



Évaluation du calendrier de la saison des sucres de l'érable dans un contexte de réchauffement climatique

par Gian de Lima Santos

Mémoire présenté à l'Université du Québec à Chicoutimi en vue de l'obtention du grade de Maître ès sciences (M. Sc.) en ressources renouvelables

Québec, Canada

© Gian de Lima Santos, 2024

RÉSUMÉ

Les fluctuations quotidiennes de température déclenchent des processus physiques et métaboliques dans le xylème, influençant la période et le rendement de la sève d'érable. Cette étude évalue la dynamique de la sève récoltée en examinant les effets des températures moyennes mensuelles et des cycles de gel-dégel avant et pendant la saison des sucres. Un modèle prédictif a été développé pour estimer la temporalité de la coulée de la sève d'érable dans des scénarios de réchauffement futur au Québec, Canada. Les températures moyennes mensuelles de l'air et la récolte quotidienne de sève ont été mesurées sur quatre sites d'étude en 2022 et 2023, en utilisant des pluviomètres et des capteurs de températures pour simuler une récolte de sève par gravité. La durée de la saison des sucres était cohérente au sein des sites et entre les sites, avec une répartition similaire des journées très productives d'un site à l'autre. Les rendements de sève variaient de 9,3 à 23,8 litres en 2022 et de 3,8 à 13,6 litres en 2023. Des cycles de gel-dégel se sont produits dans 64 % des jours où la sève était exsudée. Le modèle de réseau neuronal a prédit qu'une augmentation des températures moyennes mensuelles de 2 °C avancerait le début de la saison des sucres de 17 jours et la fin de 13 jours. Tout décalage entre le moment de la récolte et les conditions météorologiques favorables peut réduire considérablement le rendement de la sève. En raison du réchauffement climatique, les producteurs devront réajuster progressivement le calendrier de leurs activités et de l'entaille pour s'adapter au déplacement de la saison des sucres dans le contexte de réchauffement climatique.

TABLE DES MATIÈRES

RÉSUMÉ	ii
TABLE DES MATIÈRES	iii
LISTE DES TABLEAUX	iv
LISTE DES FIGURES	v
LISTE DES ABRÉVIATIONS	vi
REMERCIEMENTS.....	vii
INTRODUCTION GÉNÉRALE	1
CHAPITRE 1	6
ÉVALUATION DU CALENDRIER DE LA SAISON DES SUCRES DE L'ÉRABLE DANS UN CONTEXTE DE RÉCHAUFFEMENT CLIMATIQUE.....	6
1.1. Résumé.....	7
1.2. Introduction.....	8
1.3. Matériel et méthodes.....	12
1.3.1. Localisation et caractéristiques des sites d'étude	12
1.3.2. Collecte de données	13
1.3.3. Analyse des données et statistiques	14
1.4. Résultats.....	17
1.4.1. Temporalité de la production de sève et saison des sucres.....	17
1.4.2. Production de sève	18
1.4.3. Estimation des températures	21
1.4.4. Régressions linéaires et réseaux neuronaux.....	22
1.5. Discussion.....	26
1.5.1. Comparaison de la saison des sucres et du rendement	26
1.5.2. Production de sève et épisodes de cycle de gel-dégel	28
1.5.3. Projections de la temporalité de la coulée de sève.....	29
1.6. Conclusion	32
1.7. Conflit d'intérêts	33
1.8. Contributions des auteurs.....	33
1.9. Financement.....	33
1.10. Remerciements.....	33
1.11. ANNEXE 1	34
1.11.1. Matériel supplémentaire	34
CONCLUSION GÉNÉRALE.....	35
LISTE DE RÉFÉRENCES	38

LISTE DES TABLEAUX

Table 1. Le diamètre à hauteur de poitrine (DHP) et la hauteur des érables à sucre étudiés en 2022 et 2023.....	13
---	----

LISTE DES FIGURES

Figure 1. Localisation des quatre sites d'étude (point bleu) et des stations météorologiques (losange rouge) dans la zone de distribution septentrionale de l'érable à sucre au Québec, Canada.	12
Figure 2. Production de sève (L/jour) et probabilité de production au printemps 2022 et 2023 sur quatre sites d'étude au Québec, Canada. La ligne pointillée et la zone grise représentent respectivement le seuil choisi et les dates prédites de la production de sève.	18
Figure 3. Distribution de la production journalière de sève et production de sève cumulée (PSC) pendant les saisons des sucres 2022 et 2023 sur quatre sites d'étude au Québec, Canada.	20
Figure 4. Les températures minimales et maximales de l'air prévues avant et pendant les saisons des sucres de 2022 et 2023, sur quatre sites d'étude au Québec, Canada. La zone grise indique les périodes estimées de production de sève.	22
Figure 5. Régressions normales linéaires entre les températures minimales et maximales moyennes de l'air et les périodes de la production de sève (début en bleu et fin en rouge) en 2022 (symbole rond) et 2023 (symbole triangulaire). La zone grise représente l'intervalle de confiance à 95 %.	24
Figure 6. Périodes prédites de début et de fin de la production de sève obtenues par le modèle de réseau de neurones en fonction des augmentations de température, basées sur les températures minimales et maximales moyennes de l'air.	25
Figure S1. Début (en haut) et fin (en bas) prévus de la production de sève et résidus obtenus à partir du modèle de réseau neuronal.	34

LISTE DES ABRÉVIATIONS

ASJ	L'Anse-Saint-Jean (site d'étude)
CSP	Production de sève cumulée
DOY	Jour de l'année
L	Litre
LAT	Laterrière (site d'étude)
MA	L'État du Massachusetts, États-Unis
PMV	Parc National des Monts-Valin (site d'étude)
R ²	Coefficient de détermination
RAP	Rivière-à-Pierre (site d'étude)
RCP	Profil représentatif d'évolution de concentration
RMSE	Erreur quadratique moyenne
ROC	Caractéristique de fonctionnement du récepteur
US	États-Unis

REMERCIEMENTS

Je tiens à exprimer ma sincère gratitude à mon directeur de recherche, le professeur Sergio Rossi, pour la confiance qu'il m'a accordée, d'abord en tant que stagiaire, puis en tant qu'étudiant à la maîtrise sous sa direction. Son engagement exceptionnel envers la recherche, son soutien constant et ses encouragements ont été inestimables. Je souhaite également remercier mon co-directeur, le professeur Guillaume de Lafontaine, pour sa disponibilité et ses conseils précieux, même à distance.

Je tiens également à exprimer ma gratitude à mes collègues de recherche pour leur soutien pendant mon travail sur le terrain et leur assistance technique précieuse lorsque j'en avais besoin. Un grand merci à Sara Kurokawa pour sa patience dans l'enseignement des processus biologiques et pour la révision de mes projets, toujours faite avec une grande empathie, ainsi qu'à Roberto Silvestro pour ses commentaires constructifs et recommandations.

Je remercie également les propriétaires fonciers, tant publics que privés, pour nous avoir permis l'utilisation de leurs terres, ainsi que les organismes gouvernementaux pour leur soutien financier tout au long de mes activités académiques au Québec.

Pour conclure, je souhaite exprimer ma gratitude à Samuel Côté et à sa famille pour leur soutien, leurs enseignements, leur hospitalité et, surtout, leur amour tout au long de mon heureux séjour au Québec. Grâce à vous, mes journées sont plus lumineuses et chaleureuses, même durant les jours les plus froids de l'hiver.

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Le sirop d'érable représente l'Amérique du Nord non seulement sur le plan culturel, mais il contribue également de manière significative à son économie. En 2023, le Canada était responsable de 71 % de la production mondiale de sirop d'érable, tandis que les États-Unis en produisaient 29 %, ce qui fait de ces deux pays les seuls à produire du sirop d'érable à l'échelle commerciale (Agriculture et Agroalimentaire Canada 2024). En 2023, la province de Québec a assuré 89,9 % de la production canadienne, concentrant ainsi la majeure partie de celle-ci. En 2022, une récolte importante de 95,7 millions de kilos de sirop d'érable a été produite au Québec (1,93 kilo par entaille), suivie d'une baisse en 2023, avec 56,2 millions de kilos (1,10 kilo par entaille). Cependant, 2024 a marqué une augmentation impressionnante, avec une production atteignant 108,4 millions de kilos de sirop d'érable (Fédération des producteurs acéricoles du Québec 2024).

La fabrication des produits de l'érable débute par l'extraction de la sève, tirée principalement de trois espèces d'érables: l'érable à sucre (*Acer saccharum*), l'érable rouge (*Acer rubrum*) et l'érable noir (*Acer nigrum*) (Ramadan *et al.* 2021). Les érables à sucre et les érables noirs sont préférés en raison de leur teneur élevée en sucre, ce qui peut réduire les coûts de production et augmenter les profits. Les érables rouges sont couramment trouvés dans l'est des États-Unis et le sud-est du Canada. Bien qu'il soit communément admis que les périodes d'exsudation de sève des érables rouges diffèrent de celles des érables à sucre, ce sujet n'a pas été largement étudié dans la littérature existante. Bien qu'ils aient généralement une teneur en sucre plus faible que les érables à sucre, leur abondance élevée et leur grande adaptabilité à différentes conditions environnementales les rendent importants pour l'industrie de l'érable et particulièrement précieux face aux changements climatiques (Matthews et Iverson 2017). De plus, les érables rouges en production peuvent

éventuellement produire des rendements de sève plus élevés avec une teneur en sucre similaire à celle des érables à sucre grâce à une forte variation entre les individus (Perkins *et al.* 2022).

Traditionnellement, la récolte de la sève se déroule à l'hiver et au printemps, généralement de février à mai. Aujourd'hui, les érables sont entaillés chaque année à l'aide d'une perceuse, et un chalumeau est inséré dans l'entaille. Lorsque la sève s'écoule, elle passe à travers un système de tubulure utilisant soit la gravité, soit la pression à vide. Ensuite, la sève est recueillie dans un réservoir et transportée à la cabane à sucre, où elle est filtrée puis bouillie dans un évaporateur pour concentrer les sucres et produire ainsi du sirop d'érable. Une grande partie des producteurs d'érable de taille moyenne et grande utilisent des équipements modernes dans leurs érablières, tels que des systèmes d'osmose inverse pour accélérer le processus de concentration par ébullition du sirop, ainsi que des systèmes de collecte sous vide pour augmenter les rendements de sève. Les petits producteurs, qui préfèrent généralement investir modérément dans la technologie ou qui n'ont pas une exploitation d'érable rentable, choisissent de maintenir le système de collecte par gravité.

Après l'obtention du sirop d'érable final souhaité, une partie des produits est versé dans des barils et envoyé pour inspection en laboratoire. Au Québec, le sirop d'érable est soumis à des tests de qualité rigoureux visant à évaluer ses différentes caractéristiques, faisant de la province la seule juridiction au monde à posséder son propre système d'évaluation de la qualité (PPAQ 2024). Ensuite, les sirops sont classés en quatre catégories, différenciées par leur goût, leur couleur et d'autres qualités spécifiques. Singh *et al.* (2014) ont évalué les propriétés de divers sirops d'érable commerciaux produits en Ontario, au Canada, et ont conclu que les sirops plus foncés contiennent généralement davantage de propriétés

bénéfiques, ce qui les rend intéressants pour une utilisation potentielle dans le développement d'aliments fonctionnels. De plus, les inspecteurs vérifient la teneur en sucre à l'aide d'un réfractomètre, afin de s'assurer que seuls les sirops d'érable à 100 % de pureté sont autorisés à la vente, avec une teneur en sucre de 66–68.9 % (PPAQ 2021). Le processus d'inspection inclut également une dégustation et des tests pour détecter des traces de plomb. Si le produit respecte ces normes de qualité strictes, il est ensuite pasteurisé, transféré dans un nouveau baril et entreposé en tant que réserve stratégique. Cette réserve contribue à maintenir un approvisionnement constant sur le marché et à stabiliser le prix du produit.

