volume, Sap Sugar Content, and Syrup Yield Under High Vacuum. *Maple Syrup Digest* 60:8–12.
- Piispanen, R., & Saranpää, P. (2001). Variation of non-structural carbohydrates in silver birch (*Betula pendula* Roth) wood. *Trees - Structure and Function*, 15(7), 444–451. <https://doi.org/10.1007/s004680100125>.
- Plas, F. van der, Manning, P., Allan, E., et al. (2016). Jack-of-all-trades effects drive biodiversity–ecosystem multifunctionality relationships in European forests. *Nature Communications*, DOI; 10.1038/ncomms11109.
- 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. <https://doi.org/10.1139/x26-062>.
- Producteurs et productrices acéricoles du Québec. (2021). Réalisation d'un plan d'érablière selon les exigences des Producteurs et productrices acéricoles du Québec (PPAQ) - Instructions pour les ingénieurs forestiers.
- Rapp, J.M., & Crone, E.E. (2015). Maple syrup production declines following masting. *Forest Ecology and Management*, 335, 249–254. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2014.09.041>.

- Rapp, J.M., Lutz, D.A., Huish, R.D., Dufour, B., Ahmed, S., Morelli, T.L., Stinson, K.A. (2019). Finding the sweet spot: Shifting optimal climate for maple syrup production in North America. *For. Ecol. Manage.* 448, 187–197. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2019.05.045>.
- Rayner, A.D.M. (1993). New avenues for understanding processes of tree decay. *Arboricultural Journal* 17:171–189.
- Renaud, J. P. (1998). Étude du diamètre et de la profondeur de l'entaille sur le volume et la longueur de la zone de bois coloré – essais sur des gaulis. Centre ACER.
- Richardson, A. D., Carbone, M. S., Keenan, T. F., Czimczik, C. I., Hollinger, D. Y., Murakami, P., Schaberg, P. G., & Xu, X. (2013). Seasonal dynamics and age of stemwood nonstructural carbohydrates in temperate forest trees. *New Phytologist*, 197(3), 850–861. <https://doi.org/10.1111/nph.12042>.
- Rosas, T., Galiano, L., Ogaya, R., Peñuelas, J., & Martínez-Vilalta, J. (2013). Dynamics of non-structural carbohydrates in three mediterranean woody species following long-term experimental drought. *Frontiers in Plant Science*, 4(OCT). <https://doi.org/10.3389/fpls.2013.00400>.
- Russell, S.W., & Shigo, A.L. (1978). Tapholes in Sugar maples: What happens in the tree. Forest Service, United States Department of Agriculture Northeastern Forest Experiment Station, Broomall. Technical Report NE-47.
- Sakschewski, B., Bloh, W. von, Boit, A., Poorter, L., et al. (2016). Resilience of Amazon forests emerges from plant trait diversity. *Nature Climate Change* volume 6, pages1032–1036.
- Schadel, C., Blochl, A., Richter, A., & Hoch, G. (2009). Short-term dynamics of nonstructural carbohydrates and hemicelluloses in young branches of temperate forest trees during bud break. *Tree Physiology*, 29(7), 901–911. <https://doi.org/10.1093/treephys/tpp034>.
- Seidl, R., Thom, D. et al. (2017) Forest disturbances under climate change. *Nature Climate Change*, 7 : 395–402.
- Shigo, A.L., & Marx, H.G. (1977). Compartmentalization of decay in trees. Forest Service, United States Department of Agriculture Forest Service. Agriculture Information Bulletin No. 405.
- Shigo, A.L. (1986). A new tree biology. Shigo and trees associates, Durham, 618 pp.
- Simard, H. & Bouchard, A. (1996) The precolonial 19th century forest of the Upper St. Lawrence Region of Quebec: a record of its exploitation and transformation through notary deeds of wood sales. *Can. J. For. Res.*, 26: 1670-1676.
- Sohn, J.A., Saha, S., & Bauhus, J. (2016). Potential of forest thinning to mitigate drought stress: A meta-analysis. *Forest Ecology and Management*, 380: 261-273.

- Sperry, J. S., Alder, N. N., & Eastlack, S. E. (1993). The effect of reduced hydraulic conductance on stomatal conductance and xylem cavitation. *Journal of Experimental Botany*, 44(263), 1075–1082.
- Sullivan, T. J., Lawrence, G.B., Bailey, S.W., et al. (2013). Effects of acidic deposition and soil acidification on sugar maple trees in the Adirondack Mountains, New York. *Environmental Science and Technology* 47(22):12687–12694.
- Tobner, C.M., Paquette, A., Reich, P., Gravel, D. & Messier, C. (2014). Advancing biodiversity - ecosystem functioning science using high-density tree-based experiments over functional diversity gradients. *Oecologia*. 174(3): 609-621.
- Tomasella, M., Petrusa, E., Petruzzellis, F., Nardini, A., & Casolo, V. (2020). The possible role of non-structural carbohydrates in the regulation of tree hydraulics. *International Journal of Molecular Sciences*, 21(1). <https://doi.org/10.3390/ijms21010144>.
- Trumbore, S., Brando, P. & Hartmann, H (2015) Forest health and global change. *Science*, 349: 814-818.
- Tyree, M.T., & Sperry, J.S. (1989). Vulnerability of xylem to cavitation and embolism. *Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology* 40:19–38.
- University of Maine Cooperative Extension. (2021). Bulletin #7036, How to Tap Maple Trees and Make Maple Syrup - Cooperative Extension Publications - University of Maine Cooperative Extension. In: Coop. Ext. Publ. <https://extension.umaine.edu/publications/7036e/>. Accessed 16 Feb 2022.
- Urgoiti, J. (2022). Effects of mixture on the growth of sugar maple. Unpublished report.
- van den Berg, A.K. (2021) Tapping Practices to Optimize Maple Long-term Yields and Sustainability. <https://youtu.be/LbUqFKVAUI0>.
- van den Berg, A.K., Perkins, T.D., Wilmot, T.R., & Isselhardt, M.L. (2013) Technical research note—Tapping guidelines for current sap collection practices. University of Vermont Proctor Maple Research Centre.
- van den Berg, A.K. & Perkins, T.D. (2014). A model of the tapping zone. *Maple Syrup Digest* 26:18-27.
- van den Berg, A.K., Perkins, T.D., Isselhardt, M.L., Wilmot, T.R. (2016) Growth Rates of Sugar Maple Trees Tapped for Maple Syrup Production Using High-Yield Sap Collection Practices. *Forest Science* 62:107–114. <https://doi.org/10.5849/forsci.15-019>.
- Vermont Organic Farmers (2014) Guidelines for Certification of Organic Maple Syrup & Sap
- Vickers, L.A., McWilliams, W.H., et al. 2019. Are current seedling demographics poised to regenerate northern US forests? *Journal of Forestry* 117, 592–61