Les acériculteurs ont toujours été à la recherche de nouvelles techniques pour améliorer la rentabilité de leurs opérations. Des études antérieures ont porté sur divers outils développés par l'industrie acéricole, toujours utilisés aujourd'hui, tels que les tubulures en plastique (Laing *et al.* 1960), les désinfectants pour les entailles et les combustibles pour l'évaporation de la sève (Laing *et al.* 1962). D'autres études, principalement dans la littérature grise, ont également exploré l'importance de la collecte sous vide (Yawney 1977; Isselhardt *et al.* 2016), les niveaux de vide (Walters et Smith 1975; Wilmot *et al.* 2007), et les comparaisons du rendement de sève avec le système de collecte par gravité (Smith et Gibbs 1970).

Une meilleure compréhension des facteurs influençant la coulée de la sève permettrait de réduire les variations annuelles de la production totale de sirop d'érable et d'assurer ainsi la rentabilité et la pérennité des exploitations acéricoles pour les prochaines décennies. Les premières études ont démontré un lien entre la production de sève et les facteurs climatiques, en particulier les températures minimales et maximales journalières de l'air pendant la saison des sucres (Plamondon 1977; Kim et Leech 1985). Une étude récente suggère toutefois que

des rendements plus élevés en sirop d'érable peuvent être associés à des étés plus chauds et à des saisons de croissance plus sèches l'année précédente, ainsi qu'à une meilleure résistance au froid en hiver (Duchesne et Houle 2014).

Des études antérieures ont fait état de températures moyennes annuelles plus élevées au Canada au cours des dernières décennies, et les projections indiquent un scénario climatique plus chaud pour la province de Québec au cours des prochaines décennies (Vincent *et al.* 2015; Intergovernmental panel on climate change 2021). De plus, les phénomènes météorologiques extrêmes tels que les tempêtes de verglas et les sécheresses, qui ont un impact direct sur la gestion des érablières, sont de plus en plus fréquents au Québec et aux États-Unis (Moreau *et al.* 2020; Perkins *et al.* 2022). Ces altérations des patrons de température et des régimes de précipitations peuvent affecter la capacité concurrentielle de l'érable à sucre par rapport à d'autres espèces. Certaines études ont également simulé la migration potentielle de l'érable vers le nord. Cependant, ce déplacement ne pourra se réaliser que si les sols sont propices au développement de l'érable. Si les conditions édaphiques sont favorables, cette dynamique pourrait modifier les compositions forestières, impacter la biodiversité et affecter la production de sirop d'érable en raison de l'évolution de l'adéquation des habitats (Hart *et al.* 2014; Ren *et al.* 2021).

Dans le contexte du réchauffement climatique, les périodes de production de sève (c.-à-d., le début et la fin de la saison d'exsudation de la sève) peuvent être affectées (Skinner *et al.* 2010). Plusieurs études ont utilisé les relevés annuels des jours d'écoulement du sirop d'érable et de la sève, ainsi que des projections climatiques, pour estimer le calendrier de la saison des sucres dans les décennies à venir. En général, les modèles prédictifs ont estimé un avancement de la saison des sucres pour les prochaines décennies (Duchesne *et al.* 2009;

Houle *et al.* 2015). Aujourd'hui, les acériculteurs sont de plus en plus incertains quant au meilleur moment d'entailler leurs érables (Caughron *et al.* 2021). Cette imprévisibilité rend difficile la planification de rendements constants et nécessite des adaptations aux nouveaux calendriers d'entailage, ainsi que des investissements supplémentaires en technologie et en main-d'œuvre. De plus, si la saison des sucres est raccourcie par des températures moyennes plus chaudes, la quantité totale de sève collectée pourrait être réduite, avec des conséquences potentielles sur la rentabilité des exploitations acéricoles. Par conséquent, cette recherche se concentre sur l'évaluation du calendrier de la saison de récolte en cas de réchauffement climatique afin d'atténuer les incertitudes liées aux processus écophysologiques de la coulée de la sève et aux pressions exercées sur les producteurs par le changement climatique. D'autres études de ce type pourraient aider à développer de nouvelles stratégies d'adaptation nécessaires pour assurer la durabilité économique de l'industrie du sirop d'érable et la santé à long terme des érablières.

CHAPITRE 1

ÉVALUATION DU CALENDRIER DE LA SAISON DES SUCRES DE L'ÉRABLE DANS UN CONTEXTE DE RÉCHAUFFEMENT CLIMATIQUE

(Soumis pour publication, en anglais)

Auteurs:

**Gian de Lima Santos^{1*}, Roberto Silvestro¹, Sara Yumi Sassamoto Kurokawa¹,
Guillaume de Lafontaine², Sergio Rossi¹**

Affiliations:

¹Laboratoire sur les écosystèmes terrestres boréaux, Département des Sciences Fondamentales, Université du Québec à Chicoutimi, Saguenay, QC, Canada

²Chaire de recherche du Canada en biologie intégrative de la flore nordique, Département de biologie, chimie et géographie, Centre d'études nordiques, Centre de recherche forestière, Université du Québec à Rimouski, Rimouski, QC, Canada

* Auteur correspondant: Gian de Lima Santos - gdlimasant@etu.uqac.ca

1.1. Résumé

Les fluctuations quotidiennes de température déclenchent des processus physiques et métaboliques dans le xylème, influençant la période et le rendement de la sève d'érable. Cette étude évalue la dynamique de la sève récoltée en examinant les effets des températures moyennes mensuelles et des cycles de gel-dégel avant et pendant la saison des sucres. Un modèle prédictif a été développé pour estimer la temporalité de la coulée de la sève d'érable dans des scénarios de réchauffement futur au Québec, Canada. Les températures moyennes mensuelles de l'air et la récolte quotidienne de sève ont été mesurées sur quatre sites d'étude en 2022 et 2023, en utilisant des pluviomètres et des capteurs de températures pour simuler une récolte de sève par gravité. La durée de la saison des sucres était cohérente au sein des sites et entre les sites, avec une répartition similaire des journées très productives d'un site à l'autre. Les rendements de sève variaient de 9,3 à 23,8 litres en 2022 et de 3,8 à 13,6 litres en 2023. Des cycles de gel-dégel se sont produits dans 64 % des jours où la sève était exsudée. Le modèle de réseau neuronal a prédit qu'une augmentation des températures moyennes mensuelles de 2 °C avancerait le début de la saison des sucres de 17 jours et la fin de 13 jours. Tout décalage entre le moment de la récolte et les conditions météorologiques favorables peut réduire considérablement le rendement de la sève. En raison du réchauffement climatique, les producteurs devront réajuster progressivement le calendrier de leurs activités et de l'entaille pour s'adapter au déplacement de la saison des sucres dans le contexte de réchauffement climatique.

Mots-clés : Sirop d'érable, *Acer saccharum*, coulée de sève, cycles de gel-dégel, changement climatique.

1.2. Introduction

Le Canada possède la plus grande industrie de sirop d'érable au monde, représentant à la fois un important secteur productif et un patrimoine culturel pour les communautés locales. En 2022, le pays a atteint 78 % de la production mondiale de sirop d'érable. La province de Québec en était le principal producteur, représentant 92 % de la production canadienne (Agriculture et Agroalimentaire Canada 2023). La chaîne de production commence par l'extraction de la sève des érables. Cette activité saisonnière se déroule de la fin de l'hiver au début du printemps, lorsque les températures fluctuent autour du point de congélation de l'eau, entraînant des cycles de gel-dégel (Tyree et Zimmermann 2002). Ces changements environnementaux quotidiens déclenchent des processus physiques et métaboliques au sein du xylème, influençant le mouvement de la sève le long de la tige. L'augmentation des températures provoque l'expansion des gaz dans les tissus et génère une pression osmotique par le mouvement de l'eau dans les vaisseaux et les fibres du bois (Graf *et al.* 2015; Schenk *et al.* 2021). Lorsque les températures se réchauffent au printemps, la fréquence des cycles de gel-dégel diminue, ce qui entraîne une baisse du nombre de jours productifs à la fin avril et au début de mai, jusqu'à l'arrêt complet de l'exsudation de sève et à la réactivation des fonctions du xylème (Perkins *et al.* 2022).

La coulée de la sève est influencée par plusieurs facteurs endogènes et environnementaux, tels que les caractéristiques de l'arbre (p. ex., taille et vigueur), l'espèce, les caractéristiques du site (p. ex., type de sol, densité et fertilité) et les activités de gestion (p. ex., historique de l'entaille, système de tubulure) (Dey *et al.* 2017; Perkins *et al.* 2022; Rademacher *et al.* 2023). Néanmoins, la variation de la température journalière est reconnue comme l'un des principaux facteurs de la saison des sucres et de la production de sève. Des études antérieures

ont établi un lien entre les conditions climatiques et le rendement de sève, la température maximale journalière de l'air pendant la saison des sucres ayant été identifiée comme un facteur significatif (Kim et Leech 1985). Plamondon (1977) a observé que des facteurs tels que la température minimale de l'air et le différentiel de température entre les températures minimales et maximales jouent un rôle crucial dans la dynamique du rendement de sève. Duchesne *et al.* (2009) ont rapporté que la variation du rendement de sirop d'érable entre 1985 et 2006 au Québec était expliquée par les températures de janvier à avril. De plus, Duchesne et Houle (2014) ont suggéré que le rendement est également influencé par les températures minimales quotidiennes en hiver ainsi que par les conditions plus chaudes et plus sèches de l'été précédent. Les auteurs indiquent que ces facteurs peuvent résulter de l'accumulation de sucres solubles dans les racines pendant l'hiver, un élément crucial du cycle de conversion du sucre en amidon. De plus, des étés chauds peuvent favoriser des taux de croissance radiale plus élevés chez les érables, ce qui peut contribuer à une augmentation de la teneur en sucre de la sève.

Il existe des preuves d'une augmentation significative des températures mondiales. Au Canada, la température annuelle moyenne a augmenté de 1,7 °C entre 1948 et 2012, et les projections indiquent des augmentations encore plus importantes pour l'avenir (Vincent *et al.* 2015; Intergovernmental panel on climate change 2021). Selon le scénario d'émissions RCP8.5, et en l'absence de mesures d'atténuation, la température moyenne annuelle au Québec devrait augmenter de 3,5 °C d'ici 2050 (Ouranos 2015). Puisque la température joue un rôle prépondérant dans la détermination des périodes de circulation de la sève et du rendement, nous nous attendons à ce que ces conditions climatiques anticipées influencent la dynamique phénologique des érables à sucre (Guo *et al.* 2020), entraînant une saison des sucres plus précoce (Skinner *et al.* 2010; Houle *et al.* 2015).

L'impact du climat futur sur la production de sève devient une préoccupation majeure des producteurs de sirop d'érable. Pour cette raison, les producteurs ont déjà apporté ou prévoient d'apporter des modifications à la gestion de leur exploitation (Kuehn *et al.* 2017; Legault *et al.* 2019). Cependant, le manque de connaissances sur l'impact du changement climatique sur le calendrier de la saison des sucres soulève des questions quant au meilleur moment pour l'entaillage (Caughron *et al.* 2021). Les producteurs souhaitent également améliorer les méthodes de récolte afin de maintenir un rendement soutenu et homogène, malgré la grande variabilité interannuelle des conditions climatiques optimales pour l'écoulement de la sève (Ahmed *et al.* 2023). Afin d'atténuer les effets négatifs potentiels sur leur production, la plupart des producteurs sont prêts à développer des stratégies d'adaptation au changement climatique basées sur une connaissance plus approfondie des mécanismes physiologiques des érables et sur des technologies innovantes d'extraction de la sève qui garantissent la santé à long terme des arbres (Ahmed *et al.* 2023). Toutefois, l'adoption de nouvelles stratégies dépend largement de l'échelle de production. En effet, les producteurs à grande échelle sont plus enclins à adopter de nouvelles stratégies et expriment moins d'inquiétudes quant à une meilleure rentabilité et au capital disponible pour investir, par rapport aux producteurs à petite et moyenne échelle (Caughron *et al.* 2021). Actuellement, la plupart des moyennes et grandes exploitations acéricoles rentables ont mis en œuvre des technologies, notamment des systèmes de tubulure sous vide, tandis qu'un très grand nombre de producteurs, généralement de petite taille, recueillent encore la sève d'érable selon le système de tubulure par gravité.

Des prévisions de production de sève et de sirop pour les prochaines décennies ont été réalisées afin de mieux comprendre les effets du changement climatique sur l'industrie acéricole. Par exemple, Duchesne *et al.* (2009) ont combiné les statistiques des rendements

annuels de sirop au Québec avec les enregistrements climatiques quotidiens pour projeter les futurs rendements de sève et les périodes optimales de production de sève en 2050 et 2090. Skinner *et al.* (2010) ont utilisé les jours d'écoulement de la sève dans le nord-est des États-Unis et les projections climatiques futures à l'aide de divers scénarios d'émissions pour estimer les périodes de production de sève d'ici 2100. De même, Houle *et al.* (2015) ont évalué le rendement en sirop dans plusieurs régions du Québec et ont projeté les calendriers futurs de rendement au cours des années 2046–2065 et 2081–2100 en fonction de scénarios climatiques mondiaux. Dans l'ensemble, ces études ont prédit une plus grande fréquence d'années avec une courte saison des sucres pour les prochaines décennies, en particulier dans le sud du Québec.

La plupart des études susmentionnées se sont concentrées sur les chronologies des rendements annuels et hebdomadaires. Ces statistiques comportent plusieurs sources d'erreurs potentielles, notamment l'évolution des systèmes d'entailage, l'introduction de nouvelles technologies d'extraction de la sève, ainsi que les deux principales espèces d'érable impliquées dans la production de sirop. Notre étude examine l'impact des scénarios climatiques futurs sur le calendrier de production de la sève d'érable au Québec, Canada, afin de (1) décrire les périodes quotidiennes de production de la sève et les rendements associés ; (2) analyser les relations entre les périodes de production et les températures ; et (3) construire et appliquer un modèle pour prédire la période et la durée de la saison des sucres dans un contexte de réchauffement climatique. Nous émettons l'hypothèse que le réchauffement climatique entraîne une réactivation plus précoce de l'érable au printemps, affectant ainsi les périodes de production de sève.

1.3. Matériel et méthodes

1.3.1. Localisation et caractéristiques des sites d'étude

Quatre sites d'étude ont été sélectionnés à L'Anse-Saint-Jean (ASJ), Laterrière (LAT), Rivière-à-Pierre (RAP) et au Parc national des Monts-Valin (PMV), à la limite nord de la production de sève au Québec, Canada (Figure 1). Le site de RAP ($46,91^{\circ}\text{N}$, $72,03^{\circ}\text{O}$) est le plus méridional. Il se situe dans la sous-zone de la forêt feuillue, appartenant au domaine bioclimatique de l'érable à tilleul. ASJ ($48,11^{\circ}\text{N}$, $70,13^{\circ}\text{O}$), LAT ($48,28^{\circ}\text{N}$, $71,14^{\circ}\text{O}$) et PMV ($48,58^{\circ}\text{N}$, $70,86^{\circ}\text{O}$) se trouvent dans la sous-zone de la forêt mixte. Ces sites appartiennent au domaine bioclimatique de la sapinière à bouleau jaune, avec un climat continental frais typique, des hivers longs et froids et des étés doux et humides.

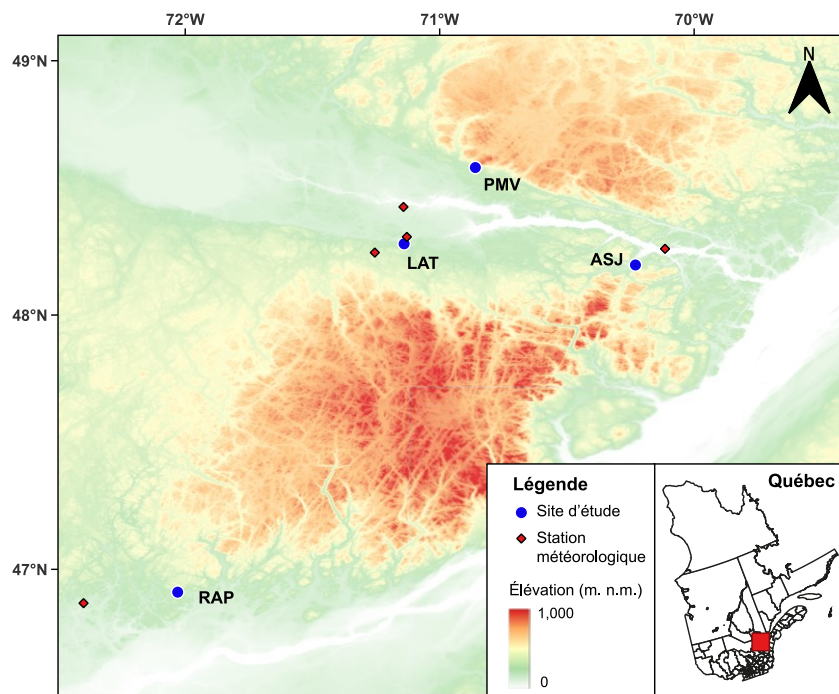


Figure 1. Localisation des quatre sites d'étude (point bleu) et des stations météorologiques (losange rouge) dans la zone de distribution septentrionale de l'érable à sucre au Québec, Canada.

1.3.2. Collecte de données

En 2022 et 2023, nous avons installé de façon aléatoire des pluviomètres (HOBO Data Logging Rain Gauge RG3-M, Bourne, MA) sur deux érables à sucre adultes sains (*Acer saccharum* Marsh.) par site (Tableau 1). L'équipement a été installé au début du mois de février, avant les cycles de gel-dégel et la saison des sucres, puis retiré à la mi-mai, une fois la saison de production de sève terminée. Un pluviomètre installé en 2023 à ASJ a rencontré des problèmes techniques et n'a pas pu recueillir de données. Cet érable n'a donc pas été inclus dans les analyses ultérieures.

Table 1. Le diamètre à hauteur de poitrine (DHP) et la hauteur des érables à sucre étudiés en 2022 et 2023.

Site d'étude	DHP (cm)	Hauteur des arbres (m)
RAP	34	7.5–8
LAT	29–37	15
PMV	16–22	10–18
ASJ	28–33	9–10

Pour installer les pluviomètres, nous avons réalisé une entaille d'environ 5 cm de profondeur sur le tronc à l'aide d'une perceuse aseptisée, puis nous y avons inséré une nouvelle tubulure en plastique, simulant ainsi un entailage traditionnel par gravité. En 2023, les arbres ont été entaillés du côté opposé, ce qui a permis d'éviter les blessures liées à l'entaille précédente et de réduire l'interférence potentielle dans la production de sève. La partie supérieure des pluviomètres était protégée par un couvercle scellé afin d'éviter toute obstruction due à la neige, aux feuilles ou aux animaux. La sève s'écoulait à travers le tube dans le pluviomètre, qui fonctionnait comme un collecteur en forme d'entonnoir. À l'intérieur de l'appareil, l'eau de sève était drainée dans un petit seau (2,83 ml), qui basculait

lorsqu'il était rempli de sève, déversant le contenu hors du pluviomètre et se remettant en place pour la mesure suivante. Le volume de sève a été mesuré en comptant le nombre de fois que le seau s'est renversé pendant une période déterminée, établie dans cette étude sur une échelle horaire et cumulée à une échelle quotidienne. Les mesures ont été transmises à un enregistreur de données qui a enregistré l'heure exacte du basculement, la quantité de sève collectée et la température de l'air. Afin de maintenir la précision des mesures, chaque équipement a été calibré et désinfecté avant chaque saison d'érable.

Les données climatiques ont été extraites des archives du Gouvernement du Canada (Government of Canada 2024) de novembre à mai 2021 à 2023 afin d'obtenir les températures quotidiennes des mois précédant et suivant la saison des sucres, lorsque l'équipement n'était pas installé. Nous avons sélectionné les stations météorologiques les plus proches de chaque site d'étude: Lac aux sable (46,86°N, 72,40°O; 29 km de RAP), Laterrière (48,30°N, 71,12°O; 3 km de LAT), Pointe Claveau (48,26°N, 70,11°O; 17 km de l'ASJ) et Jonquière (48,42°N, 71,14°O; 27 km de PMV).

1.3.3. Analyse des données et statistiques

Pour chaque site, une régression logistique quadratique a été effectuée pour prédire les périodes de production de sève pour chacune des deux années étudiées. La production de sève a été convertie en valeurs binaires indiquant la présence ou l'absence de production quotidienne de sève. Chaque modèle, par année et par site, ne comprenait que le jour de l'année (DOY, de l'anglais *day of the year*) comme seul prédicteur. En raison du faible nombre d'observations, les mesures de la production de sève ont été séparées en un ensemble d'entraînement (80 %) et un ensemble de test (20 %) afin d'évaluer la performance du modèle. Nous avons également appliqué une validation croisée 5 fois comme méthode de

rééchantillonnage pour l'évaluation du modèle. En utilisant l'ensemble de test, nous avons choisi comme seuil optimal, dans la courbe ROC (de l'anglais *receiver operating characteristic*), celui qui représente le mieux la relation entre le taux de vrais positifs (sensibilité) et le taux de faux positifs. Nous avons calculé la moyenne des seuils optimaux afin d'utiliser la même valeur pour toutes les régressions.