- Wargo, P. M. (1971). Seasonal Changes in Carbohydrate Levels in roots of sugar maple. <http://books.google.com>.
- Wiley, E., Hoch, G., & Landhäusser, S. M. (2017). Dying piece by piece: Carbohydrate dynamics in aspen (*Populus tremuloides*) seedlings under severe carbon stress. *Journal of Experimental Botany*, 68(18), 5221–5232. <https://doi.org/10.1093/jxb/erx342>.
- Willits, C.O., & Hills, C.H. (1976). Maple syrup producers manual. US Department of Agriculture.
- Wilmot, T.R., Perkins, T.D., Stowe, B., & van den Berg, A.K.. (2007a). Comparison of the “Small” Spout with the Traditional 7/16” Spout. *Maple Syrup Dig* 20–26
- Wilmot, T.R., Perkins, T.D. & van den Berg, A.K. (2007b). Vacuum sap collection: how high or low should you go. *Maple Syrup Digest* 19:27–32.
- Wong, B. L., Baggett, K. L., & Rye, A. H. (2003). Seasonal patterns of reserve and soluble carbohydrates in mature sugar maple (*Acer saccharum*). *Canadian Journal of Botany*, 81(8), 780–788. <https://doi.org/10.1139/b03-079>.
- Wong, B. L., Baggett, K. L., & Rye, A. H. (2009). Cold-season patterns of reserve and soluble carbohydrates in sugar maple and ice-damaged trees of two age classes following drought. *Botany*, 87(3), 293–305. <https://doi.org/10.1139/B08-123>.
- Würth, M. K. R., Peláez-Riedl, S., Wright, S. J., & Körner, C. (2005). Non-structural carbohydrate pools in a tropical forest. *Oecologia*, 143(1), 11–24. <https://doi.org/10.1007/s00442-004-1773-2>

10. Annexe 1

Liste des personnes consultées dans le cadre de ce rapport

Danny Rioux, PhD; Chercheur au Service Canadien des Forêts, Ste-Foy

Louis Bernier, PhD; Professeur de pathologie à l'Université Laval

Abby van den Berg, Ph.D.; Research Associate Professor; University of Vermont; Proctor Maple Research Center; 58 Harvey Rd. Underhill, VT 05489

Timothy Perkins, Ph.D.: Research Associate Professor; University of Vermont; Proctor Maple Research Center; 58 Harvey Rd. Underhill, VT 05489

Nicolas Bélanger, PhD; Professeur sur les sols forestiers à la TÉLUQ

Benoît Côté, PhD; Professeur sur les sols forestier à l'Université McGill

Christian Körner; Institute of Botany, University of Basel; Schönbeinstr. 6, CH-4056 Basel

Nathalie Breda, PhD; Directrice de Recherches; INRAE / AgroParisTech / Université de Lorraine, Centre INRAE Grand Est – Nancy, Route de la Forêt d'Amance, 54280 Champenoux, France

Brett A. Huggett, Associate Professor, Biology Department, Bates College, 44 Campus Avenue, Lewiston, Maine,

Guillaume Moreau, Chercheur Post-doctoral, Université Laval

David Pothier, professeur de sylviculture, Université Laval

Guenter Hoch, Department of Environmental Sciences – Botany, University of Basel, Schoenbeinstrasse 6, CH-4056 Basel, Switzerland

Carolyn Copenheaver, Associate Professor, Department of Forest Resources and Environmental Conservation, Virginia Tech, Blacksburg, VA 24061

Simon M Landhäuser, professeur d'écophysiologie forestière, University of Alberta, Edmonton, Alberta, Canada

Jean-Christophe Domec, Bordeaux Sciences Agro: www.agro-bordeaux.fr CS 40201, 33175 Gradignan Cedex, France

Sebastian Pfautsch, Associate Professor in Urban Studies, School of Social Sciences, Western Sydney University, Australia

Kate McCulloh, University of Wisconsin, USA

Timothy James Fahey, professor of silviculture, Cornell University, USA

Neil Pederson, Harvard Forest, Harvard University, 324 North Main St., Petersham, MA
01366

Henrik Hartmann, Group leader, Plant Allocation, MPI for Biogeochemistry, Hans Knöll
Str. 10, 07745 Jena, Germany