Nous avons effectué des régressions par machine à vecteurs de support pour prédire les températures des enregistreurs de données spécifiques au site pour la période précédente et suivante à la saison des sucres lorsque le pluviomètre a été désinstallé. Ces modèles peuvent être efficaces pour traiter les relations non linéaires entre les températures (voir par exemple Yalavarthi et Shashi 2009). Nous avons utilisé les températures minimales et maximales collectées par les stations météorologiques comme prédicteurs. Nous avons séparé les chronologies en un ensemble d'entraînement (70 %) et un ensemble de test (30 %) afin d'évaluer la capacité de généralisation du modèle à de nouvelles données et d'évaluer les performances du modèle. Nous avons appliqué une validation croisée à 10 blocs (de l'anglais *10-fold cross-validation*) avec 5 répétitions comme méthode de rééchantillonnage en raison de la faible quantité de données par site et par année (53–87 observations) afin de garantir des mesures de performance plus fiables et plus robustes. La qualité de l'ajustement des modèles de régression a été évaluée à l'aide du coefficient de détermination (R^2) pour l'ensemble d'apprentissage et d'essai afin de déterminer la capacité du modèle à capturer la variance de la température et l'erreur quadratique moyenne (RMSE) pour mesurer la précision des prédictions.

Nous avons calculé les températures mensuelles moyennes minimales et maximales pour l'ensemble des sites et des années en utilisant les températures journalières estimées par les régressions par machine à vecteurs de support. Nous avons ensuite utilisé des régressions

pour tester la relation entre les températures mensuelles (variables explicatives) et le début et la fin de la production de sève (variables de réponse). Nous avons obtenu le coefficient de détermination pour évaluer l'ajustement de chaque modèle, et nous avons comparé visuellement la gamme de températures à travers les mois et l'influence des températures minimales et maximales sur les périodes de production de sève.

Un modèle de réseau neuronal a été réalisé pour estimer les périodes de production de sève en utilisant les températures mensuelles moyennes comme données d'entrée. Nous avons appliqué le modèle final à des scénarios de températures mensuelles augmentant de 0 à 2 °C pour estimer les périodes de production de sève dans un contexte de réchauffement climatique, tout en étant capable de s'adapter à de nouveaux modèles de données. Nous avons séparé les observations en ensemble d'entraînement et en ensemble de validation, mais en raison du faible volume, nous n'avons utilisé qu'une seule observation pour la validation. La performance du modèle a été évaluée à l'aide du coefficient de détermination pour la formation et les résidus. La plupart des analyses statistiques ont été effectuées en R (R Core Team 2022) en utilisant les bibliothèques *caret* (Kuhn 2008) et *pROC* (Robin *et al.* 2011). Le modèle de réseau neuronal a été réalisé à l'aide de JMP Pro 17.0 (SAS Institute Inc. 2022).

1.4. Résultats

1.4.1. Temporalité de la production de sève et saison des sucres

Les régressions logistiques quadratiques ont permis d'estimer les dates de début et de fin de la saison des sucres sur la base de l'occurrence quotidienne de production de sève pour chaque site d'étude et chaque année (Figure 2). La précision de l'ensemble d'apprentissage et le coefficient Kappa de Cohen étaient respectivement de 0,74 à 0,90 et de 0,24 à 0,75. Le seuil a été établi à l'aide de l'ensemble de test en fonction du seuil supérieur gauche le plus proche dans la courbe ROC et a été moyenné et fixé à 35 % pour toutes les régressions. Nous avons observé un début plus précoce en 2023 (DOY 72–90) qu'en 2022 (DOY 80–93). Les durées estimées de la saison des sucres en 2022 et 2023 étaient respectivement de 35–41 et 32–39 jours. Bien que les jours de forte production se produisent au même moment dans les différents sites, nous avons observé une différence dans le début et la fin de la saison des sucres entre les arbres d'un même site.

À RAP, le site le plus méridional, la production de sève a eu lieu de la fin mars à la fin avril (DOY 80–120, 41 jours) en 2022 et, 8 jours plus tôt en 2023, du début mars à la mi-avril (DOY 72–110, 39 jours) en 2023. À l'ASJ, la production de sève a commencé au début du mois d'avril en 2022 (DOY 93–127, 35 jours) et 14 jours plus tôt à la mi-mars 2023 (DOY 79–110, 32 jours). Le site de LAT a eu le même début de production à la fin mars, avec une durée plus longue en 2022 (DOY 90–128, 39 jours) par rapport à 2023 (DOY 90–123, 34 jours). À PMV, le site le plus septentrional, la production de sève a commencé à la fin mars 2022 (DOY 85–129, 45 jours) et a duré 10 jours de moins en 2023, avec un début à la mi-mars (DOY 79–113, 35 jours). En moyenne, la production de sève a commencé environ 7 jours plus tôt et a duré 7 jours de moins en 2023.

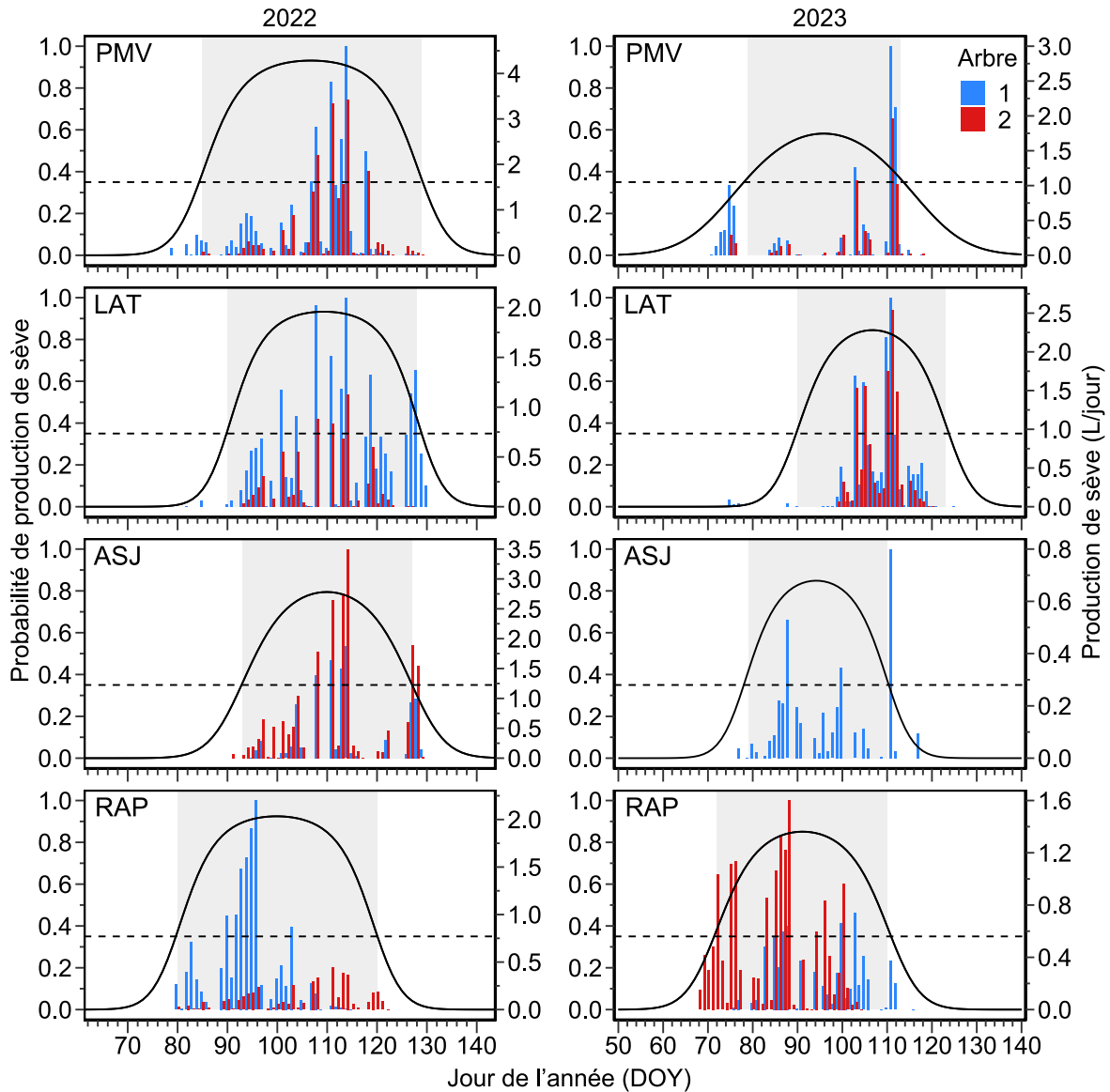


Figure 2. Production de sève (L/jour) et probabilité de production au printemps 2022 et 2023 sur quatre sites d'étude au Québec, Canada. La ligne pointillée et la zone grise représentent respectivement le seuil choisi et les dates prédites de la production de sève.

1.4.2. Production de sève

Par rapport à 2022, nous avons observé une augmentation de la production annuelle de sève pour les deux arbres combinés d'environ 22 % à RAP (de 9,28 à 11,4 litres) et une diminution de 65 % à PMV (de 23,8 à 8,35 litres) en 2023 (Figure 3). Nous rapportons une

augmentation de moins de 1 % à LAT (de 13,5 à 13,6 litres) et une diminution de 75 % à ASJ (de 15,6 à 3,8 litres) entre 2022 et 2023. Le schéma quotidien de la production de sève présentait de nombreux jours avec une faible production de sève et quelques jours très productifs. Sur l'ensemble des sites et des années, les 50^e et 75^e percentiles de la production quotidienne de sève étaient respectivement de 80 à 364 ml et de 175 à 923 ml. En outre, les jours où la production de sève est inférieure à 100 ml ne représentent que 2 à 21 % de la production totale de sève. Seuls les jours occasionnels et très productifs ont enregistré un rendement de sève > 2 l. La production de sève cumulée a confirmé le synchronisme des jours productifs, bien qu'avec des quantités de sève différentes.

Nous avons considéré que des cycles de gel-dégel se produisaient lorsque la température nocturne (minimale) était < -1 °C et la température diurne (maximale) était > 3 °C. En moyenne, des cycles de gel-dégel se sont produits dans 64 % des jours de production de sève, c'est-à-dire lorsque la production quotidienne de sève était > 3,73 ml. Pour les productions quotidiennes > 100 ml et > 1 l, des cycles de gel-dégel se sont produits dans 72 et 94 % des jours pendant la saison des sucres, respectivement. Lorsque la production de sève s'est produite sans épisode de cycle de gel-dégel (36 % des jours), les températures minimales et maximales moyennes étaient de 0 °C et 11 °C, respectivement.

En moyenne, les jours de production de sève se sont produits avec des températures journalières minimales et maximales de -3,0 et 11,8 °C, respectivement. Sur la base des 10 jours les plus productifs sur l'ensemble des sites et des années, les températures journalières minimales étaient comprises entre -13 et 6,8 °C et les températures journalières maximales entre 0 et 24 °C. Les jours de la saison des sucres sans écoulement de sève se sont produits avec une température minimale de -4,6 °C (intervalle entre -18 et 5 °C) et une température maximale de 4,9 °C (intervalle entre -8 et 23 °C).

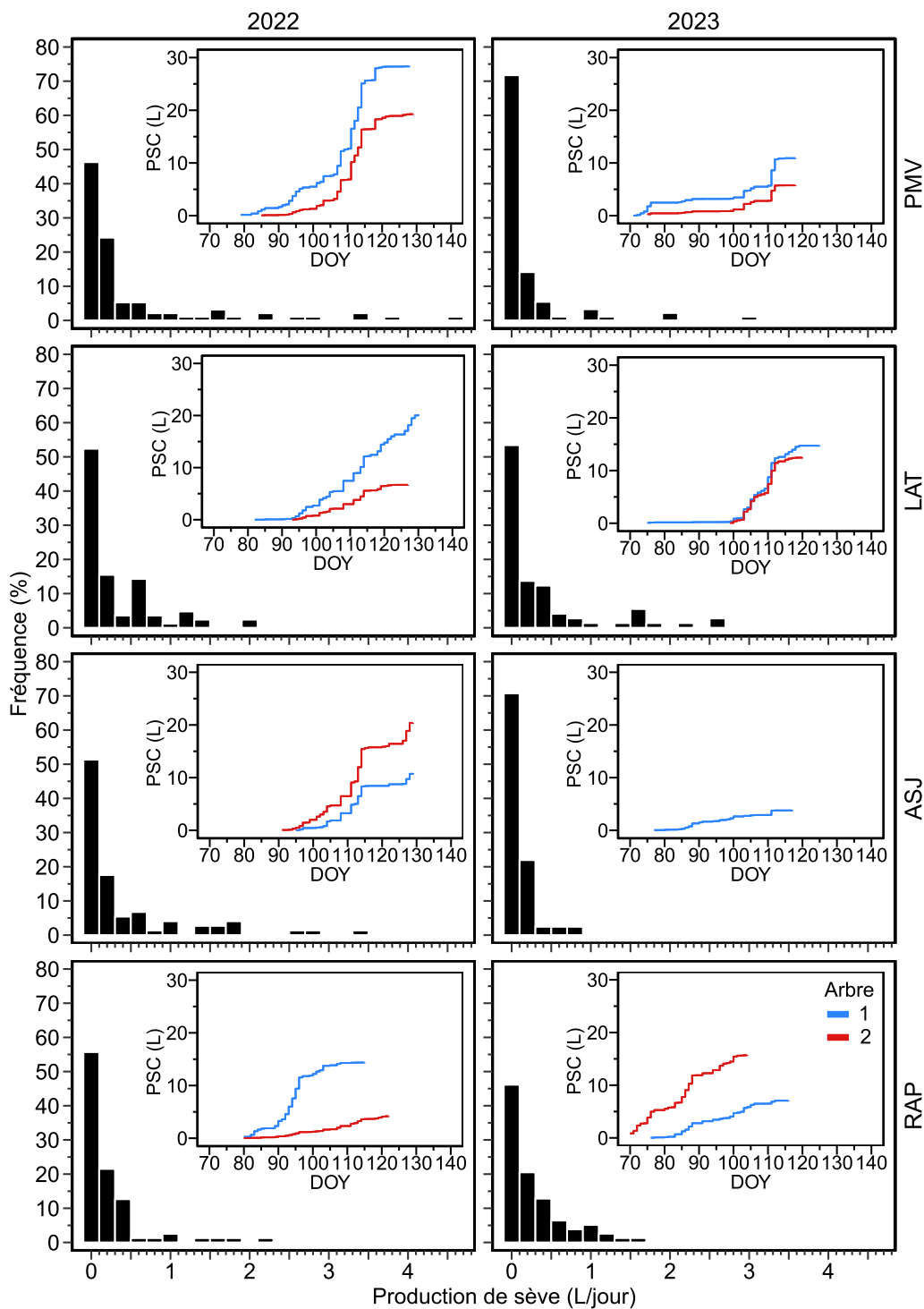


Figure 3. Distribution de la production journalière de sève et production de sève cumulée (PSC) pendant les saisons des sucres 2022 et 2023 sur quatre sites d'étude au Québec, Canada.

1.4.3. Estimation des températures

Les modèles de machines à vecteurs de support estimant les températures quotidiennes dans les sites à partir des stations météorologiques ont produit des R^2 de 0,86–0,97 (entraînement) et de 0,78–0,97 (validation) pour les températures maximales. Pour les températures minimales, le R^2 était de 0,88–0,96 (entraînement) et de 0,85–0,97 (validation). Les estimations indiquent que les stations météorologiques peuvent estimer des températures fiables pour les périodes avant et après la production de sève dans les sites d'étude, lorsqu'aucun enregistreur de données n'a été installé sur le terrain.

Les premières gelées nocturnes sont apparues en octobre, pendant les deux années d'étude (Figure 4). Les températures maximales sont tombées en dessous de 0 °C fin novembre et mi-novembre en 2021 et 2022, respectivement. En décembre, les températures ont été plus froides en 2021 (de -15 à -3 °C) qu'en 2022 (de -8 à 0 °C). De même, janvier 2022 a connu des températures plus basses (de -26 à -13 °C) que janvier 2023 (de -14 à -3 °C). Pour les deux années, les températures de février ont été majoritairement négatives, comme prévu pour cette période au Québec. Les mois de mars et d'avril ont présenté des températures minimales négatives, mais des températures maximales positives. En mai, les températures ont généralement été supérieures au point de congélation. Chaque année, la plupart des températures maximales quotidiennes sont restées au-dessus du point de congélation pendant toute la saison des sucres. En revanche, les températures minimales journalières étaient généralement inférieures à 0 °C et dépassaient le point de congélation pendant les derniers jours de la production de sève (fin avril-début mai).

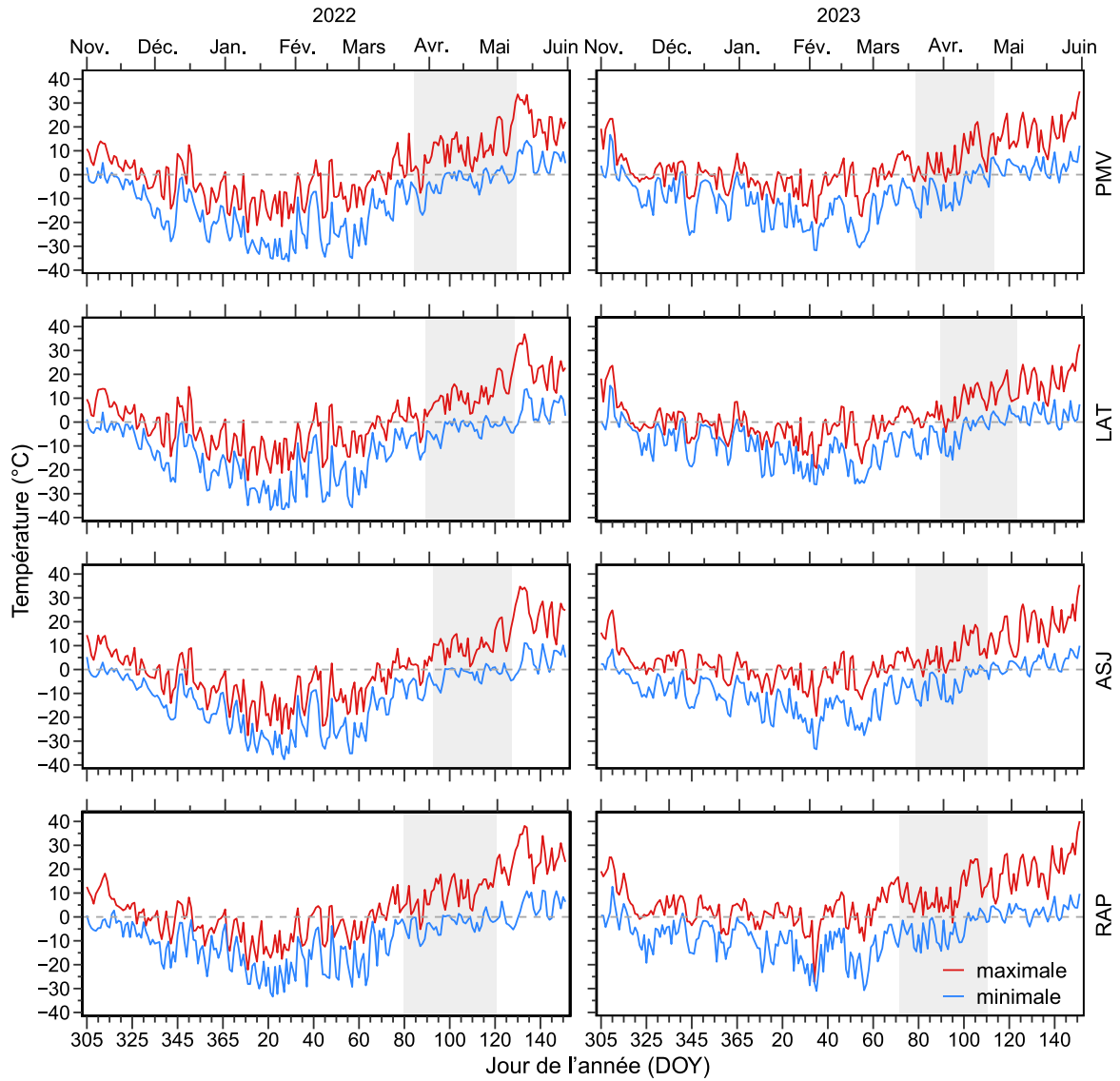


Figure 4. Les températures minimales et maximales de l'air prévues avant et pendant les saisons des sucres de 2022 et 2023, sur quatre sites d'étude au Québec, Canada. La zone grise indique les périodes estimées de production de sève.

1.4.4. Régressions linéaires et réseaux neuronaux

Les régressions linéaires ont démontré que des températures mensuelles minimales et maximales plus chaudes avant et pendant la saison des sucres avancement les périodes de production de sève (Figure 5). Nous avons observé des relations significatives pour la plupart

des températures maximales ($p < 0,05$) et en janvier et mars pour les températures minimales. Les températures moyennes diffèrent d'une année à l'autre en janvier, avec des conditions plus froides et des saisons des sucres plus tardives observées en 2022. En avril, les modèles n'étaient significatifs que pour la température maximale.

L'analyse du réseau neuronal a produit un R^2 global de 0,94 (entraînement), avec des R^2 distincts de 0,85 et 0,82 pour le début et la fin de la saison des sucres, respectivement (Figure S1). Pour les températures moyennes mensuelles sur l'ensemble des sites et des années, notre modèle a estimé une saison des sucres s'étendant de fin mars à début mai (DOY 87–123), d'une durée de 37 jours (Figure 6). En augmentant la température de 2 °C, notre modèle de temporalité de la coulée de sève a estimé que le début de la saison était avancé de 2 à 17 jours et que la fin de la saison était avancée de 2 à 13 jours. La durée de la coulée de sève a donc augmenté de 4 jours sous l'effet d'une augmentation des températures, plus précisément de 37 jours lors de la première hausse (0,1 à 0,2 °C), puis de 41 jours avec une hausse de 1,9 à 2,0 °C. Les premières augmentations (0 à 0,5 °C) ont entraîné un avancement plus rapide de la saison des sucres, tandis que cet avancement a ralenti sous des augmentations de température plus élevées.

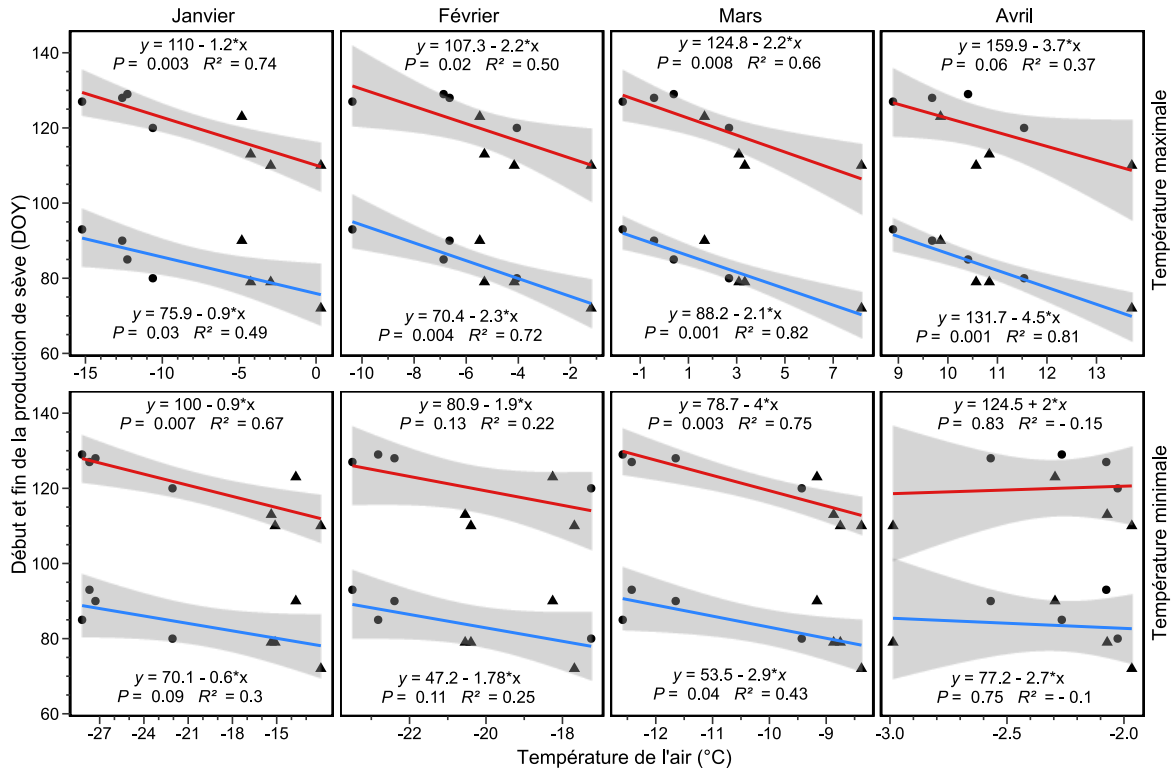


Figure 5. Régressions normales linéaires entre les températures minimales et maximales moyennes de l'air et les périodes de la production de sève (début en bleu et fin en rouge) en 2022 (symbole rond) et 2023 (symbole triangulaire). La zone grise représente l'intervalle de confiance à 95 %.

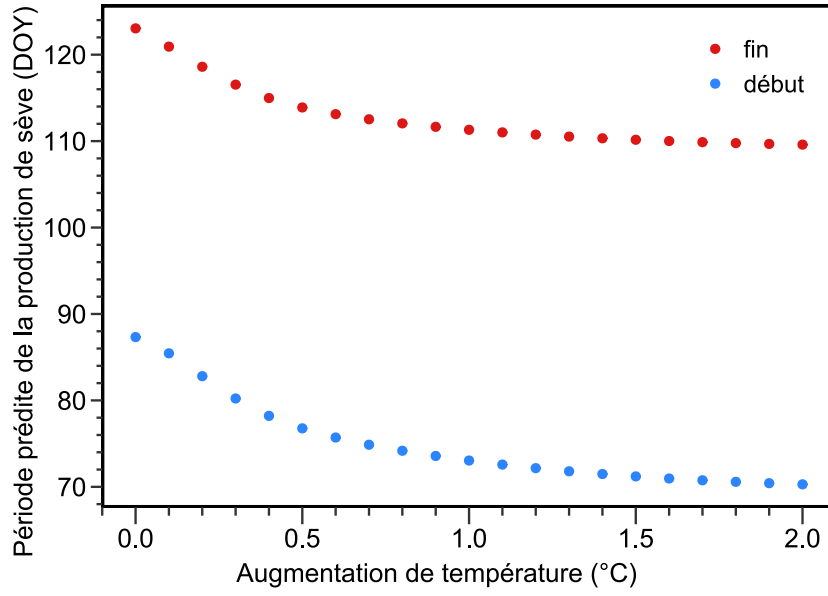


Figure 6. Périodes prédites de début et de fin de la production de sève obtenues par le modèle de réseau de neurones en fonction des augmentations de température, basées sur les températures minimales et maximales moyennes de l'air.

1.5. Discussion

Dans cette étude, nous avons examiné les relations entre les températures hivernales et printanières et les périodes de production de sève d'érable à sucre au Québec. Nous avons construit un modèle pour prédire la temporalité de la coulée de la sève dans des conditions de réchauffement, qui a permis d'estimer l'avancement du début et de la fin de la production de sève dans des conditions plus chaudes de janvier à avril. Nous avons estimé une avance de 17 et 13 jours sur le début et la fin de la saison des sucres, respectivement, sur la base d'une augmentation des températures mensuelles moyennes allant jusqu'à 2 °C. Ces résultats corroborent notre hypothèse selon laquelle le réchauffement des températures avance la réactivation de la croissance des érables, la réhydratation du xylème et, par conséquent, la période de production de sève.

1.5.1. Comparaison de la saison des sucres et du rendement

Par rapport à 2022, la production de sève en 2023 a commencé et s'est terminée respectivement 7 et 12 jours plus tôt, ce qui a entraîné une saison des sucres plus courte. Cet avancement de la période de coulée de la sève peut être associé aux températures plus élevées enregistrées au printemps 2023. Le site d'étude le plus au sud, RAP, a d'ailleurs présenté la production de sève la plus précoce au cours des deux années, un phénomène probablement lié au réchauffement printanier plus rapide au sud (Duchesne et Houle 2014). En revanche, la production de sève la plus tardive a été enregistrée à ASJ en 2022, probablement en raison de son altitude plus élevée et donc des températures plus froides par rapport aux autres sites d'étude.

Comparativement à 2022, le rendement de sève en 2023 a légèrement augmenté à RAP (+22 %) et LAT (+1 %), mais il a substantiellement diminué à PMV (-65 %) et ASJ (-75 %).

Cette forte diminution est en accord avec les statistiques fournies par les producteurs. En effet, le Canada a connu une saison productive en 2022, qui a été suivie d'une baisse de la production (-40 %) en 2023, soit la production la plus faible depuis 2018 (Agriculture et Agroalimentaire Canada 2023). L'année 2022 a été caractérisée par des températures hivernales basses, notamment en janvier. En moyenne, les températures minimales et maximales mensuelles moyennes en janvier 2022 étaient inférieures de 12,3 et 9,7 °C à celles de janvier 2023, respectivement. Duchesne *et al.* (2009) ont constaté que les températures moyennes de janvier représentaient 12 % de la variation des rendements annuels en sirop. En outre, Duchesne et Houle (2014) ont indiqué que la résistance au froid hivernal influençait la variabilité spatiale du rendement. Les sucres solubles qui s'accumulent dans la tige pendant l'hiver renforcent la résistance au gel des tissus en abaissant le point de congélation, réduisant ainsi la vulnérabilité au gel et aux dommages causés par les températures froides (Wong *et al.* 2003). Par conséquent, les températures froides peuvent avoir un effet positif sur l'accumulation de sucres pendant l'hiver et sur la qualité de la sève pendant la saison des sucres.

Nos résultats démontrent l'impact de la température hivernale sur la temporalité et le rendement de la coulée de sève. Ces résultats sont cruciaux pour les producteurs de sirop d'érable, car ils soulèvent des questions sur l'évolution de cette production dans le contexte du changement climatique. La tendance observée pendant la saison des sucres dans des conditions de réchauffement suggère la nécessité d'étudier plus en profondeur les changements potentiels en matière de rendement de sève. Pour répondre efficacement à cette question, la recherche devrait développer des modèles adaptés et spécifiques au site qui testent les conditions climatiques et environnementales locales.

1.5.2. Production de sève et épisodes de cycle de gel-dégel

Les cycles de gel-dégel quotidiens se sont produits pendant 65 % des jours de production. Si l'on considère exclusivement les jours de forte production (>100 ml et >1 l), la fréquence des cycles de gel-dégel quotidiens augmente à 72 et 94 %, respectivement. Ces résultats démontrent la relation étroite entre les cycles de gel-dégel quotidiens et la production de sève plus élevée, et confirment les résultats de Duchesne et Houle (2014), qui rapportent que la production de sève est mesurée dans 80 % des jours avec des cycles de gel-dégel. Les changements potentiels dans l'occurrence ou la fréquence des épisodes de cycles de gel-dégel induits par le climat plus chaud prévu pour les prochaines décennies pourraient affecter négativement le nombre de jours productifs et, par conséquent, le rendement de sève (Ho et Gough 2006; Skinner *et al.* 2010). Cependant, des prédictions contrastées sont proposées dans la littérature à ce sujet. Ho et Gough (2006) ne prévoient pas de modification substantielle du nombre des cycles de gel-dégel en cas de réchauffement futur. En conséquence, Skinner *et al.* (2010) ont estimé qu'il n'y aurait pas de différence dans le nombre de jours avec production de sève d'ici 2100 dans le nord-est des États-Unis. Dans notre étude, les jours avec production de sève et sans cycles de gel-dégel peuvent être liés à des périodes productives lorsque la production de sève se poursuit la nuit et se prolonge jusqu'au jour suivant (Perkins *et al.* 2022). Par conséquent, les acériculteurs peuvent profiter de ces productions prolongées et inattendues qui se produisent la nuit et maintenir le système de collecte sous vide en marche également pendant la nuit pour profiter d'une période prolongée de production de sève.

Dans la plupart des cas, nous avons enregistré une faible production de sève au début de la saison des sucres. Pendant cette période, il y a des intervalles de quelques jours avec des températures plus froides, ce qui entraîne l'absence des cycles de gel-dégel et, par

conséquent, l'absence de production de sève. Une pression positive s'installe après plusieurs cycles de gel-dégel (Tyree et Zimmermann 2002). En moyenne, 28 % (11 jours) des jours de la saison des sucres n'ont pas enregistré la coulée de la sève. Des épisodes de gel-dégel se sont également produits pendant certains de ces jours improductifs. En effet, 17 % de ces jours sans écoulement de sève ont suivi ces épisodes, ce qui correspond à seulement 1 à 4 jours par site et par an. Ce résultat suggère qu'un ou quelques épisodes de gel-dégel ne suffisent pas à induire la coulée de sève, mais que plusieurs épisodes peuvent la favoriser, probablement en raison de jours improductifs consécutifs précédents, en particulier en début de saison. Pendant cette période précoce et improductive, les tiges et le sol sont encore partiellement gelés, ce qui ralentit la coulée de la sève (Perkins *et al.* 2022). Progressivement au cours de la saison des sucres, les résultats montrent une augmentation de la production journalière de sève, probablement liée à la fréquence accrue des épisodes de gel et de dégel.

1.5.3. Projections de la temporalité de la coulée de sève

Nous avons estimé que le début et la fin de la production de sève étaient devancés de 17 et 13 jours, respectivement, selon les scénarios de réchauffement. Ces résultats sont basés sur les périodes de production de sève et les températures mensuelles moyennes de janvier à avril. Nous avons appliqué des augmentations de température uniformes allant jusqu'à 2 °C à ces moyennes mensuelles, ce qui représente un scénario de réchauffement modéré par rapport à l'augmentation projetée de 3,5 °C de la température moyenne annuelle d'ici 2050 pour le Québec (Ouranos 2015). Nos estimations sont en accord avec des études antérieures qui prévoyaient à la fois un début et une fin de saison des sucres plus précoces (Duchesne *et al.* 2009; Skinner *et al.* 2010); Houle *et al.* (2015). Plus précisément, Duchesne *et al.* (2009) ont estimé que l'avancement de la saison des sucres serait de 12 jours et de 19 jours en 2050

et 2090, respectivement. Une autre étude a pris en compte un scénario d'émissions de carbone modéré et un scénario d'émissions de carbone extrême, avec des avancements de la période de production de sève de 15 et 30 jours en 2100, respectivement (Skinner *et al.* 2010). De même, Houle *et al.* (2015) suggère que la saison des sucres pourrait avancer, en moyenne, de 9 à 13 jours pour la période 2046–2065, et de 15 à 19 jours pour la période 2081–2100, et ne constate pas de variation significative de la durée de la saison sucrière au cours des périodes simulées. Les efforts de modélisation précédents étaient basés sur des projections de températures mensuelles ou annuelles dérivées de scénarios d'émissions de gaz et de relevés historiques de production de sirop (Skinner *et al.* 2010; Houle *et al.* 2015). En revanche, notre modèle est basé sur une augmentation uniforme de la température et sur des mesures quotidiennes continues de la production de sève au cours de la saison des sucres. Malgré la différence de source de données et de structure du modèle, nos résultats convergent avec les conclusions précédentes (Skinner *et al.* 2010; Houle *et al.* 2015). En outre, des modèles mathématiques ont été développés pour expliquer l'avancement de la saison des sucres dans des conditions plus chaudes d'un point de vue écophysologique (Graf *et al.* 2015; Schenk *et al.* 2021). Graf *et al.* (2015) ont indiqué que l'absorption d'eau par les racines et la dépression du point de congélation sont les principaux facteurs de la coulée de la sève, bien que des preuves expérimentales supplémentaires soient nécessaires.

Les épisodes de gel et de dégel déterminent les périodes de production de la sève. Pendant la saison des sucres, des cristaux de glace se forment dans les cellules des fibres remplies d'air lorsque la température de l'air descend en dessous de 0 °C. Ce mécanisme attire l'eau dans les fibres, comprimant les bulles d'air. À mesure que la pression négative se répand dans l'arbre (où la pression dans la tige est inférieure à la pression atmosphérique), l'eau est tirée vers le haut par les racines et la tige jusqu'à ce que la sève gèle (Kozlowski et

Pallardy 1996). Lorsque la température dépasse le point de congélation pendant la journée, les branches et la tige dégèlent, repoussant la sève dans les vaisseaux. Ce changement de température stimule la conversion de l'amidon stocké en saccharose, qui est chargé dans la sève. Lorsque les cristaux de glace dans les fibres dégèlent, la pression osmotique du saccharose attire l'eau, ce qui entraîne la coulée de la sève par le trou de coulée en raison de la pression positive (Pickard 2003; Perkins *et al.* 2022). Pour ces raisons, le réchauffement prévu accélère les fluctuations de la température de l'air au-dessus et au-dessous du point de congélation, ce qui entraîne des cycles de gel-dégel plus précoces, des variations de la température du bois et la coulée de sève par entaille (Kurokawa *et al.* 2022).

1.6. Conclusion

Notre étude estime des avances de 17 et 13 jours pour le début et la fin de la saison des sucres dans des scénarios plus chauds. Les variations des températures hivernales et printanières influencent la production de sève (Duchesne *et al.* 2009). Nos résultats montrent également que les cycles de gel-dégel quotidiens se produisent pendant 65 % des jours d'écoulement de la sève, illustrant ainsi leur lien avec une coulée abondante de la sève. Dans l'ensemble, notre étude révèle que le changement climatique, notamment les températures plus chaudes en hiver et au printemps, peut influencer la temporalité de la coulée de sève et la productivité de l'industrie de l'érable à sucre. Les avancées technologiques ont considérablement amélioré le système de production au cours des dernières décennies, permettant l'installation de systèmes hautement automatisés qui maximisent le rendement. Cependant, compte tenu du décalage de la saison des sucres, il est urgent de poursuivre les recherches pour évaluer les processus écophysologiques sous-jacents à la coulée de la sève. Ces études permettront de déterminer de manière plus rationnelle la fenêtre optimale pour l'entaillage des arbres, un aspect essentiel de la chaîne de production qui reste encore largement inexploré. L'acquisition de nouvelles connaissances sur les périodes d'entaillage et l'amélioration potentielle des méthodes d'entaillage pourraient atténuer les incertitudes et les pressions auxquelles les producteurs sont confrontés face au changement climatique en cours. De telles stratégies d'adaptation sont essentielles pour assurer la durabilité économique de l'industrie du sirop d'érable et la santé à long terme des érablières au cours des décennies à venir.

1.7. Conflit d'intérêts

Les auteurs déclarent que la recherche a été menée en l'absence de toute relation commerciale ou financière qui pourrait être interprétée comme un conflit d'intérêts potentiel.

1.8. Contributions des auteurs

GdLS: Analyse formelle, investigation, méthodologie, logiciel, visualisation, rédaction-version originale. RS: Supervision, méthodologie, rédaction-révision et édition. SYSK: Investigation, ressources, rédaction-version originale. GdL: Révision et édition. SR: Conceptualisation, acquisition de fonds, méthodologie, administration du projet, révision de la rédaction et de l'édition.

1.9. Financement

Ce travail a été financé par le Conseil de recherches en sciences naturelles et en génie du Canada (programmes de recherche Alliance et Découverte), le Fonds de Recherche du Québec - Société et culture, l'Observatoire régional de recherche en forêt boréale, Mitacs Globalink, le Syndicat des producteurs des bois du Saguenay-Lac-Saint-Jean, les Producteurs et productrices acéricoles du Québec, le Centre ACER et la Fondation de l'Université du Québec à Chicoutimi.

1.10. Remerciements

Les auteurs remercient A. Gauthier, S. Néron, V. Néron, A. Roussel, R. Gagné et le Parc des Monts Valin pour avoir autorisé l'étude sur leur propriété, A. Khan, H. McNulty, B. Pandeya, A. Garfa et D. Coelho pour leur soutien technique, et A. Garside pour avoir vérifié le texte anglais.

1.11. ANNEXE 1

1.11.1. Matériel supplémentaire

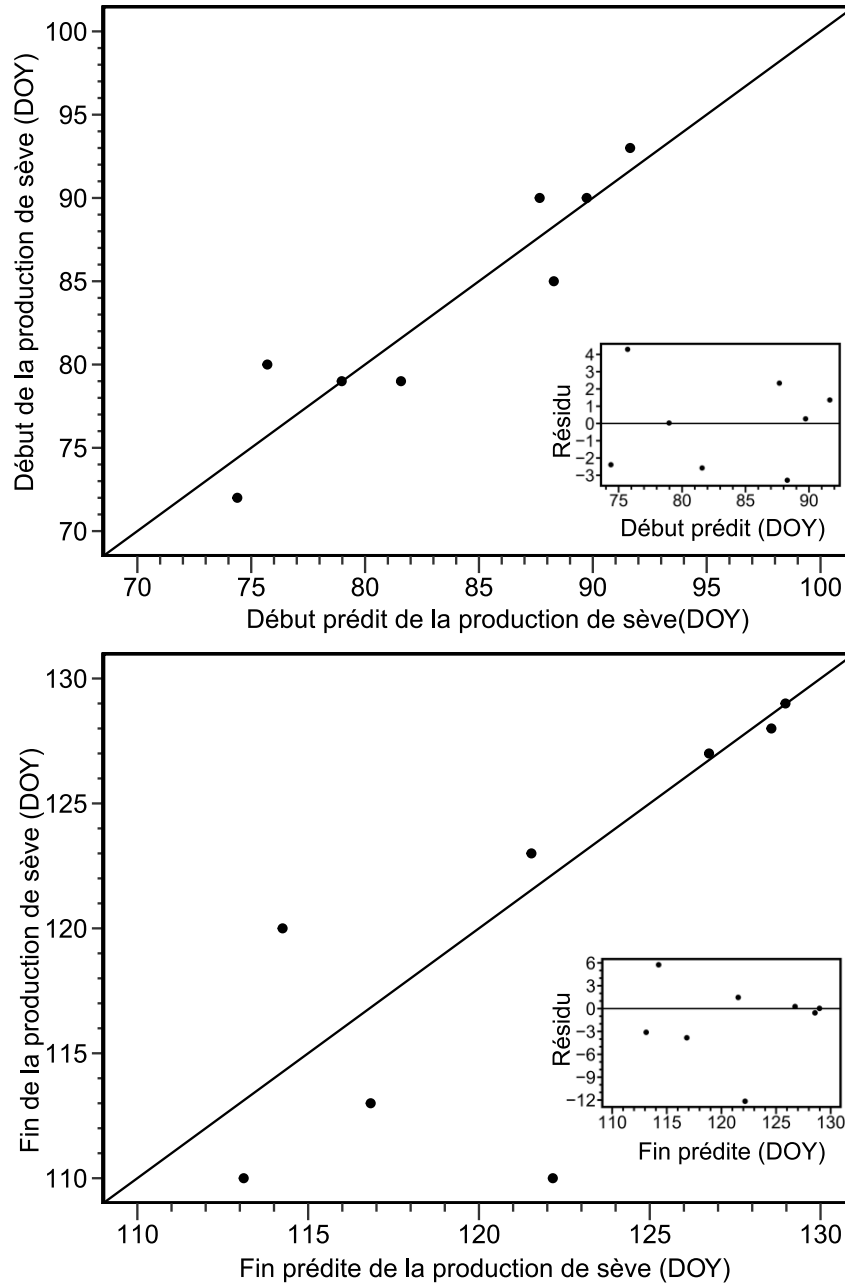


Figure S1. Début (en haut) et fin (en bas) prévus de la production de sève et résidus obtenus à partir du modèle de réseau neuronal.

CONCLUSION GÉNÉRALE

Cette étude a examiné l'impact de températures potentiellement plus chaudes sur les périodes de production de la sève d'érable à sucre au Québec, Canada. Dans un premier temps, nous avons décrit la chronologie quotidienne de la production de sève, observant que certaines périodes nécessitent plus d'attention de la part des acériculteurs. Par exemple, l'entaillage doit être planifié avant le début de la production, malgré son caractère de plus en plus imprévisible. De plus, nous avons constaté un nombre limité de journées productives du milieu à la fin de la saison de la sève, qui sont responsables d'une grande partie de la production totale. Cette période doit être soigneusement prise en compte pour s'assurer que le système de tubulure est correctement installé afin d'éviter les fuites et les pertes de production. Par ailleurs, l'érablière doit disposer d'une main-d'œuvre suffisante pour gérer la charge de travail durant cette phase de production.

Deuxièmement, nous avons analysé les relations entre les périodes de production de sève et les températures de l'air. Nous avons constaté la présence de cycles de gel-dégel pendant la plupart des jours de production, soulignant ainsi l'importance de la température de l'air sur la coulée de la sève. Enfin, nous avons développé un modèle permettant de prédire les périodes et la durée de la saison de la sève dans un contexte de réchauffement climatique. Nos résultats indiquent que l'augmentation des températures pourrait entraîner une réactivation plus précoce des érables au printemps, ce qui modifierait le calendrier de la production. Face à cette réactivation, les acériculteurs devront adapter leurs pratiques culturales en ajustant notamment leur calendrier d'entaillage et en mettant en place des systèmes de surveillance plus précis. Le développement d'outils de prévision basés sur des modèles climatiques et physiologiques pourrait grandement faciliter cette adaptation. À plus

long terme, la sélection de variétés d'érables mieux adaptées aux conditions climatiques changeantes pourrait s'avérer nécessaire pour assurer la pérennité de l'acériculture.

Nous avons mesuré la production de sève à haute résolution à l'aide d'une tubulure similaire à un système par gravité, ce qui élimine les erreurs potentielles associées aux différents systèmes d'entaillage. Notre approche garantit une collecte de données cohérente et précise, permettant ainsi d'obtenir des informations fiables sur la dynamique de la production de sève. D'autres recherches sont nécessaires pour comprendre pleinement les facteurs influençant la coulée et la production de sève. L'analyse continue de ces variables est essentielle pour soutenir les acériculteurs et optimiser leurs opérations. Pour améliorer cette étude, nous recommandons d'utiliser les données de température estivale, d'augmenter la taille de l'échantillon et d'explorer la possibilité d'installer un système de collecte sous vide afin de permettre une analyse comparative.

De plus, une étude comparative des érables à sucre et des érables rouges pourrait fournir de précieuses informations sur leur capacité relative à s'adapter aux changements climatiques. En analysant des facteurs tels que le débit de sève, la teneur en sucre et la santé des arbres, les chercheurs pourraient éclairer les pratiques de gestion forestière durable pour l'industrie du sirop d'érable.

En complément de cette étude, il serait pertinent d'examiner les effets des pratiques de gestion forestière sur la production de sève d'érable. L'élagage sélectif et le maintien d'une densité optimale des arbres peuvent significativement influencer la qualité et la quantité de sève produite. De plus, l'impact du changement climatique sur les insectes ravageurs et les maladies des érables pourrait également jouer un rôle crucial dans la santé des érablières et, par conséquent, dans la production de sève. Une surveillance continue et une adaptation des

stratégies de gestion forestière seraient ainsi essentielles pour garantir la durabilité et la résilience de la production de sirop d'érable face aux défis environnementaux futurs.

Par ailleurs, d'autres étudiants du même groupe de recherche étudient divers facteurs exerçant une influence sur la coulée de la sève, tels que la couverture neigeuse, la teneur en eau du sol et les températures du sol, ainsi que les périodes de croissance des tiges et le processus de réhydratation.

LISTE DE RÉFÉRENCES

- Agriculture et Agroalimentaire Canada. 2023. Aperçu statistique de l'industrie acéricole du Canada 2022. Québec, 14 p.
- Agriculture et Agroalimentaire Canada. 2024. Aperçu statistique de l'industrie acéricole du Canada 2023. Québec, 14 p.
- Ahmed S, Lutz D, Rapp J, Huish R, Dufour B, Brunelle A, Morelli TL, Stinson K et Warne T. 2023. Climate change and maple syrup: producer observations, perceptions, knowledge, and adaptation strategies. *Frontiers in Forests and Global Change*, 6.
- Caughron A, Legault S, Haut C, Houle D et Reynolds TW. 2021. A changing climate in the maple syrup industry: variation in Canadian and U.S.A. producers' climate risk perceptions and willingness to adapt across scales of production. *Small-scale Forestry*, 20 : 73-95.
- Dey DC, Dwyer J et Wiedenbeck J. 2017. Relationship between tree value, diameter, and age in high-quality sugar maple (*Acer saccharum*) on the Menominee reservation, Wisconsin. *Journal of Forestry*, 115 : 397-405.
- Duchesne L et Houle D. 2014. Interannual and spatial variability of maple syrup yield as related to climatic factors. *PeerJ*, 2 : e428.
- Duchesne L, Houle D, Côté M-A et Logan T. 2009. Modelling the effect of climate on maple syrup production in Québec, Canada. *Forest Ecology and Management*, 258 : 2683-2689.
- Fédération des producteurs acéricoles du Québec. 2024. Statistiques acéricoles 2023. Producteurs et productrices acéricoles du Québec, 31 p.
- Government of Canada. 2024. Historical data. Consulté le 10 mai, https://climate.weather.gc.ca/historical_data/search_historic_data_e.html
- Graf I, Ceseri M et Stockie JM. 2015. Multiscale model of a freeze-thaw process for tree sap exudation. *Journal of the Royal Society Interface*, 12 : 1-15.
- Guo X, Khare S, Silvestro R, Huang J, Sylvain J-D, Delagrange S et Rossi S. 2020. Minimum spring temperatures at the provenance origin drive leaf phenology in sugar maple populations. *Tree Physiology*, 40 : 1639-1647.
- Hart JL, Oswald CM et Turberville CM. 2014. Population dynamics of sugar maple through the southern portion of its range: implications for range migration. *Botany*, 92 : 563-569.
- Ho E et Gough WA. 2006. Freeze thaw cycles in Toronto, Canada in a changing climate. *Theoretical and Applied Climatology*, 83 : 203-210.

Houle D, Paquette A, Cote B, Logan T, Power H, Charron I et Duchesne L. 2015. Impacts of climate change on the timing of the production season of maple syrup in Eastern Canada. PLOS ONE, 10 : e0144844.

Intergovernmental panel on climate change. 2021. Climate change 2021. The physical science basis. Working group I contribution to the sixth assessment report of the intergovernmental panel on climate change. Press CU, Cambridge, 2391 p.

Isselhardt ML, Perkins TD, van den Berg AK et Schaberg PG. 2016. Preliminary results of sugar maple carbohydrate and growth response under vacuum and gravity sap extraction. Forest Science, 62 : 125-128.

Kim YT et Leech RH. 1985. Effects of climatic conditions on sap flow in sugar maple. The Forestry Chronicle, 61 : 303-307.

Kozlowski TT et Pallardy SG. 1996. Physiology of woody plants. Elsevier, San Diego, USA, 411 p.

Kuehn D, Chase L et Sharkey T. 2017. Adapting to climate change: perceptions of maple producers in New York and Vermont. Journal of Agriculture, Food Systems, and Community Development, 7 : 1-23.

Kuhn M. 2008. Building predictive models in R using the caret package. Journal of Statistical Software, 28 : 1 - 26.

Kurokawa SYS, Weiss G, Lapointe D, Delagrangé S et Rossi S. 2022. Daily timings of sap production in sugar maple in Quebec, Canada. International Journal of Biometeorology, 67 : 211-218.

Laing FM, Lighthall MTG et Marvin JW. 1960. The use of plastic tubing in gathering maple sap. Burlington, Vermont, 11 p.

Laing FM, Marvin JW et Lighthall MTG. 1962. Effect of new techniques on maple sap yields. Burlington, Vermont, 9 p.

Legault S, Houle D, Plouffe A, Ameztegui A, Kuehn D, Chase L, Blondlot A et Perkins TD. 2019. Perceptions of U.S. and Canadian maple syrup producers toward climate change, its impacts, and potential adaptation measures. PLoS ONE, 14 : e0215511.

Matthews SN et Iverson LR. 2017. Managing for delicious ecosystem service under climate change: can United States sugar maple (*Acer saccharum*) syrup production be maintained in a warming climate? International Journal of Biodiversity Science, Ecosystem Services & Management, 13 : 40-52.

Moreau G, Achim A et 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 : e03183-e03183.

Ouranos HC. 2015. Vers l'adaptation. Synthèse des connaissances sur les changements climatiques au Québec. Ouranos, Montréal, Québec, 415 p.

Perkins TD, Heiligmann RB, Koelling MR et van den Berg AK. 2022. North American maple syrup producers manual. North American Maple Syrup Council, 434 p.

Pickard WF. 2003. The riddle of root pressure. I. Putting Maxwell's demon to rest. *Functional Plant Biology*, 30 : 121-134.

Plamondon AP. 1977. Analyse préliminaire de quelques facteurs écologiques influençant la production de la sève de l'Acer saccharum. *Naturaliste Canadien*, L'université Laval, Québec, p. 127-134.

PPAQ. 2021. Quality control of our bulk maple syrup. Dans : ACER Division Inspection Inc. éd., p. 3.

PPAQ. 2024. La classification du sirop d'érable, gage de qualité. <https://ppaq.ca/en/maple-production/quebec-maple-syrup-graded-quality/>

Rademacher T, Cliche M, Bouchard É, Kurokawa SYS, Rapp J, Deslauriers A, Messier C, Rossi S, Dupras J, Filotas É et Delagrange S. 2023. TAMM review: On the importance of tap and tree characteristics in maple sugaring. *Forest Ecology and Management*, 535 : 120896.

Ramadan MF, Gad HA et Farag MA. 2021. Chemistry, processing, and functionality of maple food products: An updated comprehensive review. *Journal of Food Biochemistry*, 45 : e13832-e13832.

Ren P, Liang E, Raymond P et Rossi S. 2021. Bud break in sugar maple submitted to changing conditions simulating a northward migration. *Canadian Journal of Forest Research*, 51 : 842-847.

Robin X, Turck N, Hainard A, Tiberti N, Lisacek F, Sanchez J-C et Müller M. 2011. pROC: an open-source package for R and S+ to analyze and compare ROC curves. *BMC Bioinformatics*, 12 : 77.

SAS Institute Inc. 2022. JMP®, Version Pro 17.0. Cary, NC.

Schenk HJ, Jansen S et Hölttä T. 2021. Positive pressure in xylem and its role in hydraulic function. *The New phytologist*, 230 : 27-45.

Singh AS, Jones AMP et Saxena PK. 2014. Variation and Correlation of Properties in Different Grades of Maple Syrup. *Plant Foods for Human Nutrition*, 69 : 50-56.

Skinner CB, DeGaetano AT et Chabot BF. 2010. Implications of twenty-first century climate change on Northeastern United States maple syrup production: impacts and adaptations. *Climatic Change*, 100 : 685-702.

Smith HC et Gibbs CB. 1970. Comparison of vacuum and gravity sap flows from paired sugar maple trees. United States Department of Agriculture, Forest Service, United States, 1-4 p.

Tyree MT et Zimmermann MH. 2002. Xylem structure and the ascent of sap. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg.

Vincent LA, Zhang X, Brown RD, Feng Y, Mekis E, Milewska EJ, Wan H et Wang XL. 2015. Observed trends in Canada's climate and influence of low-frequency variability modes. *Journal of Climate*, 28 : 4545-4560.

Walters RS et Smith HC. 1975. Sugar maple sap volume increases as vacuum level is increased. Upper Darby, Pennsylvania, 4 p.

Wilmot TR, Perkins TD et van den Berg AK. 2007. Vacuum sap collection: how high or low should you go? , *Maple Syrup Digest*, Canterbury, NH, p. 27-32.

Wong BL, Baggett KL et Rye AH. 2003. Seasonal patterns of reserve and soluble carbohydrates in mature sugar maple (*Acer saccharum*). *Canadian Journal of Botany*, 81 : 780-788.

Yalavarthi R et Shashi M. 2009. Atmospheric temperature prediction using support vector machines. *International Journal of Computer Theory and Engineering*, 1 : 55-58.

Yawney HW. 1977. Why vacuum pumping increases sap production. *Maple Syrup Digest*, Worcester, MA, p. 20-23.